



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Nikola Strnadová

POROVNÁNÍ POHONŮ MĚSTSKÝCH ELEKTROBUSŮ

Diplomová práce

2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K616.....Ústav dopravních prostředků

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Nikola Strnadová

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Porovnání pohonů městských elektrobusů**

Název tématu (anglicky): Comparison of Electric City Bus drives

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Proved'te rešerši problematiky provozu městských elektrobusů a uveďte specifika jejich provozu.
- Popište pohon elektrobusu a používané baterie.
- Uveďte přehled městských elektrobusů provozovaných v ČR a velkých evropských městech.
- Navrhněte možnost otestování vhodnosti pohonu elektrobusu pro vámi zvolenou lokalitu.
- Vyberte vhodné provozní parametry, na základě dostupných provozních dat ověřte vhodnost použití elektrobusů v zadané lokalitě a proved'te porovnání vozů s odlišnými pohonnými jednotkami.
- Na základě provedených testů vyřkněte závěry a navrhněte vhodné parametry elektrobusů pro nasazení v řešené lokalitě.




- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: VLK, František. Elektrická zařízení motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2005. ISBN 80-239-3718-9
BIRKE, P. Modern battery engineering a comprehensive introduction. 2019. ISBN 978-981-3272-15-6.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Mík, Ph.D.**
Ing. Michal Malý

Datum zadání diplomové práce: **22. června 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

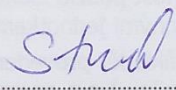
Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce (vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia)
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků




.....
prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Nikola Strnadová
jméno a podpis studenta

V Praze dne 17. května 2022

Poděkování

Touto formou bych ráda poděkovala oběma vedoucím své diplomové práce, tedy Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. a Ing. Michalu Malému, za odborné vedení diplomové práce. Oběma vedoucím, ale i všem ostatním, kteří se účastnili konzultací k mé diplomové práci, bych ráda poděkovala za jejich čas i rady, které mi poskytovali. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za podporu, kterou mi poskytovala po celou dobu studia.

Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci, která byla zpracována na závěr studia na ČVUT, fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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 dne 2. května 2022

.....

podpis

Abstrakt

Předmětem diplomové práce je zhodnocení stavu elektromobility v rámci městské autobusové dopravy a návržení testování vhodnosti vozidel pro konkrétní lokalitu. Stav elektromobility v MHD je v této práci demonstrován na množství a typech elektrobusů v jednotlivých dopravních podnicích a na celkovém postoji vybraných dopravních podniků k elektromobilitě. Vhodnost testovaných vozidel pro vybranou lokalitu byla posuzována na základě udávaných dat o vozidlech a dle dat záznamů jízd.

Abstract

The subject of the master thesis is the assessment of the state of electromobility in city bus transport and design vehicle suitability test for a specific location. The level of electromobility in city bus transport is demonstrated by the amount and types of electrobuses in the transport company and its policy in the field of electromobility. The suitability of the tested vehicles for the selected location was assessed by the vehicle data from the producer and data recorded during the drives.

Klíčová slova

Elektrobus, pohon elektrobusu, baterie elektrobusu, nabíjení elektrobusu, testování elektrobusu pro vybranou lokalitu.

Key words

Electric bus, electric bus drive, electric bus batteries, electric bus charging, electric bus testing for a selected area.

Obsah

Seznam použitých zkratek	7
1 Úvod	8
2 Provoz městských elektrobusů a specifika jejich provozu	9
2.1 Městské elektrobusy	9
2.2 Specifika provozu elektrobusů.....	9
2.2.1 Nízké venkovní teploty.....	9
2.2.2 Nabíjení baterie vozidla.....	11
2.2.3 Rozvoj elektromobility	14
3 Pohon a baterie elektrobusů.....	17
3.1 Pohon elektrobusů.....	17
3.1.1 Princip elektromotorů	17
3.1.2 Dělení elektromotorů.....	17
3.2 Baterie elektrobusů	19
3.2.1 Běžné typy trakčních baterií silničních vozidel.....	21
3.2.2 Budoucnost baterií a jejich recyklace	23
4 Přehled provozovaných městských elektrobusů.....	24
4.1 Elektrobusy v zahraničí a ve vybraných metropolích.....	24
4.1.1 Hamburk, Německo.....	25
4.1.2 Londýn, Velká Británie	27
4.1.3 Shenzhen, Čína	29
4.2 Elektrobusy v České republice.....	30
4.2.1 Hradec Králové.....	30
4.2.2 Praha	34
4.2.3 Trutnov	35
4.2.4 Písek	35
4.2.5 Ostrava.....	36

5	Návrh testování vhodnosti pohonu elektrobuse pro zvolenou lokalitu	38
5.1	Porovnání vozidel na základě parametrů udávaných výrobcem.....	39
5.1.1	Vozidlo SOR NS 12 electric 030.....	39
5.1.2	Vozidlo SOR NS 12 electric 046.....	40
5.2	Porovnání vozidel pomocí provozních dat	40
5.3	Hodnocení vybraných měřených parametrů vozidel	42
5.3.1	Spotřeba elektrické energie	44
5.3.2	Úroveň nabití baterie	46
5.3.3	Průběh výkonu vozidel	49
6	Výsledky porovnání vozidel dle zpracovaných dat.....	52
6.1	Hodnocení vozidel pro vybranou lokalitu.....	52
7	Závěr.....	55
8	Citovaná literatura	58
9	Seznam obrázků.....	67
10	Seznam tabulek.....	68

Seznam použitých zkratek

AC	Střídavý proud (Alternating Current)
AGM	Absorpční skleněná rohož (Absorbent Glass Mat)
BMS	Správa baterie (Battery Managemens System)
DC	Stejnoseměrný proud (Direct Current)
DPMHK	Dopravní podnik města Hradec Králové
DPP	Dopravní podnik hlavního města Prahy
EU	Evropská unie
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatthodina
Li-ion	Lithium iontová (baterie)
MHD	Městská hromadná doprava
NiMH	Níkl metal hydridová (baterie)
NMC	Materiál o složení LiNiMnCoO_2

1 Úvod

Tématem této diplomové práce je hodnocení současného stavu elektromobility v městské autobusové dopravě. Motivací pro zpracování tohoto tématu byl přetrvávající rozmach elektromobility v rámci městské hromadné dopravy, který je doprovázen vznikem spousty nových výzev. Elektrifikace městské hromadné dopravy je celosvětovým trendem. Kromě samotného výběru vhodných vozidel pro danou lokalitu zahrnuje například úpravu kapacity elektrické sítě, či tvorbu sítě nabíjecích stanic. V rámci flotil mnoha dopravních podniků rostou počty elektrobusů především na úkor autobusů s pohonem na fosilní paliva. Oproti těm se elektrobusy mimo jiné liší i ve způsobu provozu.

V teoretické části práce jsou řešena již zmiňovaná specifika provozu městských elektrobusů. Dále je řešen pohonný systém vozidla. Stručně je přiblížen princip fungování elektromotoru, jeho dělení a porovnání jednotlivých typů. Následuje část věnovaná bateriím elektrobusů a jejich nabíjení. Značný díl teoretické části pak tvoří průzkum nasazení elektrobusů v rámci městské hromadné dopravy ve vybraných českých i zahraničních městech. Sledováno je množství nasazených elektrobusů, ale i jejich konkrétní modely ve vybrané lokalitě.

V praktické části práce byla porovnávána dvě vozidla typu SOR NS 12 electric. Jedná se o jeden standardně nasazovaný model na obsluhu linek královehradecké městské hromadné dopravy a o jeden prototyp. Obě vozidla se liší v pohonném systému. Elektrobusy byly nejprve porovnány na základě svých technických parametrů. Následně byly porovnány na základě dat představujících záznamy jejich jízd. Pro co nejvyšší objektivitu dat vozidla absolvovala tyto jízdy současně. První vozidlo standardně obsluhovalo vybranou linku a prototyp, tedy vozidlo s novějším pohonným systémem, ho následoval. Kromě samotného porovnání těchto dvou vozidel, práce obsahuje vyhodnocení vhodnosti využití těchto elektrobusů pro danou lokalitu.

2 Provoz městských elektrobuses a specifika jejich provozu

2.1 Městské elektrobuses

U drážních vozidel je elektrický pohon už po řadu let samozřejmostí. Tramvaj, trolejbus či metro tedy můžeme označit za dopravní prostředky s tzv. čistým pohonem. Do tohoto výčtu lze také zařadit hybridní trolejbus, tzv. parciální. Jedná se o variantu, kdy je trolejbus vybaven akumulátorem a je tedy schopen jízdy na elektrický pohon i po odpojení z trakčního vedení. K dobití akumulátoru dojde po opětovném napojení na trakci, nebo rekuperací při brzdění.

Cestou elektrického pohonu se pomalu ale jistě vydávají i autobusy. Několik českých měst si dalo za cíl stoprocentní elektromobilitu v MHD. V některých oblastech jsou elektrobuses stále ještě testovány, v jiných jsou v plném provozu. Nicméně praxe ukazuje na limity a jistá specifika elektromobility. Problém může nastat například při obsluze velmi dlouhých linek, nebo na linkách s vysokým stoupáním. Někde proto elektrobuses obsluhují jen linky, které jim nečiní již zmíněné problémy, jinde vedení města upravuje podmínky pro možnou aplikaci elektrobuses na jakékoli trasy. Řešením může být rychlonabíjení akumulátoru na zastávkách, nebo výstavba nabíjecích stanic na konečné stanici linky.

2.2 Specifika provozu elektrobuses

Elektrobuses, stejně jako elektromobily, se od vozidel s konvenčními pohony liší kromě vlivu na životní prostředí, konstrukcí, nebo komponenty, také ve způsobu jejich provozu. Významnými specifiky jejich provozu jsou například kratší dojezdové vzdálenosti, nebo negativní vlivy počasí na trakční baterii vozidla. Další specifika spočívají například v potřebě nové nabíjecí infrastruktury, a i v samotném zajištění dostatečně kapacitní a stabilní elektrické sítě.

2.2.1 Nízké venkovní teploty

Jedním ze specifik provozu elektrobuses oproti standardním dieselovým autobusům je negativní vliv nízkých venkovních teplot na dojezd vozidla. Mrazivé klima způsobuje kromě přímého snížení kapacity baterie také odčerpávání její energie pro potřebu vytápění vozidla. Vliv nízkých teplot na kapacitu baterie je způsoben tím, že chemické děje v baterii probíhají při nízkých teplotách pomaleji, čímž jsou zpomalovány i její fyzikální děje.

Eliminovat ztráty kapacity baterie u vozidel s elektrickým pohonem v zimním období lze několika způsoby. Prvním z nich je předehřívání baterie i vnitřních prostor vozidla. Je také vhodné využívat vyhřívání sedadel, či volantu. Takovéto lokální vyhřívání spotřebovává méně energie než vyhřívání prostoru celého kokpitu vozidla, a tím spíše autobusu. Některá vozidla v mrazech šetří baterii s pomocí bateriového managementu. Taková vozidla mají limit napětí pro nabíjení chladné baterie. Po ohřátí baterie termální systém vozidla limit nabíjecího napětí navýší zpět. U vozidel s tímto řešením je v zimních měsících třeba vyhradit si pro účely nabíjení více času. (1)

Problémy spojené s nedostatečnou kapacitou baterie vozidla při jeho provozu ve velmi nízkých teplotách byl řešen například v Berlíně, kde během loňské zimy musely být během mrazivějších dní některé typy elektrobuses nahrazovány jinými vozidly. Zde se zjistilo, že problémy měla pouze vozidla s výhradním nabíjením v garážích. Vozidla s možností průběžného nabíjení na konečných stanicích fungovala bez omezení. Přesto jsou výpadky elektrobuses, byť jen s nabíjením v depu, zvláštní, protože podle všeobecně udávaných hodnot i testu norského autoklubu NAF je v zimě dojezd vozidla zkrácen v průměru o 20 %. (2)

U některých elektrobuses je pro snížení odčerpávání energie baterie, při provozu vozidla za extrémních venkovních teplot, používáno tepelné čerpadlo. Například u elektromobilů se udává, že použitím tepelného čerpadla se v zimních měsících může prodloužit dojezd vozidla až o 30 %. (3)

Zjednodušeně řečeno, tepelné čerpadlo je zařízení, které získává energii z okolního vzduchu za pomoci výměníku. V tom proudí nemrzoucí kapalina s nižší teplotou, než má okolní vzduch. Tepelná energie získaná kapalinou ze vzduchu je předána chladivu. Chladivo má nízkou teplotou varu, a tak se odpařuje již při nižších teplotách. Chladivo v plynné formě je stlačeno kompresorem, a tím se zahřívá. Zahřáté chladivo následně v kondenzátoru předává teplo okolí a zároveň se ochlazuje. Následuje dekomprese chladiva s poklesem jeho tlaku i teploty a cyklus se opakuje od začátku. Pro představu množství úspory energie je zde uveden příklad u osobního elektromobilu. Při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ tepelné čerpadlo takového vozidla spotřebuje asi 0,45 kWh energie na 1 km. Oproti tomu elektrické topení při shodných podmínkách spotřebuje přes 1 kWh na 1 km. (4)

Z elektrobuses využívá tepelné čerpadlo například Mercedes eCitaro, Scania Citywide LF, SOR EBN 11 a mnoho dalších. Mercedes eCitaro díky tepelnému čerpadlu uspoří až tři čtvrtě výkonu pro vytápění. U elektrického autobusu SOR EBN 11 byla sledována spotřeba elektrické energie

při využití tepelného čerpadla pro vytápění i klimatizaci vozidla, u níž se také osvědčilo. Kloubový elektrobus Solaris je vybaven tepelným čerpadlem Konvekta. Oproti vytápění založeném na čerpání veškeré energie z baterie je při vytápění s pomocí tohoto čerpadla spotřebováváno pouze 25 % energie a zbylá je získána z okolního prostředí. (5) (6) (7) (8)

Jiné řešení, které je však na pováženou, je naftové vytápění. Toto řešení je značně kontraproduktivní. Vytápěním sice není odčerpávána elektrická energie pro trakci, a tak vytápění nesnižuje dojezd elektrobusu, je to však na úkor jeho jinak bezemisního provozu.

Kromě nízkých teplot na baterii nemají dobrý vliv ani extrémně vysoké teploty. Na rozdíl od chladu mohou být následky vysokých teplot nevratné. Proto je potřeba zvážit vhodnost elektromobilu i dle klimatických podmínek ve kterých má být provozován.

2.2.2 Nabíjení baterie vozidla

Dalším specifikem vozidel s elektrickým pohonem je jeho nabíjení. Doba pro nabíjení baterie je delší v porovnání s dobou doplňování pohonných hmot u vozidel se spalovacím motorem. Na rozdíl od případu osobních elektromobilů toto specifikum u elektrobusů nemusí být žádný problém, vzhledem k jejich přesně naplánovanému nasazení na linkách, a tím i možnému načasování nabíjení.

Existují dva základní typy nabíjení baterie, které se liší podle typu proudu vstupujícího do vozidla. Prvním typem nabíjení je nabíjení stejnosměrným proudem, tedy DC. Druhým typem nabíjení je nabíjení střídavým proudem, tedy AC. (9)

Při AC nabíjení je na vstup vozidla přiváděn střídavý elektrický proud. Na vstupu baterie je stejnosměrný proud, a proto je třeba aby v případě AC nabíjení převedla proud ze střídavého na stejnosměrný palubní nabíječka. Její výkon přímo ovlivňuje rychlost nabíjení. Vozidlo může využívat AC nabíjení ze standardní jednofázové zásuvky o 230 V, z dobíjecí stanice a v případě některých elektrobusů i z trolejového trakčního vedení. (9)

DC nabíjení je rychlejší, využívá se tedy v tzv. rychlonabíjecích stanicích. Vyšší rychlost nabíjení je dána tím, že proud je ze střídavého na stejnosměrný měněn už v nabíjecí stanici. Není už tedy potřeba proud převádět v palubní nabíječce. Rychlost u tohoto typu nabíjení závisí především na výkonu nabíjecí stanice a na parametrech baterie. Rychlonabíjecí stanice mají obvykle výkon 50 kW. Ty nejvýkonnější dosahují výkonu až 350 kW. (9)

Rozdíl v AC a DC nabíjení je kromě jejich výkonu také v jejich průběhu. AC nabíjení je po celou dobu téměř konstantní, což je způsobeno nižšími výkony. DC dobíjení se po dosažení

75 % kapacity baterie výrazně zpomalí. DC nabíjení oproti AC nabíjení způsobuje počátečním čerpáním maximálního výkonu větší nestabilitu sítě. (9)

S ohledem na typ nabíjení a lokalitu jsou pro nabíjení vozidel využívány různé konektory. V rámci lokality je snaha konektory standardizovat. Pro evropské prostředí jsou standardizovány konektory Mennekes a CCS2. Oba tyto konektory spolu s dalšími jsou zobrazeny na obrázek 2.

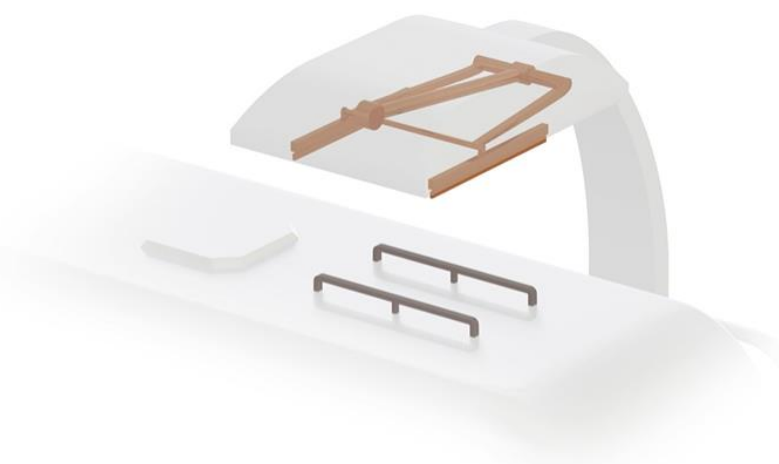
Pro AC nabíjení je v evropském prostředí využíván především Type 2, zvaný Mennekes. Konektorem Mennekes byl v Evropě nahrazen konektor Type 2, zvaný J-Plug. Mennekes byl vyvinut Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC, International Electrotechnical Commission) na základě specifikací IEC 62196 z roku 2003. Hlavním požadavkem bylo, aby nový konektor dokázal využívat všechny tři fáze napětí, což Mennekes splňuje. To je také hlavním rozdílem od konektoru J-Plug, který využívá pouze jednu fázi napětí. Dalším rozdílem je, že Mennekes podporuje automatický zamykací systém, který blokuje nabíjení, pokud není konektor zcela zasunut do zásuvky. (10)

Pro DC nabíjení je v Evropě standardizován konektor CCS-2. CCS je zkratkou od Combined Charging System, což v překladu znamená kombinovaný systém nabíjení. Znamená to tedy, že CCS konektory lze použít pro AC i DC nabíjení. Vrchní část konektoru CCS-2 odpovídá konektoru Mennekes. V případě DC nabíjení jsou v horní části CCS-2 konektoru využívány pouze komunikační pin a vodič pro uzemnění. Spodní část konektoru je tvořena dvěma piny, které slouží pro samotné rychlonabíjení. Typ CCS-1 funguje obdobně, jen je jeho horní část tvořena konektorem zvaným J-plug. Ten je nyní využíván pro AC nabíjení především v Severní Americe, kde je i standardem. CCS konektory jsou dimenzované na výkon až 350 kW. (10)



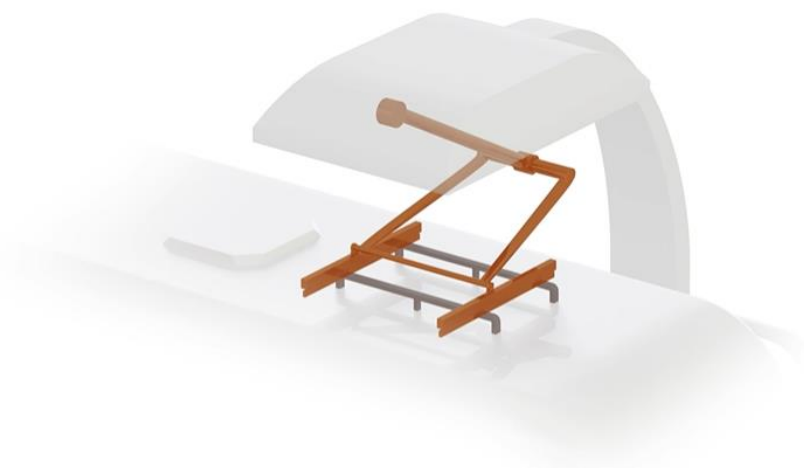
Obrázek 2 - Vybrané nabíjecí konektory (79)

V roce 2016 byla vytvořena spoluprací několika výrobců elektrobusů a dodavatelů nabíjecích zařízení standardizovaná technologie rychlonabíjení s názvem OppCharge. Pantograf je v tomto případě součástí nabíjecí stanice a pouze dosedá na ližiny na střeše elektrobusu. Ližiny jsou celkem 4, a představují plus, minus, uzemnění a poslední ližina slouží pro indikaci správného propojení mezi vozidlem a nabíjecí stanicí. Pojistkou propojení je také kontrola aktivace ruční brzdy. OppCharge nabízí nabíjení 150 kW, 300 kW, 450 kW a 600 kW. Napájecí skříň je v blízkosti nabíjecího stojanu a je připojena do sítě nejčastěji o střídavém napětí 400 V.



Obrázek 1 - Pantografová konzole systému OppCharge s pantografem uloženým v konstrukci nabíjecí stanice (73)

Napájecí skříň transformuje napětí na stejnosměrný proud, kterým se napájí elektrobus. Nabíjecí systém OppCharge znázorňují obrázek 1 a obrázek 3. (11)



Obrázek 3 - Pantografová konzole systému OppCharge s pantografem dosedajícím na ližiny (73)

2.2.3 Rozvoj elektromobility

Dalším specifikem elektromobility je její současná popularizace a propagace ze strany některých subjektů. S trendem přechodu na elektromobilitu se vážou podstatné výdaje. Kromě nákupu nových vozidel je potřeba i modernizace infrastruktury. Pro plnění globálních cílů ve snižování produkce emisí podporuje Evropská unie své členské státy dotacemi na tyto výdaje. V České republice se finance poskytnuté Evropskou unií na podporu elektromobility společně s vlastními zdroji přerozdělí mezi statní správu, kraje, obce, firmy i občany. (12)

Už v minulých letech byla elektromobilita v Česku dotována. Dotace poskytovaly například Operační programy Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost a Doprava. Tyto programy podporovaly pořízení elektromobilů, výstavbu dobíjecí infrastruktury a dobíjecích stanic. Dalším programem na podporu tohoto trendu je Integrovaný regionální operační program, který podpořil elektromobilitu v rámci MHD. (12)

Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost zahrnoval 0,64 miliard korun. Program měl přispět k pořízení 1100 elektromobilů, 465 dobíjecích stanic a 108 rychlonabíječek. (12)

Operační program Doprava, probíhající mezi rokem 2014 a 2020, disponoval částkou 1,25 miliard korun. Podpora měla vést v rámci programu k výstavbě 1280 dobíjecích stanic, 18 LNG a 9 CNG stanic a 7 vodíkových plniček. (12)

Integrovaný regionální operační program disponoval rozpočtem 8,5 miliardy korun. Do konce roku 2020 bylo s podporou tohoto programu pořízeno 79 elektrobusesů, 156 trolejbusů, 39 tramvají a 590 CNG autobusů. V rámci tohoto programu bylo pořízeno také 20 elektrobusesů pro městskou hromadnou dopravu Hradce Králové, ve kterém bylo prováděno měření zpracovávané v praktické části této práce. (12) (13)

Mezi lety 2016 a 2020 byl aktivní program Životní prostředí, který každoročně poskytoval 100 milionů korun pro nákup nízkoemisních vozidel. Na rozdíl od předchozích se jedná o národní program, jenž čerpá výhradně z národních zdrojů. (12)

Pro elektromobilitu jsou vyhrazené finanční prostředky i ve Fondu obnovy EU. Možnost čerpání financí z Fondu obnovy EU je podmíněno předložením Národních plánů obnovy. Česká republika má z tohoto fondu k dispozici 4,9 miliard korun. Ty plánuje využít pro nákup 2880 domácích dobíjecích stanic, 52 veřejných nabíjecích stanic a rozšíření trolejového vedení na vybraných úsecích. (12)

Nově byl vytvořen Modernizační fond, jehož cílem je podporovat tzv. zelené projekty v období od roku 2021 do roku 2030. Modernizační fond byl vytvořen Evropskou unií jako prostředek pro modernizaci energetických soustav a dopravy. Finanční prostředky z tohoto fondu je možné využít na projekty, které vedou k rozvoji obnovitelných energetických zdrojů, snižování produkce emisí a zvyšování energetické účinnosti. Oblasti dopravy se nejvíce týkají tzv. programy číslo 5 a číslo 6. Program číslo 5, tedy program modernizace dopravy v podnikatelském sektoru, cílí na podporu nákupu nízkoemisních vozidel a potřebnou infrastrukturu k nim pro podnikatele. Program číslo 6, tedy program modernizace veřejné dopravy, podporuje veřejné subjekty ve snahách o rozšíření provozu nízkoemisních vozidel. Poskytuje finanční prostředky na nákup takových vozidel a na úpravu infrastruktury pro jejich možný provoz. (14)

Tyto dotační programy vedou Českou republiku k plnění akčního plánu pro rozvoj čisté mobility. (12)

Postoje a záměry Evropské unie nejen k budoucnosti elektromobility jsou popsány v rámci Bílé knihy EU. Konkrétně elektromobilita je řešena asociací pro chytrou energii SmartEn. Cíle této evropské asociace pro energetická řešení jsou především podpora efektivity energetického systému, inovace a rozmanitost na energetickém trhu, posílení role spotřebitelů energie a podpora dekarbonizace energetického sektoru. Víze asociace jsou podrobně popsány v Bílé knize SmartEn – Integrace elektrických vozidel jako nedílné součásti do energetického

systemu, z roku 2019. V tomto dokumentu je řešena elektromobilita obecně, bez separace veřejné hromadné dopravy. Mezi hlavní benefity elektromobility je v dokumentu řazeno naplňování cíle dekarbonizace dopravního sektoru. V Bílé knize bylo uvedeno 5 základních priorit pro dosažení plné integrace elektrických vozidel do energetického systému. Jsou to:

- a. Usnadnění interakce elektrovozů s elektrickou sítí.
- b. Eliminace překážek při vyšší kumulaci elektrovozů.
- c. Podpora snižování nákladů na instalaci a celkovou dostupnost chytré nabíjecí infrastruktury.
- d. Jednotný systém v rámci Evropské unie pro zvýšení uživatelské přívětivosti.
- e. Úprava daňové zátěže na elektromobilitu vzhledem k jejím sociálním i environmentálním přínosům.

Sektor dopravy je dle EU zodpovědný za produkci 30 % emisí oxidu uhličitého v Evropě. I proto má hrát právě odvětví dopravy významnou roli při cestě za klimatickou neutralitou ekonomiky. V současné době je poměrně rozšířeným alternativním pohonem zkapalněný zemní plyn (LNG). Přesto je do budoucna nejslibnějším řešením pro dekarbonizaci dopravy pohon na elektrickou energii. Tyto strategie mají zajistit v období mezi lety 2020 a 2030 roční nárůst elektrovozů o 30 %, navýšení podílu elektrovozů na evropském poli o 9 % a do roku 2040 dosažení podílu 63 % v prodávaných elektrovozech. S navyšováním počtu vozidel s elektrickým pohonem počítají strategie i s rozšiřováním chytré nabíjecí infrastruktury, která vyhoví poptávce koncových uživatelů. (15)

3 Pohon a baterie elektrobusů

3.1 Pohon elektrobusů

3.1.1 Princip elektromotorů

Elektromotor je zařízení, které mění elektrickou energii na mechanickou, anebo naopak. Ve většině případů se jedná o točivý elektrický stroj. Má však variantu i lineárního elektromotoru, která se využívá například pro pohon některých rychlovlaků. Pro využití v elektromobilech se využívá ta obvyklejší, točivá varianta, která zde bude na úvod zjednodušeně přiblížena. Jeho jádro je tvořeno státorem a rotorem. Stator, jak již z jeho názvu vyplývá, je statická část, která je tvořena cívkami s magnetickým obvodem, elektromagnety, nebo permanentními magnety. Rotor je umístěn uvnitř statoru a jedná se o otáčivou část. Rotor je tvořen cívkou, magnetickým obvodem a hřídelí. Elektromotor může mít více režimů. Jsou to:

- a. Motorický režim, kdy motor odebírá elektřinu z baterie a přeměňuje ji na mechanickou energii.
- b. Generátorický režim, kdy motor přeměňuje mechanickou energii v elektrickou.
- c. Brzdící režim, kdy motor odebírá elektřinu z baterie a výkon této energie nechá působit proti mechanickému pohybu při čemž vzniká teplo.

(16)

3.1.2 Dělení elektromotorů

Elektromotory můžeme dělit dle několika parametrů. Může to být například podle druhu proudu, který jej pohání na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné pak podle zapojení vinutí statoru i rotoru na sériové a derivační. Střídavé pak můžeme dělit podle druhu napájecího proudu na jednofázové, nebo třífázové, nebo podle vzájemného působení magnetických polí na synchronní a asynchronní. Rozdíl mezi nimi může být v účinnosti, výkonu i nárocích na zdroj.

3.1.2.1 Stejnosměrné elektromotory

Stejnosměrné elektromotory mají stator tvořený dvěma elektromagnety napájenými stejnosměrným proudem. Magnety vytvoří 2 póly. Rotor stejnosměrného elektromotoru je tvořen železnými pláty, ve kterých má drážky pro vinutí. Vinutí jsou dále vyvedena na komutátor složený z lamel. Na lamely doléhají kartáčky, na které je připojen zdroj stejnosměrného proudu. Proud pak prochází vždy jen jedním vinutím, se kterým je spojena daná lamela. Kolem vinutí vznikne magnetické pole, které je přitahováno k opačnému pólu statoru a

rotor se pootočí. K následnému pootočení rotoru dojde vždy, když se kartáčky dotknou následující sousední lamely. (17)

Pokud je vinutí statoru a rotoru stejnosměrného elektromotoru zapojeno sériově, jedná se o sériový motor. Pokud paralelně, jde o motor derivační. Sériový stejnosměrný elektromotor je schopen na rozdíl od derivačního měnit své otáčky podle zatížení. Tento motor je vhodný pro aplikace, kde je zapotřebí větších tažných sil. Derivační motor se naopak používá tam, kde je žádoucí téměř konstantní rychlost otáček. (17)

3.1.2.2 Střídavé elektromotory

Stator u střídavého elektromotoru je tvořen elektromagnety. V případě třífázového elektromotoru jsou na statoru tři elektromagnety, které jsou posunuty o 120° . Každým jeho vinutím protéká proud jen jedné fáze třífázového proudu. Stator asynchronního jednofázového elektromotoru tvoří točivé magnetické pole jedinou fází. Stator tohoto typu motoru je tvořen plochými prstencovými plechy a je doplněn dvěma vnitřními vinutími, které jsou vzájemně posunuté o 90° . (17) (18)

Pokud se frekvence otáčení pólů střídavého elektromotoru shoduje s frekvencí střídavého proudu, jedná se o synchronní elektromotor. Takový motor má vinutí statoru napájeno střídavým proudem a vinutí rotoru stejnosměrným. Otáčky synchronního motoru jsou konstantní. Tento motor má vysokou účinnost. Asynchronní elektromotor, na rozdíl od předchozích elektromotorů, nemá přívod elektrického proudu na rotor. Elektrický proud v tomto motoru proudí pouze do vinutí statoru, které je umístěné v jeho drážkách. (17)

Asynchronní elektromotor má stator složený z plochých prstencových plechů, naskládaných na sebe. Jeho rotor je tvořen z nemagnetického materiálu. Rotor má po svém obvodu drážky, ve kterých jsou vedeny vodiče z hliníku, nebo mědi. Když je tento motor uveden do chodu, vytvoří se točivé magnetické pole ve statoru. To ve vodičích rotoru indukuje napětí a rotorem prochází střídavý elektrický proud, který zapříčiní vznik magnetického pole. Magnetické pole vyvolá točivý moment a rotor je uveden do pohybu. Aby mohl být rotor uveden do pohybu, je třeba, aby jeho otáčky byly menší než otáčky magnetického pole statoru, které jeho pohyb zapříčiňují. Rozdíl těchto dvou otáček se označuje jako skluz. (19)

Asynchronní třífázový motor je výkonný a spolehlivý. Má jednodušší konstrukci. Jeho nevýhodami jsou nižší účinnost, nižší schopnost rekuperace energie a vyšší hmotnost. (20)

Synchronní elektromotor je konstrukčně shodný s asynchronním elektromotorem. Rozdílem je, že rotor je tvořen permanentním magnetem, nebo elektromagnetem. Jeho elektromagnet je složen z plechů a vinutí, kterými prochází stejnosměrný elektrický proud. Po uvedení do chodu se ve statoru tvoří točivé magnetické pole. Póly statoru střídavě přitahují protipóly rotoru a odpuzují ty souhlasné. V zájmu zachování tohoto točivého pohybu působí setrvačná síla. Je ale potřeba dodat počáteční impuls rotoru, což obvykle zajišťuje pomocný rozběhový systém. Tím může být například klecové vinutí. (21)

Synchronní motor s vinutím na rotoru je velmi účinný. Jeho nevýhodami jsou ale větší rozměry, vyšší hmotnost a poruchovost. (20)

Synchronní motor s permanentním magnetem má vysokou účinnost, která je v porovnání s asynchronním motorem dána tím, že není ze sítě odebírán elektrický proud pro magnety. Na rozdíl od synchronního motoru s vinutím také nevznikají ztráty v budícím vinutí ani v rotorové kleci jako tomu je u asynchronního motoru. (20)

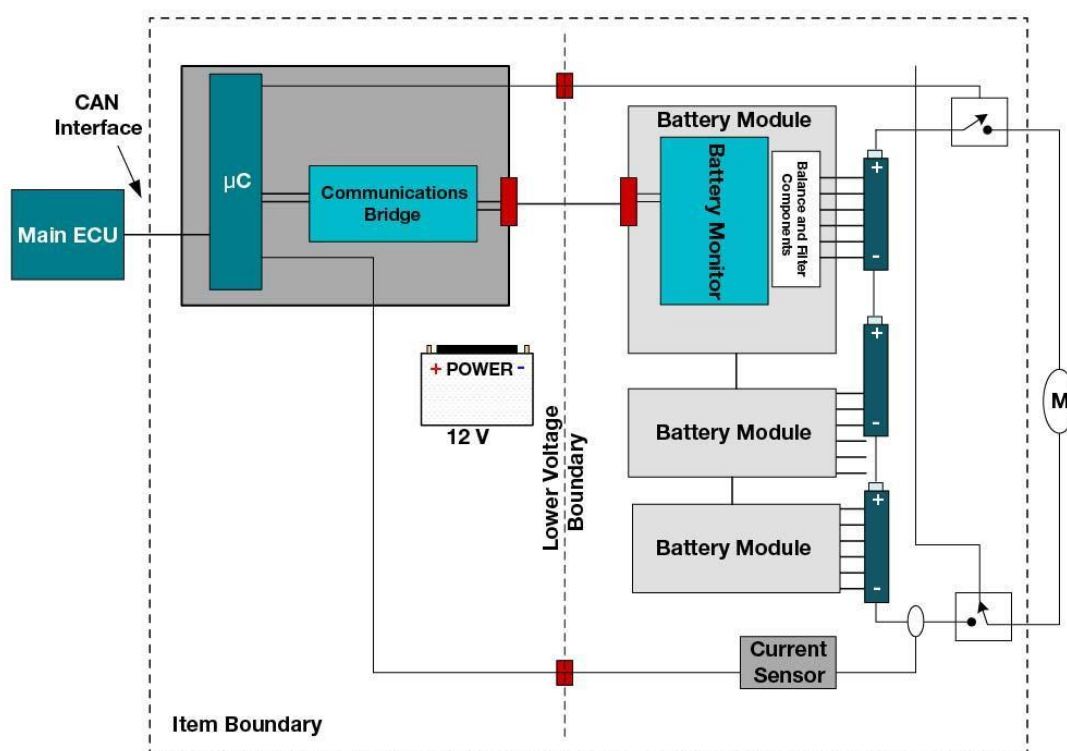
3.2 Baterie elektrobusů

Baterie ovlivňují jeden z nejdůležitějších parametrů elektrovozu, a tím je jeho dojezd. V první řadě je tedy u baterií často řešena právě jejich kapacita. Tu je cílem stále navyšovat. Pouhé navyšování množství akumulátorových jednotek je řešením, které naráží na omezení velikostí vozidla. Pozornost je tedy zaměřena na vývoj materiálu baterie. Cílem je vyvinout nové baterie, které budou o shodné kapacitě rozměrově menší než ty stávající, anebo baterie o shodných rozměrech s těmi dosavadními, ale o vyšší kapacitě. Typ baterie může kromě kapacity ovlivňovat také míru vlivů klimatických podmínek na baterii, nebo rychlost jejího nabíjení.

Obecné základní vlastnosti jakýchkoli baterií jsou jejich kapacita, vnitřní odpor a minimální a maximální napětí, které udávají hraniční hodnoty, za nimiž dochází k poškození baterie. Vnitřní odpor má vliv na výkon baterie, a to při nabíjení i vybíjení, a taktéž na její tepelné ztráty. S rostoucím odporem baterie klesá její výkon a rostou tepelné ztráty. Proto je u některých baterií využíváno její chlazení. V případě, kdy baterie nedisponuje chlazením, je potřeba snížení výkonu tak, aby nedošlo k jejímu poškození vlivem provozu za vysokých teplot. Při nízkých teplotách je naopak pro udržení baterie v přívětivé provozní teplotě využíván její ohřev. Je to z důvodu, že zvyšující se vnitřní odpor baterie při mrznoucích teplotách může vést až k nefunkčnosti baterie. U baterií elektrovozů je vnitřní odpor nejčastěji udáván v kilowattech. Kapacita představuje množství energie, kterou je možné uložit do baterie. Kapacita závisí na

množství článků v baterii a opět i na použitém materiálu. Je udávána v kilowatthodinách. Představuje tedy maximální výkon, který může baterie dodávat po 1 hodinu. (22)

Napájení elektrických vozidel kromě samotné baterie výrazně ovlivňuje správa baterie, tedy BMS (Battery Management System). Má vliv na účinnost, výkon i životnost baterie a vozidla celkově. BMS má na starosti monitoring všech akumulátorových článků, který obnáší měření jejich teploty, napětí a proudu. Díky sledování uvedených parametrů je možné baterii chránit a optimalizovat její funkci. U článků se vyhodnocují vybíjecí a nabíjecí křivky. Technicky je to provedené tak, že je ke každému akumulátorovému článku připojen modul s integrovaným obvodem a funkcemi pro správu baterie. Data jsou pak mezi vozidlovými systémy předávána přes kabely, nebo bezdrátově. (23)



Obrázek 4 - Systém správy baterie (23)

Obrázek 4 zobrazuje schéma běžného BMS. Systém správy baterie je složen z mikrokontroleru, integrovaných obvodů, baterie, modulů pro sledování stavu baterie a z izolací jednotlivých částí systému. Data jsou v tomto systému odesílána kabelovým vedením do dalších systémů, kde se zpracovávají. Červeně jsou v rámci schématu znázorněny kabelová rozhraní. (23)

3.2.1 Běžné typy trakčních baterií silničních vozidel

3.2.1.1 Olověná baterie

Olověný akumulátor je nejstarším typem baterie používaným v rámci automobilu. Disponuje vysokým výkonem, ale v porovnání s jinými bateriemi má vysokou hmotnost i rozměry a menší kapacitu. Jedná se o baterii s vysokou spolehlivostí a nízkou cenou. V rámci elektrifikovaných autobusů v MHD má olověná baterie využití především u hybridních vozidel. (24)

Snaha vylepšit vlastnosti olověné baterie se promítá ve vývoji jejích nových typů. Všechny typy olověných baterií jsou obvykle složeny kromě olova také z oxidu olovnatého a zředěné kyseliny sírové, která je zde elektrolytem. Zlepšování vlastností baterie může vypadat například tak, že se redukuje množství olova, a tím je zvyšována účinnost baterie. (25)

Jedním z typů olověných baterií je AGM baterie, která obsahuje elektrolyt absorbovaný ve tkanině ze skelných vláken. Baterie má vysokou životnost i odolnost. V době, kdy je baterie mimo provoz dochází jen k minimálnímu vybíjení. (25)

3.2.1.2 Nikl metal hydridová baterie

Nikl metal hydridová baterie, označovaná také NiMH, se hojně využívá u hybridních vozidel. Oproti lithium iontové baterii má nižší kapacitu. Vyvažuje to však nižší cenou a flexibilitou konstrukce. Je velmi odolná, trvanlivá, má vysoký výkon a velmi vysokou životnost. Nikl metal hydridová baterie je složena z hydroxidu niklu, ze slitiny absorbující vodík a elektrolytu tvořeném nejčastěji hydroxidem draselným. (25)

3.2.1.3 Sodík nikl chloridová baterie

Tímto typem baterie se osazují především nákladní vozidla a vozidla hromadné dopravy. Sodíkové baterie mají vysokou hustotu energie a dlouhou životnost. Jsou schopné provozu za široké škály teplot a to mezi -40 °C a $+60\text{ °C}$. Vnitřní provozní teplota sodík nikl chloridové baterie je mezi 250 a 350 °C . Tyto baterie jsou velmi dobře odizolované, aby nedocházelo k únikům tepla. Uplatnění našly v hybridních i elektrických vozidlech. Katoda této baterie je z niklu a jeho solí a anoda je složena z roztaveného sodíku. Elektrolyt je tvořen tetrachloraluminátem sodíku. (25)

3.2.1.4 Lithium iontová baterie

Lithium iontová baterie, nebo také Li-ion baterie, vyniká svým vysokým výkonem za současných menších rozměrů a nižší hmotnosti, než je například u olověné baterie. Ze všech zmiňovaných baterií má tato baterie nejvyšší hustotu energie. Průběh napětí je také

konstantnější než u olovené baterie, a nehrozí tak její přebití. Li-ion baterie má vyšší účinnost než olovená baterie, a to i při rekuperaci. Tyto baterie disponují dlouhou životností a neklesající výkonností během jejího životního cyklu. Všechny výše zmiňované výhody lithium iontových baterií oproti oloveným jsou vyvážené jejich vyšší cenou. Li-ion baterií se osazují jak hybridní vozidla, tak plně elektrická. (26)

Složení lithium iontové baterie má několik variant. Nejčastěji je však materiál její anody založen na uhlíku, či lithiovém titanátu a katoda je z lithiovaného oxidu kovu. Elektrolyt je složen z lithných solí rozpuštěných v uhličitanových sloučeninách. Výběr použitého lithiového kovu na katodu či anodu ovlivňuje výkonnostní charakteristiky baterie. (25)

Materiály, ze kterých může být katoda li-ion baterie jsou:

- a. LCO (lithium kobalt oxid). Taková baterie pro elektrobusy není vhodná, protože není dostatečně bezpečná a nedosahuje mnoha nabíjecích cyklů, jako třeba NMC baterie.
- b. LMO (lithium mangan oxid).
- c. LFP (lithium železo fosfát). Tento typ baterie je vhodný pro elektrobusy obsluhující menší města, kde jsou kratší trasy a vozidlo ujede okolo 100 km. Oproti NMC bateriím sice není tak výkonná, ale je levnější a dosahuje více cyklů.
- d. NMC (lithium nikl magnezium kobalt oxid). Tato baterie se plně nabíjí v řádu hodin, ale uchovává velké množství energie. U tzv. high energy elektrobusů, které se vyznačují často celodenním provozem a až následným nočním nabíjením, proto převládá.

Materiály, ze kterých může být anoda Li-ion baterie jsou:

- e. LTO (lithium titanát). Tento typ baterie má v porovnání s NMC bateriím menší rozměry. Má menší kapacitu, ale dostatečný výkon, a proto je ideální pro rychlé a časté nabíjení. To s sebou ale přináší potřebu vybudovat nákladnou nabíjecí infrastrukturu. Baterie má vysokou životnost po mnoho cyklů. Umožňuje plné nabití za několik minut, a je tedy vhodná i pro nonstop provoz s dobíjením na konečných stanicích.
- f. Uhlík v přírodní, nebo syntetické formě.

Budoucnost baterií vidí někteří výrobci v tzv. solid state bateriích, tedy bateriích s pevným elektrolytem. Kromě kapalného a pevného elektrolytu existuje varianta gelového elektrolytu označovaného jako Li-pol. Baterií s tímto elektrolytem disponuje například Škoda Perun HE. (25) (27)

Elektrovozy se stejně jako vozidla na fosilní paliva neobejdou bez palubní baterie pro pohon pomocných agregátů. Trakční baterie u elektromobilů a elektrobusů tedy dodává proud na jízdu a popřípadě i vytápění vozidla a palubní baterie pohání centrální zamykání, infotainment, či osvětlení. Důvodem, proč mají i elektrovozy separátní baterii pro napájení pomocných agregátů je, že při odstavení vozidla je trakční baterie vyřazena z elektrického obvodu. Nejobvyklejší kapacity palubních baterií jsou 12 a 24 Voltů. Baterie s kapacitou 12 V je využívána v osobních vozidlech a některých elektrobusích. Baterie s kapacitou 24 Voltů se využívá především u nákladních vozidel a autobusů. V některých případech se používá i u elektrobusů. Motivací pro osazení elektrobusu palubní baterií s napětím 12 V, je rozšíření tohoto napětí v oblasti komponentů, které baterie napájí. Obě tyto varianty palubních baterií se hodí pro různé podmínky. I při volbě typu palubní baterie je třeba řešit cílové provozní podmínky vozidla. Například lithium iontová baterie je odolnější než olověná vůči mrazu. Některé elektromobily proto mají palubní baterii právě lithium iontovou. Jiné elektromobily, pro udržení této baterie nabitě, zajišťují její pravidelné dobíjení z trakční baterie. (28) (29)

3.2.2 Budoucnost baterií a jejich recyklace

Ekologie vozidla není dána pouze jeho provozem, ale je třeba zvážit dopady na životní prostředí i při jeho výrobě, nebo po uplynutí jeho životnosti. U vozidel s elektrickým pohonem je v tomto ohledu neproblematičtější částí právě jeho trakční baterie.

První problém nastává již při výrobě. Na tu je potřeba získat kovy jako je například kobalt, nebo lithium. Kobalt se získává především z Konga, kde je jeho těžba, spojená s porušováním lidských práv a dětskou prací, velmi problematická. U lithia, které je těženo převážně v Austrálii, je problematický dopad jeho produkce na životní prostředí. Navíc je při jeho těžbě spotřebováno velké množství vody. Řešením, jak se vyvarovat těmto negativním vlivům, je nahrazování kobaltu sírou a lithium sodíkem. Časté je taky využívání lithia s vyšší účinností a menším množstvím. (30)

Další problém nastává po uplynutí životnosti baterie. V první řadě je snaha o jejich využití v méně náročných systémech, než je vozidlo. Vysloužilé baterie z vozidla se často používají jako bateriové úložiště energie pro domy. Další možností je recyklace zásadních prvků jako je lithium, mangan, nebo kobalt a jejich použití do nových baterií, které mohou mít i lepší trvanlivost. (30)

4 Přehled provozovaných městských elektrobusů

4.1 Elektrobusy v zahraničí a ve vybraných metropolích

Jelikož má doprava svůj nemalý podíl na znečištění ovzduší, stále zvyšující se ekologické požadavky se promítají i do tohoto odvětví. Kromě čistějšího ovzduší je ve městech žádoucí i snížení hlukového smogu. S těmito požadavky jde ruku v ruce elektrifikace městské hromadné dopravy.

K největším lídrům v oblasti elektromobility v MHD patří Čína. K polovině roku 2021 měla v provozu přes 500 tisíc elektrických autobusů. V tu dobu měla Čína 98 % všech elektrobusů na světě. Nicméně ne všechna elektrina využívaná pro provoz elektrobusů byla vyrobena z obnovitelných zdrojů. (31)

V Severní Americe patří k zemím s nejvyššími cíli ohledně elektrobusů Kalifornie, která přijala pravidlo ICTR (Innovative Clean Transit Rule). ICTR představuje pravidlo, že od roku 2023 musí být alespoň 25 % nově zakoupených autobusů bezemisních a od roku 2029 se má pravidlo týkat 100 % zakoupených autobusů. (32)

V Jižní Americe se první zemí využívající elektrobusy v MHD stala Chile. Cíle jejího hlavního města Santiaga jsou kompletní nahrazení flotily městských autobusů těmi elektrickými do roku 2040. K červnu 2020 měla Chile v provozu 455 elektrobusů. Nezaostávají ani další země Jižní Ameriky. Postupné nahrazování dosavadního vozového parku elektrobusy pomalu nastává také v dalších městech Latinské Ameriky jako například v Mexiko City, Sao Paulu, nebo v Medellínu. (32) (33)

Na území Evropy podporuje elektromobilitu v MHD Evropská unie. Ta v únoru 2019 přijala novou politiku nákupu autobusů, která obsahuje požadavek, že alespoň 25 % nově nakoupených autobusů ze strany orgánů veřejné moci do roku 2025 bude pohánět čistá energie. Do roku 2030 pak bude poměr zvýšen na třetinu. Některé evropské metropole jako Londýn, Paříž, Řím, Milán, Barcelona, nebo Rotterdam si dali ještě vyšší cíle a podepsali deklaraci C40. Zavazují se tím, že do roku 2025 budou mít plně bezemisní autobusovou flotilu. Z evropských zemí je Nizozemsko v elektrifikaci MHD asi nejdále. Mezi další evropské tahouny patří Švédsko, Francie, Španělsko, Rakousko, či Německo. (32)

4.1.1 Hamburk, Německo

Už koncem listopadu 2021 bylo v Hamburku v provozu 100 elektrobuseů. To ale není zdaleka konečný stav. Dopravní podnik plánuje nahradit zbývajících 1100 diesellových autobusů těmi bezemisními do roku 2030. Mezi nově pořizovanými autobusy jsou jak elektrobusey, tak autobusy na vodíkový pohon. Dopravní podnik k takovému kroku vede i odhad snížení emisí oxidu uhličitého o 65 tun ročně. Ekologické cíle dopravního podniku se netýkají pouze provozu vozidel. Vysoké nároky jsou kladeny také na výrobce baterií, kteří mají za úkol vyrobit baterii co nejšetrněji. (34)

V roce 2019 bylo uvedeno do provozu depo Alsterdorf, které je prvním německým autobusovým depem navrženým přímo pro bezemisní autobusy. Nicméně nyní, v přechodné fázi, je využíváno i diesellovými autobusy. Alsterdorf by měl být v následujícím období vybaven až 96 nabíjecími stanicemi. V Hamburku je ve výstavbě další depo s názvem Meiendorf, které bude výhradně pro bezemisní autobusy a celé bude poháněno zelenou energií. (35)

4.1.1.1 Modely elektrobuseů v Hamburku

Současné složení elektrobuseů v Hamburku je sestaveno z následujících modelů: (36)

- a. Elektrobuse Rampini E120 obsahuje 71–73 míst pro cestující. Má motor Siemens typu 1DB2016 na principu permanentních magnetů o výkonu 160 kW. Baterie je z lithiumpferitových článků. Toto vozidlo bývá osazováno buď baterií o kapacitě 180 nebo 240 kWh. (37)



Obrázek 5 - Elektrobusey Rampini E80 a E120 (74)

- b. Elektrický midibus Rampini E80, který je dlouhý 8 metrů a disponuje 48 místy pro cestující. Baterie je složena z feritových lithiových článků a její kapacita je 200 kWh. Motor je třífázový asynchronní od společnosti Siemens a jedná se o typ 1PV5138 s výkonem 122 kW. (38)
- c. Třídveřový elektrobus Mercedes eCitaro má v základní výbavě soustavu 6 baterií NMC. Celková kapacita trakční baterie je 198 kWh. Tento elektrobus je osazen nápravami ZF AVE 130 a asynchronními vodou chlazenými motory u každého kola. Motory mají maximální výkon 250 kW. Jeho nominální výkon je 125 kW. Kapacita eCitaro je 82 osob. (39) (40)



Obrázek 6 - Elektrobus eCitaro (40)

- d. Třídveřový kloubový elektrobus eCitaro G má v základní výbavě na výběr ze soustavy 10 baterií NMC s kapacitou 330 kWh a ze soustavy 6 solid state baterií, tedy baterií s pevným elektrolytem, o kapacitě 378 kWh. Tento elektrobus je shodně jako eCitaro osazen nápravami ZF AVE 130 i asynchronními vodou chlazenými motory u každého kola. I maximální výkon 250 kW je u modelu eCitaro G shodný jako u modelu eCitaro. Jeho nominální výkon je 125 kW. Kapacita tohoto elektrobusu je 146 osob. (40)



Obrázek 7 - Elektrobus eCitaro G (40)

- e. Elektrobuses MAN Lion's City 12 E má soustavu 6 baterií NMC o kapacitě 480 kWh. Autobus je osazen elektromotorem o maximálním výkonu 240 kW a nominálním výkonu 160 kW. Kapacita elektrobuse je 74 osob. (41)



Obrázek 8 - Elektrobuses MAN Lion's City 12 E (41)

4.1.2 Londýn, Velká Británie

Londýnská autobusová flotila v současné době splňuje při nejmenším emisní standard Euro VI. Od roku 2017, kdy byla zahájena obměna londýnských městských autobusů, poklesla jejich produkce emisí oxidů dusíku o zhruba 90 %. Cílem primátora této metropole je plně bezemisní autobusová doprava a tím i úplná dekarbonizace do roku 2030. K březnu 2021 Londýn disponoval celkem 9102 městskými autobusy, z nichž je 3884 hybridních a 485 čistě elektrických. Autobusy jsou na jednotlivé linky rozmístěny právě podle jejich ekologičnosti. Londýn je rozdělen na 12 nízkoemisních zón a do těch v nejvíce znečištěných oblastech jsou nasazeny nejčistší autobusy. (42) (43)

4.1.2.1 Vybrané modely elektrobuses v Londýně

V Londýně jsou provozovány elektrobuses od mnoha společností, mezi které patří například Alexander Dennis, Optare, Scania, VDL Bus & Coach, Volvo nebo Wrightbus. Níže si proto představíme jen některé z nich. (44)

Prvním zástupcem londýnských elektrobuses je zde dvoupatrový Enviro400 EV. Tento vůz vznikl s přičiněním dvou společností, technologie a baterie byla řešena čínskou společností BYD a karoserie a interiér britskou společností Alexander Dennis. Enviro400 EV disponuje dvěma motory integrovanými do náprav o výkonu po 150 kW a lithium železo fosfátovou baterií o

kapacitě 382 kWh. Nabíjení vozidla je možné dvěma způsoby, skrze dvě 40 kW AC zástrčky, nebo 112 kW DC nabíjením skrze střešní lišty. Kapacita vozidla je 72 osob. (45)



Obrázek 9 – BYD ADB Enviro400EV (45)

Jednopatrovou verzí předchozího vozidla je Enviro200 EV. Elektrobus je opět produktem spolupráce společností BYD a Alexander Dennis. Enviro200 EV má dva motory, integrované do náprav, každý o výkonu 90 kW. Baterii má lithium železo fosfátovou s kapacitou 348 kWh. Stejně jako u Enviro400 EV jsou i zde dvě možnosti nabíjení. První je pomocí dvou 40 kW AC zástrček, druhá pak samostatnou zástrčkou o 102 kW DC. Jeho kapacita je 80 osob. (46)



Obrázek 10 - BYD ADB Enviro200EV (46)

Dalším dvoupodlažním modelem je MetroDecker EV od společnosti Optare. Tento elektrobus je poháněn 250 kW motorem integrovaným na nápravě ZF AVE 130. Nabíjení je možné skrze 44 kW s třífázovým střídavým napětím, nebo rychlejší variantou pomocí 100 kW stejnosměrného napětí. Kapacita tohoto vozidla je 98 osob. (47)



Obrázek 11 - Elektrobus MetroDecker EV (47)

4.1.3 Shenzhen, Čína

Čínský Shenzhen byl již počátkem roku 2021 městem s plně elektrifikovanou flotilou městských autobusů. Shenzhen se tak stal prvním světovým městem, které kompletně nahradilo dieselové autobusy elektrobusey. Těch je ve městě provozovaných okolo 16000 kusů. Tento úctyhodný počet autobusů s elektrickým pohonem je dán i skutečností, že v tomto městě sídlí jeden z největších světových výrobců elektrických vozidel BYD. Kromě zřejmých výhod, jakými jsou snížení hluku či vypouštění škodlivin, došlo i k úspoře financí za provoz. Jedna ze tří autobusových společností působících ve městě odhaduje úsporu za roční provoz elektrobuseu oproti dieselovému autobusu zhruba na 14 tisíc amerických dolarů. Nicméně počáteční náklady u elektrobuseu se uvádějí průměrně jako dvakrát až čtyřikrát vyšší. Vysoké náklady jsou také na přebudování elektrické sítě tak, aby vyhovovala požadavkům na nabíjení vozidel a také na samotné nabíjecí stanice, kterých je v tomto dvanáctimilionovém městě okolo 1800. (48) (49)

4.1.3.1 Vybrané modely elektrobuseů v Shenzhenu

V Shenzhenu jsou provozovány autobusy od třech společností: BYD ze 79,1 %, Nanjing Golden Dragon ze 17 % a Wuzhoulong ze 3,9 %. Od společnosti BYD v Shenzhenu převládají 2 typy vozidel, kterými jsou K8 a K9. (50)

Model K8 je v Shenzhenu vůči ostatním elektrobuseům zastoupen nejčetněji. Autobus je poháněn synchronním motorem o maximálním výkonu 300 kW. K8 je vybaven lithium železo fosfátovou baterií od BYD o kapacitě 324 kWh. Nabíjení je možné skrze dvě zástrčky 40 kW. Kapacita vozidla je 61 osob. (50) (51)



Obrázek 12- Elektrobuses BYD K8 (51)

Stejně jako u předchozího modelu je i K9 poháněn synchronním motorem o maximálním výkonu 300 kW. Disponuje lithií železo fosfátovou baterií od BYD o kapacitě 324 kWh. I nabíjení je totožné s modelem K8, tedy skrze dvě zástrčky po 40 kW. Kapacita modelu K9 je 80 osob. (52)



Obrázek 13 - Elektrobuses BYD K9 (52)

4.2 Elektrobuses v České republice

Trend elektromobility v MHD je pro Českou republiku nastíněn Konceptí veřejné dopravy 2020-2025, která je ovlivněna trhem i koncepty danými unijními orgány. Dále je směr České republiky v této oblasti popsán v Národním akčním plánu čisté mobility.

4.2.1 Hradec Králové

Dopravní podnik města Hradce Králové disponuje elektrobuses již od roku 2013, kdy měl pronajatý vůz SOR EBN 9,5. Do roku 2015 byly pořízeny další dva elektrobuses, Škoda Perun

26 BB HE a SOR EBN 11. Ve větším počtu se DPMHK vybavil v roce 2018, kdy mu bylo společností SOR Libchavy dodáno 20 elektrobusů SOR NS 12 electric.

Původní plán nasazení elektrobusů na linky musel být přehodnocen, v závislosti na možnostech dobíjení baterií vozidel. Průměrný dojezd vozidel je 150–180 km, a pro některé linky to znamená potřebu průběžného nabíjení. Nabíjecí stanice, které byly původně umístěné jen v garážích, již nebyly dostačující. V přechodném období a na specifických linkách byl problém řešen dělenými směnami autobusů. Později byl problém nabíjení vyřešen výstavbou měnárny na Slezském předměstí. Vozidla některých problémových linek tedy zvládají jejich celodenní obsluhu. (53)

4.2.1.1 Vybrané modely elektrobusů v Hradci Králové

Elektrobusy SOR EBN 9,5 i SOR EBN 11 jsou shodně poháněny asynchronním motorem o výkonu 120 kW. Oba modely disponují lithium iontovou baterií o kapacitě 172 kWh od společnosti Winston Battery. Menší z této dvojice elektrobusů, SOR EBN 9,5, je dvoudveřový



Obrázek 14 - SOR EBN 9,5 (75)

model. Kapacitnější SOR EBN 11 je třídvěřový. U většího a novějšího modelu SOR EBN 11 má kromě standardního palubního nabíjení i možnost rychlonabíjení skrze pantograf, který se připojuje na trakční trolejbusovou síť. (54) (55)



Obrázek 16 - SOR EBN 11 (55)

Prvním z vyjmenovaných je Škoda Perun HE z výroby Škoda Electric. Tento model disponuje asynchronním motorem vlastní výroby o nominálním výkonu 160 kW. Elektrobus je osazen lithium polymerovými bateriemi o kapacitě 222 kWh. Dobíjení je ve dvou variantách, noční šesti až osmi hodinové nabíjení, nebo rychlonabíjení trvající 70 minut. Kapacita vozidla je 82 osob. (56)



Obrázek 15 - Škoda HE (56)

SOR NS 12 electric je osazen asynchronním motorem od výrobce Pragoimex. Typově jde o motor TAM 1053 C6V o maximálním výkonu 160 kW. Jeho baterie je typu NMC o kapacitě 242 kWh. Jedná se o nízkopodlažní autobus, který umožňuje variabilní uspořádání sedadel. I proto má široké možnosti využití. Například snížením počtu míst k sezení ho lze upravit na cyklobus, což může vést k využitelnosti autobusu na lince vyvážející cestující do hor. Pro centrum města může být vhodná konfigurace, která bude zahrnovat více míst vyhrazených pro kočárky. Konfiguraci autobusu tohoto typu patřící DPMHK znázorňuje obrázek 17. (57)



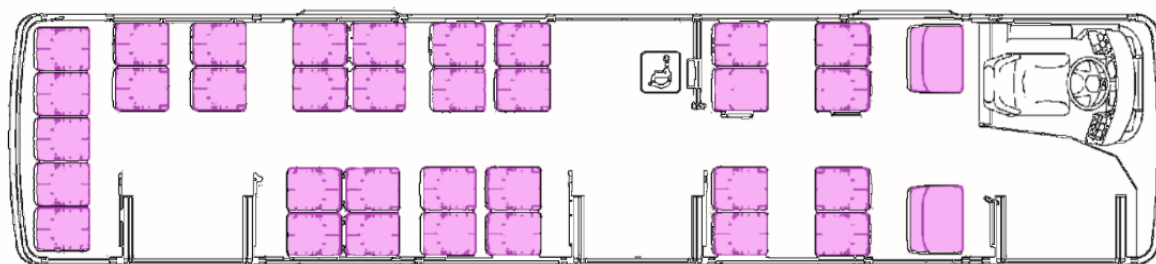
Obrázek 17 - Elektrobus SOR NS 12 electric (57)

Autobus obsahuje 35 míst k sezení a 65 míst k stání. Schéma vnitřního uspořádání vozidla zobrazuje obrázek 18. Další technické parametry vozidla zobrazuje tabulka 1. (53)

Tabulka 1 - Technické parametry vozidla SOR NS 12 electric (57)

Rozměry	Délka 12,00 m Šířka 2,55 m Výška 3,20 m
Počet dveří	3
Maximální hmotnost	20 000 kg
Konstrukční rychlost	80 km/h
Motor	Asynchronní, vodou chlazený Výrobce PRAGOIMEX a.s. Výkon 160 kW
Přední náprava	Nezávislá, RL82 EC Výrobce ZF Friedrichshafen AG
Zadní náprava	Portálová, AV133 Výrobce ZF Friedrichshafen AG
Výrobce brzd	Knorr
Výrobce řídicí jednotky	Wabco
Výrobce řízení	Bosch
Výrobce elektroniky	RAIL ELECTRONICS CZ s.r.o.
Trakční akumulátory	Typ NMC Napětí 600 V Kapacita 242 kWh

Akumulátory pro pohon pomocných agregátů	Kapacita 225 Ah Výrobce Varta
--	----------------------------------



Obrázek 18 - konfigurace interiéru elektrobuse SOR NS 12 electric (1)

4.2.2 Praha

První autobusy s elektrickým pohonem, uvedené do provozu na území Prahy, obsluhují kyvadlovou linku mezi stanicí metra Bořislavka a BB centrem. Je tomu tak již od února 2016. Na této lince jezdí dvě vozidla, a od začátku svého provozu zde najela k září 2021 přes 200 tisíc kilometrů. Jedná se o vozidla SOR EBN 9,5. Elektrobusey zde měly otestovat životnost baterií i přijetí cestujícími. V obou aspektech se vozidla osvědčila. Baterie s odhadovanou životností na 5 let si udržela své vlastnosti i po uplynutí této doby bez zásadních známek opotřebení. (58) (59)

V první polovině ledna 2022 byl testován první elektrobuse z nově plánované čtrnáctičlenné flotily. Od 17. ledna je v ostrém provozu na linkách číslo 124, 154 a 213. Zbýlých 13 elektrobuseů je plánováno dodat pražskému dopravnímu podniku začátkem téhož roku. DPP se rozhodl pro vozidlo Škoda 36BB, obchodním názvem Škoda E'City. Specifikum vozidla Škoda E'City je především dvoupólové dobíjení a galvanicky izolovaný nabíječ na voze. Dobíjecí stanice pro vozidlo se nachází ve vršovické garáži. Další způsob dobíjení využívá již stávající infrastruktury. Probíhá na konečných stanicích skrze pantograf z tramvajové trakční sítě o 600 V stejnosměrného proudu. Konkrétně se jedná o zastávky Strašnická a Želivského. Pantograf obsahuje kameru, aby bylo možné kontrolovat jeho správnou polohu. Výkon motoru elektrobuse Škoda E'City je 160 kW. Kapacita vozidla je 69 osob. (60) (61)



Obrázek 19 - Elektrobuses Škoda E'City (76)

4.2.3 Trutnov

Od února roku 2019 se trutnovská MHD může pyšnit vozovým parkem, kde jsou všechna vozidla na alternativní pohon. Vozový park je tvořen čtyřmi elektrobuses Škoda 26BB, neboli Škoda Perun, který je popsán v kapitole 4.2.1.1, a třemi autobusy na zemní plyn. Elektrobuses byly na Trutnovsko vybírány s ohledem na místní členitý terén. (62)

4.2.4 Písek

Všechna vozidla písecké MHD jezdí od konce roku 2020 na čistou energii. Písek vlastní pět elektrobusesů a dva autobusy s pohonem na zemní plyn. Jeden z elektrobusesů je typ SOR EBN 8, další čtyři jsou SOR EBN 11,1. V Písku spolu s obměnou vozového parku přišly i změny ve vedení linek, takže elektrizace MHD je součástí celkové modernizace a konceptu Smart Písek. (63)



Obrázek 20 - Elektrobuses SOR EBN 8 (77)

4.2.4.1 *Modely elektrobuseů v Písku*

Oba modely elektrobuseů SOR EBN 8 i SOR EBN 11,1 mají asynchronní motor od společnosti Pragoimex o výkonu 120 kW. Shodně mají i napájení lithiem iontovými bateriemi o kapacitě 172 kWh od společnosti Winston Battery. Rozdíl je ale ve velikosti vozidel, a tedy i jejich kapacitě. Kapacita SOR EBN 8, menšího z této dvojice, je 51 osob. SOR EBN 11,1 pojme 86 cestujících. (54) (63)

4.2.5 Ostrava

Dosud je v Ostravě provozováno sedm elektrobuseů, z toho tři vozidla Ekova Electron 12 a čtyři vozidla SOR EBN 10,5. Na jaře roku 2022 by flotilu elektrobuseů mělo doplnit 24 vozidel od společnosti Solaris Bus & Coach. Tato vozidla budou během jejich provozu průběžně dobíjena na smyčkách, což prodlouží jejich dojezd až na 400 kilometrů. Například desetiminutové nabití prodlouží dojezd autobusu zhruba o 30 km, a takovéto nabití je možné provádět až dvanáctkrát za den. Další nabíjení bude možné i na dvou nových nabíjecích stanicích v areálu garáží na Hranečnicku, jež disponují každá dvěma rameny. (64)

4.2.5.1 *Modely elektrobuseů v Ostravě*

Elektrický autobus Ekova Electron 12 je vybaven centrálním synchronním motorem o výkonu 155 kW. Pět sad baterií umístěných ve vozidle dává dohromady kapacitu 189 kWh. Vedle standardního nabíjení novější verze vozidla nabízí i možnost rychlonabíjení. Kapacita vozidla je 87 osob. (65)



Obrázek 21 - Elektrobusek Ekova Electron 12 (78)

Model elektrobuseu SOR EBN 10,5 je v Ostravě ve třídveřové verzi. Pohání ho motor o výkonu 120 kW od Pragoimex. Vozidlo disponuje lithiium iontovou baterií Winston Battery o kapacitě 172 kWh. Elektrobuse má kapacitu 85 osob. (66)



Obrázek 22 - Elektrobuse SOR EBN 10,5 (66)

Kromě výše zmíněných měst své uplatnění našly elektrobusey i v Bílině, Českých Budějovicích, Frýdku-Místku, Havířově, Karviné, Kladně, Olomouci, Pardubicích, či Třinci.

5 Návrh testování vhodnosti pohonu elektrobusu pro zvolenou lokalitu

Cílem praktické části této práce je návrh hodnocení vhodnosti provozu elektrobusu ve zvolené lokalitě. Tou je v tomto případě část města Hradce Králové, konkrétně se jedná o linku 13. Vhodnost vozidla pro konkrétní lokalitu se odvíjí jak od specifík prostředí, tak od vlastností vozidla.

Jednotlivé autobusové linky se mohou lišit v délce trati, která přímo ovlivňuje požadavky na kapacitu baterie vozidla. Nezáleží pouze na délce samotné trati, ale i na počtu cyklů, po které vozidlo linku obsluhuje, či na vzdálenosti trati od depa. S tím souvisí vytíženost linky a počet vozidel obsluhujících linku. Množství spotřebované energie a požadavky na výkon vozidla jsou dány také výškovým profilem trati. Kromě potřeby většího množství energie pro výraznější stoupání lze počítat i s případnou rekuperovanou energií, která se ukládá do baterie během klesání. Spotřeba energie vozidla může být dána i dle typu komunikací, po kterých jsou linky vedeny, nebo prostředím, kterým linka prochází – zda je vedena centrem města, jeho okrajovou částí města, nebo zda se jedná o meziměstskou autobusovou linku. Rozhodující faktory můžeme hledat také na straně vozidla. Rozdíl je v kapacitách trakčních baterií, ve výkonech vozidel, nebo například ve způsobech nabíjení baterie. Existují tři základní způsoby nabíjení elektrobusu – na zastávkách, na konečných stanicích a v depu. Použití jednotlivých způsobů nabíjení se odvíjí od konkrétních podmínek prostředí. Negativní specifika trati lze díky vhodnému nabíjení i kompenzovat. Kromě již vyjmenovaných základních způsobů nabíjení lze využít i troleje. Pokud se například jedná o městskou trať s výrazným stoupáním, je možné takovýto úsek vybavit právě trolejemi, které budou během zdolávání převýšení do vozidla dodávat potřebnou energii.

Posouzení vhodnosti vozidel pro vybranou lokalitu je v rámci této práce provedeno na základě zhodnocení vybrané lokality, parametrů vozidel dle dat od výrobce a vybraných parametrů vozidel naměřených v rámci testovacích jízd. Naměřené parametry byly vybrány na základě spolehlivosti jejich záznamů a na základě jejich charakteru.

V návaznosti na porovnání jsou specifikovány požadavky na vozidlo pro provoz na dané autobusové lince a posouzení, jaké z testovaných vozidel je pro danou lokalitu vhodnější.

Data, která byla zpracována v praktické části, byla naměřena v rámci projektu eUltimate. Tento projekt se zabývá elektrifikací hromadné dopravy s cílem snížit negativní vlivy dopravy na

klima. Jedná se o projekt Evropského inovačního a technologického institutu (EIT, European Institute of Innovation and Technology) pro městskou mobilitu, který sdružuje města a univerzity, včetně Českého vysokého učení technického, fakulty dopravní. Vzhledem k tomu, že neexistuje univerzální vhodné řešení pro všechna města, je v rámci projektu vyvíjen podpůrný rozhodovací systém. Ten má navrhnout optimální model autobusu s vhodnými parametry pro danou lokalitu a nabíjecí systém pro dané město. Dále má odhadnout dopady čerpání elektrické energie potřebné pro provoz elektrobuse. (67)

5.1 Porovnání vozidel na základě parametrů udávaných výrobcem

V praktické části této práce jsou porovnávány jízdní parametry dvou vozidel SOR NS 12 electric. Prvním z nich je vozidlo sériové výroby, které je součástí flotily vozidel MHD Hradce Králové. Druhým z nich je prototyp, u kterého se jedná o stejný model vozidla jako v prvním případě, avšak osazený jiným pohonným systémem. Pro zjednodušení budou elektrobusey v rámci práce nazývány podle jejich identifikačních čísel. Vozidlo sériové výroby má číslo 030, prototyp 046.

Výsledky tohoto porovnání budou podkladem pro zhodnocení, jaký z těchto dvou typů vozidla je vhodnější pro podmínky, ve kterých byla vozidla testována. V následujících odstavcích jsou vozidla hodnocena na základě jejich základních parametrů udávaných výrobcem.

Společná je po oba typy vozidel jejich konstrukce. Karoserie vozidla SOR NS 12 electric je 12 metrů dlouhá a 2,55 metrů široká. Vozidlo je vysoké 3,2 metry a rozvor náprav je 5,9 metrů. Vozidlo je třídvéřové a nízkopodlažní. Maximálně technicky přípustná hmotnost je 20 tun. Konstrukční rychlost vozidla je 80 km/h. (57)

V následujících odstavcích je pak řešen převážně pohonný systém a trakční baterie vozidla, které představují zásadní rozdíl mezi oběma vozidly.

5.1.1 Vozidlo SOR NS 12 electric 030

Vozidlo SOR NS 12 electric sériové výroby je osazeno motorem označovaným jako TAM 1053 C6V od společnosti Pragoimex. Jedná se o trakční asynchronní motor o výkonu 160 kW s kapalinovým chlazením. Baterie u tohoto modelu elektrobuse sériové výroby má kapacitu 242 kWh. (57)

5.1.2 Vozidlo SOR NS 12 electric 046

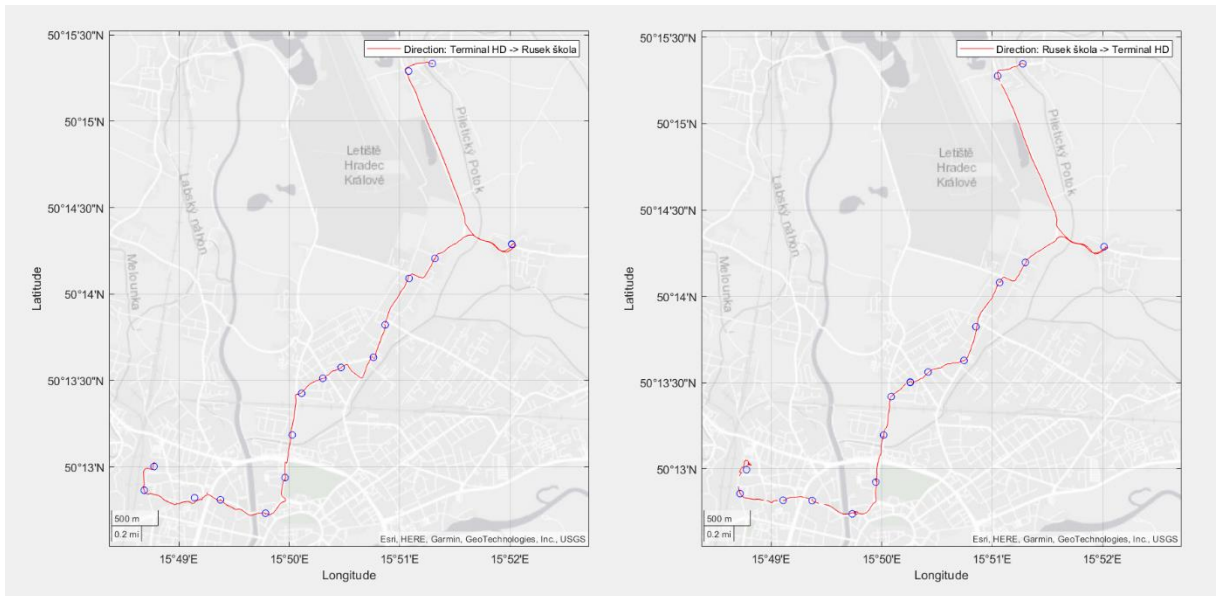
Vozidlo SOR NS 12 electric 046 disponuje komplexním pohonným systémem ZF CeTrax, který lze využít nejen v elektrobusech. Elektromotor pochází od společnosti Friedrichshafen, a je napojen na nápravu AxTrax. Asynchronní motor, jenž je součástí systému ZF CeTrax, disponuje výkonem 175 kW. Kromě prototypu SOR NS 12 electric 046 je tímto pohonem osazen také například elektrobuses Solaris Urbino 15 LE electric. Výhodou tohoto systému je možnost jeho dodatečné instalace i do vozidel s původně konvenčními pohony. Prototyp disponuje NMC trakční baterií o kapacitě 388 kWh. (68) (69)

Rozdíl mezi výkonem motorů obou vozidel je 15 kW s tím, že vyšší výkon má prototyp. Prototyp má také vyšší kapacitu trakční baterie, a to o 146 kWh.

5.2 Porovnání vozidel pomocí provozních dat

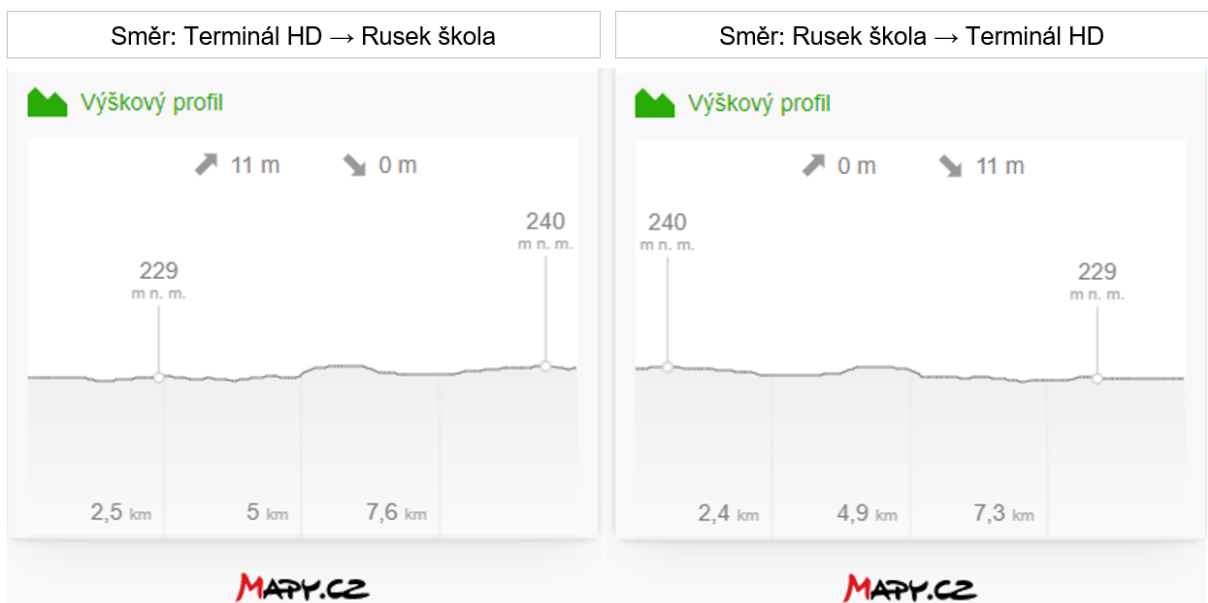
Měření probíhalo tak, že vozidlo SOR NS 12 electric 030 standardně obsluhovalo královehradeckou městskou autobusovou linku číslo 13 a prototyp, tedy vozidlo SOR NS 12 electric 046, ho následoval. Během jízd vozidel byly palubními diagnostickými zařízeními zaznamenávány jízdní parametry vozidel. Pro zvýšení relevantnosti porovnání vozidel byl prototyp naložen zátěží simulující váhu cestujících. Zátěž činila 2375 kg. První jízda v rámci měření byla zahájena 30.6.2021 v 6:31 hodin a vedla z Terminálu HD ve směru Rusek a zpět. Po třech cyklech (tři jízdy na konečnou a zpět) byla baterie vozidla SOR NS 12 electric 030 dobita. Měření dále pokračovalo od 10:27 do 13:27. Vozidlo SOR NS 12 electric 046 během testování nebylo dobíjeno.

Test probíhal na autobusové lince číslo 13 městské hromadné dopravy Hradce Králové. Trasa této linky čítá 17 zastávek. V prvním směru začíná linka číslo 13 na zastávce *Terminál HD*, která se nachází na území městské části Pražské Předměstí. Dále linka vede centrem města přes zastávky *Hlavní nádraží*, *OD Tesco a Atrium*, *Centrál*, *Muzeum*, *Kongresové centrum Aldis*, *Akademika Bedrny*, *Jana Černého*, *Spořilovská*, *Věkoše – Slávie*, *Pouchov Sokolovna*, *Pouchov kostel*, *U Lupínků*, *Rusecká*, *Piletice a Rusek – Jednota*. Konečná zastávka této linky s názvem *Rusek škola* se, jak již název napovídá, nachází v okrajové městské části Ruseku. Polohy zastávek pro oba směry linky lze vidět na Obrázek 24, kde jsou zobrazené záznamy dvou jízd vozidla číslo 030. Vlevo je zobrazena jízda ve směru Terminálu HD do zastávky *Rusek škola*. Vpravo je pak zobrazen opačný směr.



Obrázek 24 – Poloha zastávek zobrazená na jízdě vozidla číslo 030 v obou směrech linky

Linka číslo 13 je ve směru ze zastávky Terminál HD dlouhá 10,1 km a ve směru ze zastávky Rusek škola 9,8 km. Převýšení na trase činí pouze 6 výškových metrů (viz Obrázek 23).



Obrázek 23 - Výškový profil linky č. 13 (80)

5.3 Hodnocení vybraných měřených parametrů vozidel

V této části práce budou vozidla porovnávána podle jejich parametrů zaznamenaných během jízd autobusů palubními záznamovými zařízeními. Data byla pro potřebu této práce poskytnuta ve formátu dvou sešitů tabulkového procesoru Excel. Každý ze souborů obsahoval záznamy jízd jednoho z vozidel. Oba soubory měly odlišný počet záznamů i sledovaných parametrů. Přesto se většina měřených parametrů shodovala. Data byla dále zpracovávána v programu Matlab. Nejprve byla data se záznamy jízd do programu načtena.

U vozidla číslo 030 bylo v rámci měření zaznamenáno 94 parametrů. U vozidla číslo 046 se jednalo o 96 parametrů. Naměřené parametry pro hodnocení vozidel byly vybrány podle jejich charakteru i celistvosti jejich záznamů. Parametry vozidel, které byly využity pro porovnání jsou uvedeny v Tabulka 2. Seznam všech zaznamenaných parametrů je pak obsažen v příloze č. 1.

Tabulka 2 - Parametry použité pro hodnocení vozidel

Název parametru	Co parametr představuje
Consumption_last5kmAvg_	Spotřeba elektrické energie
BatteryStateOfCharge	Úroveň nabití baterie
CurrentEnginePower	Okamžitý výkon

Jak již bylo řečeno, kromě podmínky celistvosti dat byly parametry pro porovnání vybírány také dle jejich významu. Parametr spotřeby elektrické energie byl zvolen z důvodu porovnání energetického hospodaření vozidel a celkové ekonomické stránky jejich provozu. Parametr úrovně nabíjení baterie vychází především z její kapacity. Tento parametr nám umožňuje pohled na aktuální stav nabití baterie ve vybrané fázi jízdy i na celkovou změnu nabití baterie například za jednu jízdu. Parametr okamžitého výkonu nám může sloužit jako ukazatel výkonu ve vybraný okamžik měření, nebo jako sledování průběhu výkonu během jízd.

Měřicí zařízení využitá u vozidla SOR NS 12 electric 046 nedisponovala vlastním GPS přijímačem, a proto v jeho souboru chyběla oproti záznamu jízdy druhého vozidla data o poloze, skrývající se pod parametry Latitude a Longitude. Ta byla doplněna ze záznamů vozidla SOR NS 12 electric 030 synchronizací dat přes parametr RealTime, značící aktuální čas v rámci měření.

Dalším krokem bylo rozdělení dat dle jednotlivých jízd vozidel. Původně zamýšlená varianta rozdělení záznamů se zakládala na předpokladu, že pokud vozidlo nebude v pohybu déle jak

určitý počet minut, vozidlo se nachází na konečné stanici a je konec jízdy. Stání vozidla se v této variantě rozdělení dat definovalo dle parametru VehicleMoving značící, zda je vozidlo v pohybu. Parametr nabývá dvou hodnot, 1 když je vozidlo v pohybu a 0 když vozidlo v pohybu není. Princip rozdělení jízd pomocí tohoto parametru se zakládal na předpokladu, že pokud bude VehicleMoving roven nule po nějakou dobu, znamená to, že se vozidlo nachází na konečné stanici. Doba stání vozidla, která měla značit, že se nachází na konečné stanici byla nastavována na různé časy pohybující se mezi patnácti až dvěma minutami. Jízdy však byly stále nesprávně rozdělovány. V některých případech bylo spojeno více jízd do jedné, v jiných byla jízda rozdělena již v jejím průběhu. Nakonec bylo zjištěno, že hlavním důvodem, proč nebylo možné touto variantou rozdělit jednotlivé jízdy správně, nebyla chybně nastavená doba stání vozidla, ale spousta chybějících záznamů parametru VehicleMoving.

Druhá varianta rozdělení dat proto k získání informace o rychlosti vozidla využila parametr FrontAxelSpeed, značící rychlost přední nápravy vozidla, která byla spolehlivějším parametrem s minimálním počtem výpadků během měření. V rámci této varianty rozdělení dat dle jednotlivých jízd byl k záznamům přidán parametr s číslem jízdy, značený jako nR. Přidělování čísel jízd k záznamům probíhal následovně: když je vozidlo v pohybu, tedy FrontAxelSpeed není roven nule, k záznamu se přidá číslo aktuální jízdy, pokud vozidlo není v pohybu, tedy FrontAxelSpeed je roven nule, s okolními záznamy je porovnáváno, zda stav, kdy není v pohybu, netrvá déle, než 6 minut. Pokud vozidlo není v pohybu déle, jak 6 minut, je uvažováno, že se vozidlo nachází na konečné stanici linky a číslo jízdy se o jedno navyšuje. Délka 6 minut byla stanovena na základě odhadu, že vozidlo by tuto dobu stání nemělo překročit během stání na běžných zastávkách či křižovatkách v průběhu obsluhování linky, a zároveň bylo vypořádováno, že minimálně během měření nepobýval na konečné stanici kratší dobu.

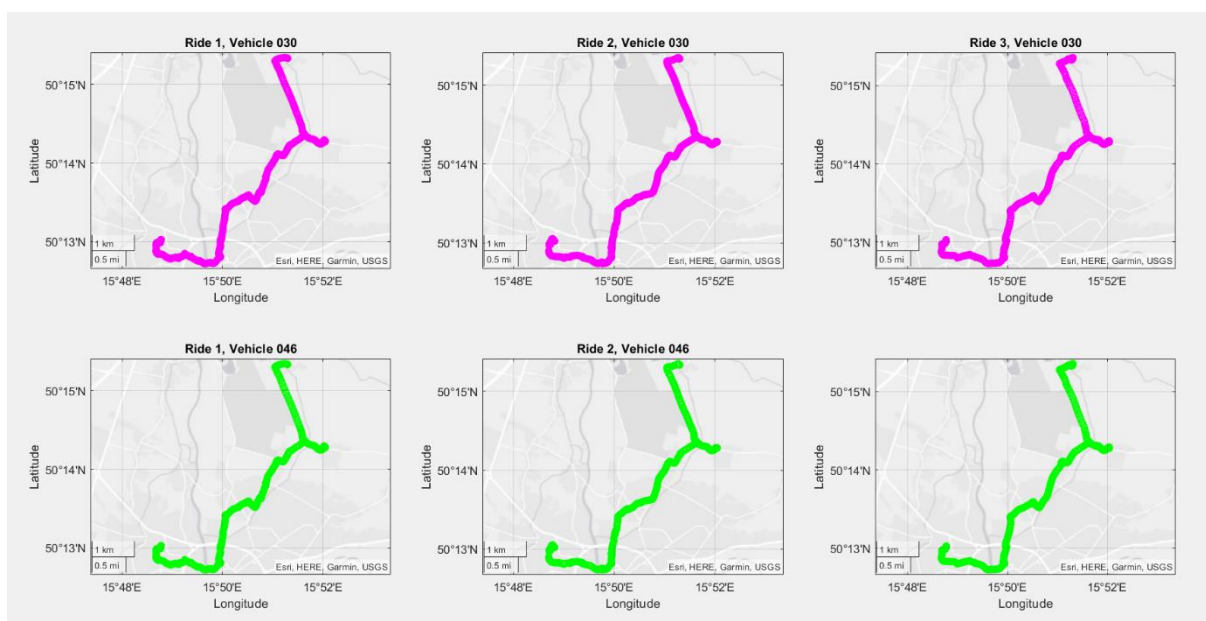
Záznamy naměřených dat disponovaly několika výpadky měřicího zařízení. Vzhledem k povaze cíle porovnat záznamy obou vozidel, byla data v jednotlivých souborech vyfiltrována tak, aby soubor obsahoval jen záznamy, které je možné spárovat i se záznamy druhého vozidla.

U vozidla SOR NS 12 electric 030 byly zaznamenány tři celé jízdy, ke kterým byly dohledány podle parametru času značeném RealTime shodné jízdy i pro vozidlo SOR NS 12 electric 046. Jedná se o dvě jízdy směrem z Terminálu HD do zastávky Rusek škola a jednu jízdu opačným směrem. Tyto tři jízdy obsahují převážnou část neporušených dat ohledně většiny měřených parametrů. Občasné výpadky dat u některých parametrů se přesto týkaly i těchto tří jízd.

Tyto jízdy byly pro usnadnění další práce s daty uloženy do samostatných tabulek nazvaných dle vozidla a čísla jízdy.

Pro vozidlo číslo 046 byly vyfiltrovány jízdy, odpovídající vybraným jízdám vozidla číslo 030, dle času. Jízdy i tohoto vozidla byly uloženy do samostatných tabulek.

Vzhledem k nepravidelným výpadkům záznamových zařízení byla zkontrolována celistvost dat. Do mapy byly postupně vykresleny všechny zaznamenané jízdy. Pro další zpracování byly vybrány pouze tři jízdy, které byly vizuálně kompletní. Jedná se tedy o jízdy, u kterých nedošlo ke znatelným výpadkům v záznamech polohy a času. Z těchto třech jízd vedly dvě ve směru z Terminálu HD do zastávky Rusek škola. Tyto jsou označené jako jízda 1 a 3. Třetí jízda vedla opačným směrem a v rámci práce je označována jako jízda 2. Skutečnost, že tyto tři jízdy neobsahují žádný znatelný výpadek záznamu času a polohy bohužel nezaručuje, kompletnost jiných parametrů. Ne všechny jízdy bude tedy možné využít pro zpracování všech vybraných parametrů.



Obrázek 25 - Znárodnění jízd v mapě

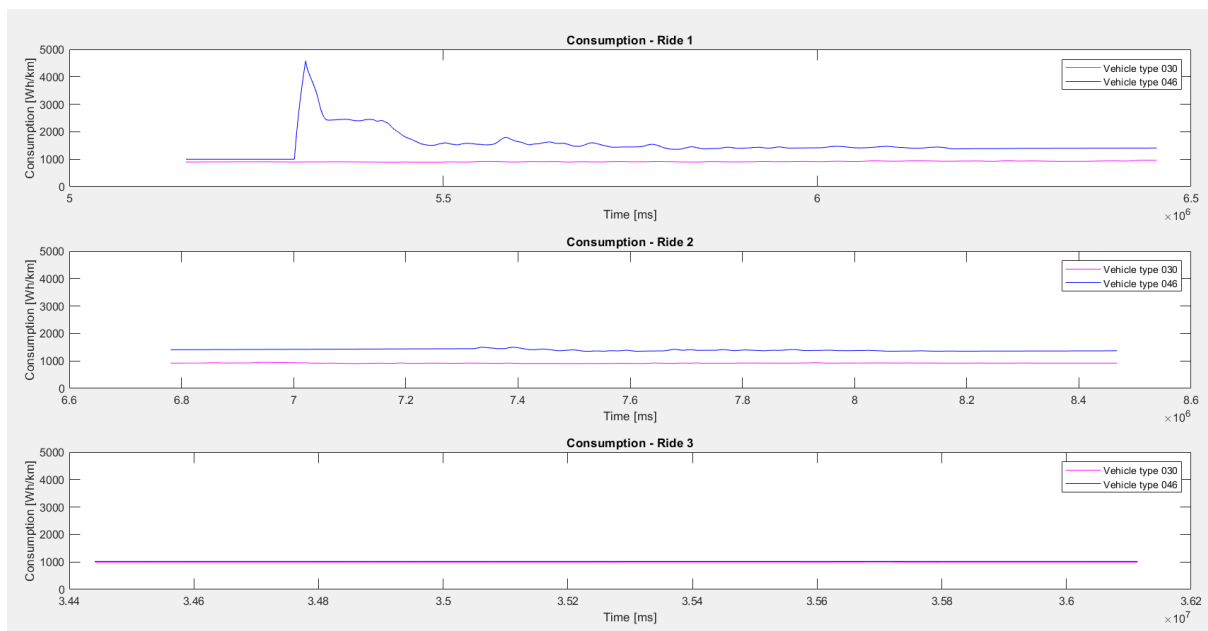
5.3.1 Spotřeba elektrické energie

Prvním porovnávaným parametrem byla spotřeba elektrické energie vozidel, kterou představuje parametr `Consumption_last5kmAvg_`. V níže přiložených grafech (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) jsou vizualizovány průběhy spotřeby energie vozidel během jízd. Na ose y je vynesena průměrná spotřeba vozidla za posledních 5 km. Na ose x je vynesen čas. Nejedná se o čas jedné jízdy, ale o parametr `RealTime`, který značí čas v rámci celého prováděného měření.

Parametr spotřeby byl během první jízdy zaznamenáván po dobu 25,2 minut, což odpovídá celé jedné jízdě, která v denní hodiny trvá dle jízdního řádu 25 minut. Vozidlo číslo 030 mělo během celé jízdy číslo 1 konstantní spotřebu o hodnotě asi 0,9 kWh/km. Vozidlo číslo 046 mělo v rámci této jízdy výraznější odchylku spotřeby zhruba v první osmině jízdy. Na začátku jízdy byla spotřeba energie vozidla číslo 046 okolo 1 kWh/km. Během druhé minuty jízdy došlo k navýšení spotřeby energie až na 4,6 kWh/km. Koncem druhé minuty jízdy spotřeba začala klesat a ve třetí minutě jízdy stagnovala na 2,4 kWh/km. Od necelé páté minuty jízdy se spotřeba ustálila mezi 1,4 a 1,5 kWh/km. Průměrná spotřeba za celou jízdu 1 byla u vozidla číslo 030 o 0,625 kWh/km nižší.

Během druhé jízdy trvající 25,4 minut měla obě vozidla po celou dobu ustálenou spotřebu. Vozidlo číslo 030 mělo spotřebu 0,9 kWh/km. Vozidlo číslo 046 mělo ve druhé jízdě spotřebu mezi 1,3 a 1,4 kWh/km. Průměrná spotřeba vozidla číslo 030 byla během druhé jízdy o 0,476 kWh/km nižší, než u vozidla číslo 046.

V jízdě číslo 3, která trvala 19,5 minuty, měla obě vozidla konstantní a téměř totožnou spotřebu během celé jízdy. Obě vozidla měla spotřebu okolo 1 kWh/km. Rozdíl spotřeby během jízdy 3 byl 0,029 kWh/km ve prospěch vozidla číslo 030.



Obrázek 26 - Spotřeba elektrické energie vozidel

Nižší energetickou spotřebu mělo ve všech porovnávaných jízdách vozidlo sériové výroby. Nejvyšší rozdíly byly v jízdě 1 a 2, kde rozdíl činil až třetinu. Během jízdy 3 byl rozdíl spotřeby vozidel jen nepatrný.

Tabulka 3 - Spotřeba elektrické energie obou vozidel

Vozidlo	Průměrná spotřeba el. energie [kWh/km]			
	Jízda 1	Jízda 2	Jízda 3	Průměrná spotřeba za všechny 3 jízdy
030	0,916	0,921	0,992	0,943
046	1,541	1,397	1,021	1,320
Rozdíl průměrné spotřeby obou vozidel	0,625	0,476	0,029	0,377

5.3.1.1 Energie potřebná pro celodenní obsluhu linky číslo 13

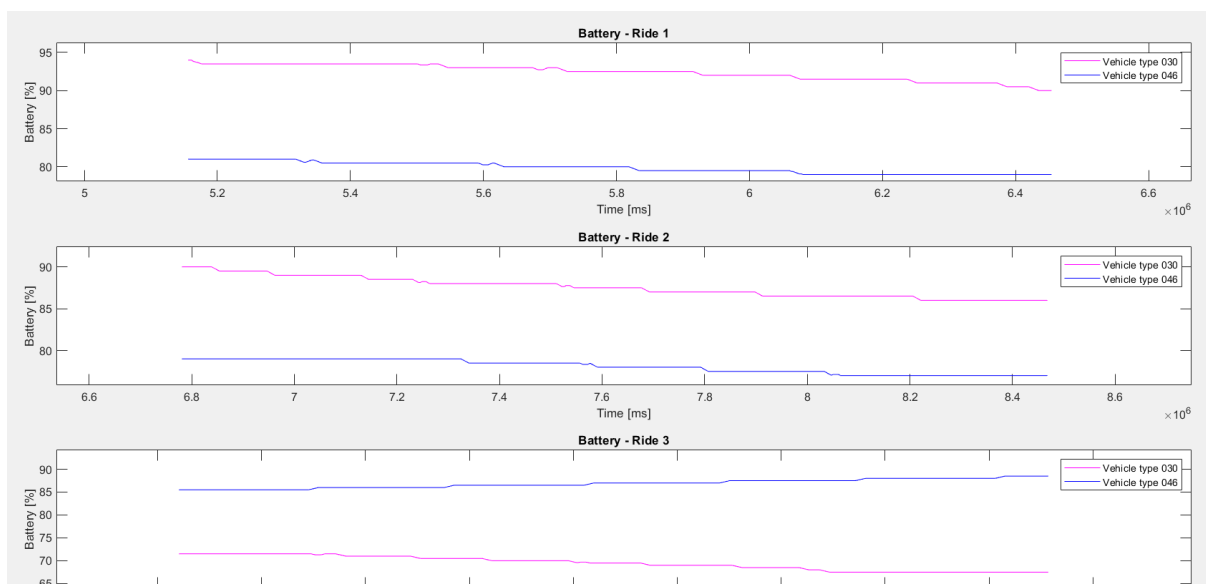
Zajímavé může být také porovnání teoretického množství spotřebované energie za celodenní obsluhy linky. Dle jízdního řádu zahrnuje linka číslo 13 během všedního dne 33 jízd ve směru ze zastávky Rusek škola a 32 jízd ve směru ze zastávky Terminál HD. Dohromady má pak linka v rámci jednoho všedního dne 65 jízd. Délka linky v jednotlivých směrech se liší, budeme dále počítat s průměrem délek linky v obou směrech (viz kapitola 5.2), který činí 9,95 km.

U vozidla číslo 030 je průměrná spotřeba elektrické energie 0,943 kWh/km. V případě, kdy by spotřeba energie odpovídala průměrné spotřebě při třech testovacích jízdách, by na základě výpočtu, kdy je vynásobena spotřeba vozidla na 1 kilometr, průměrná délka linky a počet jízd v rámci linky za 1 den, získáme výsledek, že vozidlo spotřebuje pro celodenní obsluhu linky 609,89 kWh.

U vozidla číslo 046 je průměrná spotřeba energie 1,320 kWh. Při obdobném postupu jako u předchozího vozidla, získáme výsledek, že během celodenní obsluhy vybrané linky by vozidlo číslo 046 spotřebovalo 853,71 kWh, což je o 243,82 kWh více, než u vozidla 030.

5.3.2 Úroveň nabití baterie

Úroveň nabití baterie je v záznamech jízd uložena pod parametrem BatteryStateOfCharge. Tento parametr byl během první jízdy zaznamenáván po dobu 19,4 minut, tedy jen během části jízdy. Během jízdy 2 byl parametr zaznamenán bez zřejmých výpadků po celou jízdu trvající 25,4 minut. Obdobně tomu bylo u jízdy 3, kde je délka záznamu 25,2 minut. V grafu, zobrazujícím průběh stavu nabití baterie vozidel během jednotlivých jízd, bylo použito vyhlazení dat tzv. plovoucím oknem.



Obrázek 27 – Úroveň nabití baterie

Porovnání průběžné úrovně nabití baterie během jízd je obsaženo v příložené tabulce (viz Tabulka 4). Na Obrázek 27 jsou zobrazeny průběhy úrovně nabití baterie v procentech. Jelikož vozidla nemají shodnou kapacitu trakčních baterií (viz kapitola 5.1.1 a 5.1.2), nejedná se o zobrazení rozdílu v čerpání množství energie mezi vozidly, ale vůči vlastní celkové kapacitě baterie.

U vozidla číslo 030 byla spotřebována při všech porovnávaných jízd shodná 4 % baterie. U vozidla číslo 046 se spotřebovala během jízdy 1 a 2 opět shodná 2 % baterie. Během jízdy 3 u vozidla číslo 046 došlo k navýšení kapacity baterie. Tento jev lze vidět na Obrázek 1Obrázek 27. Pokud by k navýšení kapacity došlo jen v úseku výraznějšího klesání, může se jednat o standardní rekuperaci. V tomto případě k nabíjení baterie docházelo podle dat po dobu celé jízdy. Nejspíš se tedy jedná o chybu v záznamech dat. V porovnání proto budou uvažovány pouze jízdy 1 a 2.

Při těchto jízdách mělo menší procentuální úbytky své využitelné kapacity baterie vozidlo číslo 046. Nemusí to nutně znamenat, že má vozidlo nižší spotřebu elektrické energie. Baterie vozidel

vzhledem k odlišným kapacitám a dobám provozu mají odlišné vybíjecí křivky i využitelnou kapacitu baterie, která je v rámci této práce počítána pouze orientačně.

Tabulka 4 – Úroveň nabití baterie vozidla

Vozidlo	Úroveň nabití baterie vozidla								
	Jízda 1			Jízda 2			Jízda 3		
	Začátek [%]	Konec [%]	Rozdíl [%]	Začátek [%]	Konec [%]	Rozdíl [%]	Začátek [%]	Konec [%]	Rozdíl [%]
030	94	90	-4	90	86	-4	71,5	67,5	-4
046	81	79	-2	79	77	-2	85,5	88,5	+3

5.3.2.1 Hloubka vybití baterie

Z dat lze vyčíst průběžný úbytek energie z baterie vozidel během jízd, a především tak porovnat obě vozidla mezi sebou. Na základě toho je možné odhadnout i přibližný počet cyklů linek, které vozidlo na jedno nabití obslouží. V tomto ohledu závisí kromě kapacity baterie také na jejím druhu. Různé druhy baterií mají různou hloubku vybití. U olověných baterií se hloubka vybití neboli DOD (depth of discharge) pohybuje okolo 50 %. To znamená, že je možné vyčerpat 50 % kapacity baterie. Doporučená hloubka vybití se pohybuje pouze okolo 40 %. To znamená, že 60 % kapacity baterie nelze využít, aniž by nehrozilo poškození baterie. NMC baterie, kterými jsou osazena i vozidla SOR NS 12 electric, mají DOD v rozsahu mezi 80 a 90 %. Ve využitelnosti kapacity baterie si nejlépe vedou LFP (lithium železo fosfátové) baterie, kde je hloubka vybití až 100 %. Je tedy možné využít celou kapacitu baterie, aniž by hrozilo její poškození. (70) (71)

Testovaná vozidla mají baterie typu NMC. Pro orientační stanovení využitelné kapacity baterie bude počítáno s nižší variantou DOD z udávaného intervalu, a to s 80 %. Baterie vozidla číslo 030 má kapacitu 242 kWh. Baterie vozidla číslo 046 má kapacitu 388 kWh. Přibližné využitelné kapacity baterie vozidel vycházející z předpokladu výše zmíněného DOD jsou uvedeny v Tabulka 5. (53)

Tabulka 5 - Přibližná využitelná kapacita baterie vozidel SOR NS 12 electric

Vozidlo	Kapacita baterie [kWh]	Přibližná využitelná kapacita baterie [kWh]
030	242	193,6
046	388	310,4

Spočítané hodnoty využitelné kapacity baterie se mohou lišit dle stavu baterie. Větší odchylka této teoretické a reálné využitelné kapacity se dá očekávat u vozidla 030, u jehož baterie se předpokládá vyšší degradace způsobená násobně vyšším počtem cyklů nabití a vybití baterie, než je tomu u baterie prototypu, tedy vozidla 046.

Orientační využitelná kapacita baterie vozidla 030 je 193,6 kWh a u vozidla 046 je využitelná kapacita baterie 310,4 kWh. Pro představu o potřebném počtu nabití baterie vozidel pro obsluhu linky během jednoho celého všedního dne, je zde uveden následující odhad. Ten vychází právě z těchto využitelných kapacit baterie a z potřebné kapacity energie pro celodenní obsluhu linky spočítané v kapitole 5.3.1.1. Výsledky jsou uvedeny v Tabulka 6. Písmenem F je v Tabulka 6 je značena průměrná délka jedné jízdy. Ta je stanovena jako průměr jízd v obou směrech a má hodnotu 9,95 km.

Tabulka 6 – Počet obslužených cyklů linky č. 13 na jedno nabití baterie a počet potřebných nabití pro celodenní obsluhu linky

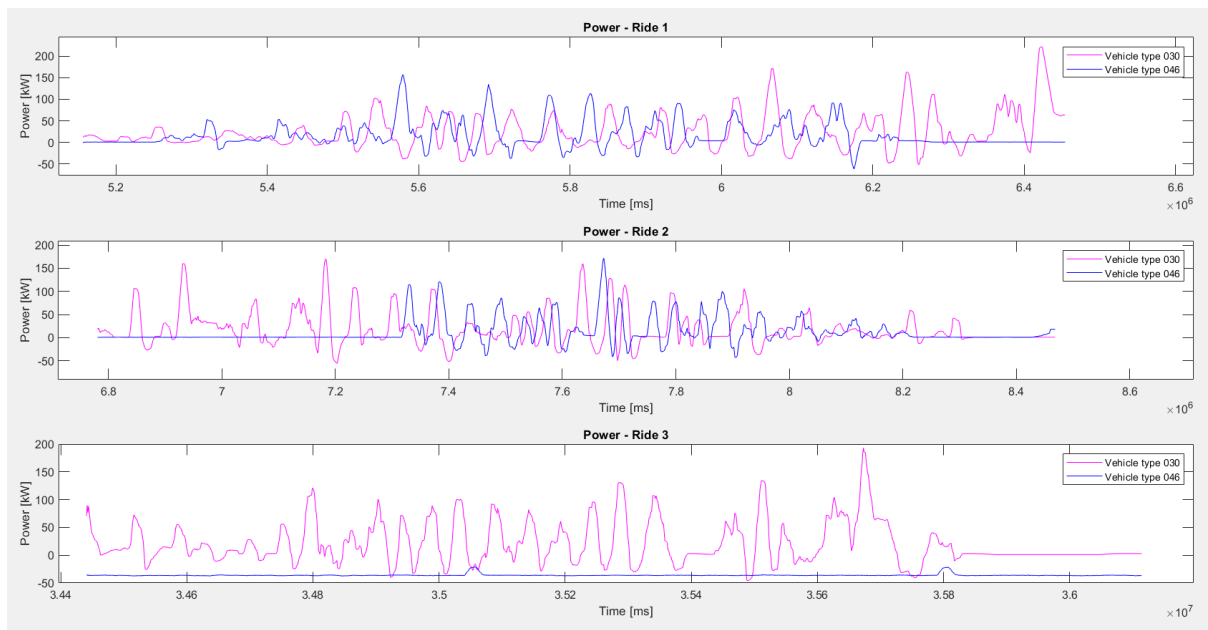
Vozidlo	Průměrná spotřeba elektrické energie na 1 km [kWh/km]	Potřebné kapacity energie pro celodenní obsluhu linky [kWh]	Přibližná využitelná kapacita baterie [kWh]	Počet odjetých cyklů na 1 nabití	Potřebný počet nabití baterie pro celodenní obsluhu linky
Označení pro výpočty	A	B	C	D	E
Zdroj hodnoty	Kapitola 5.3.1.15.3.1	Kapitola 5.3.1.15.3.1.1	Kapitola 5.3.1.15.3.2.1	$C \div (A * F)$	$B \div C$
030	0,943	609,89	193,6	20,6	3,2
046	1,320	853,71	310,4	23,6	2,8

Za předpokladu hodnoty DOD (hloubky vybití baterie) 80 %, bez uvažování vybíjecí křivky a žádné degradace baterie, lze vyčíst z orientačních výpočtů v Tabulka 6 následující hodnoty:

- Vozidlo číslo 030 obslouží na jedno nabití baterie linku číslo 13 dvacetkrát.
- Vozidlo číslo 046 obslouží vybranou linku na jedno nabití baterie třiadvacetkrát.
- Pro celodenní obsluhu linky číslo 13 by muselo být vozidlo číslo 030 nabito 3,2krát a vozidlo číslo 046 2,8krát.

5.3.3 Průběh výkonu vozidel

Okamžitý výkon pohonného systému vozidel představuje parametr CurrentEnginePower. Tento parametr byl zaznamenáván v kilowattech. Pro přehlednější zobrazení je v grafu použito vyhlazení dat tzv. plovoucím oknem. Z tohoto důvodu maximální hodnoty výkonu uvedené v Tabulka 7 nejsou v grafu na Obrázek 28 vyznačeny. Nejspolehlivější záznam tohoto parametru byl pro obě vozidla vytvořen během jízdy číslo 1, ve které byl okamžitý výkon zaznamenáván po dobu 19,6 minut.



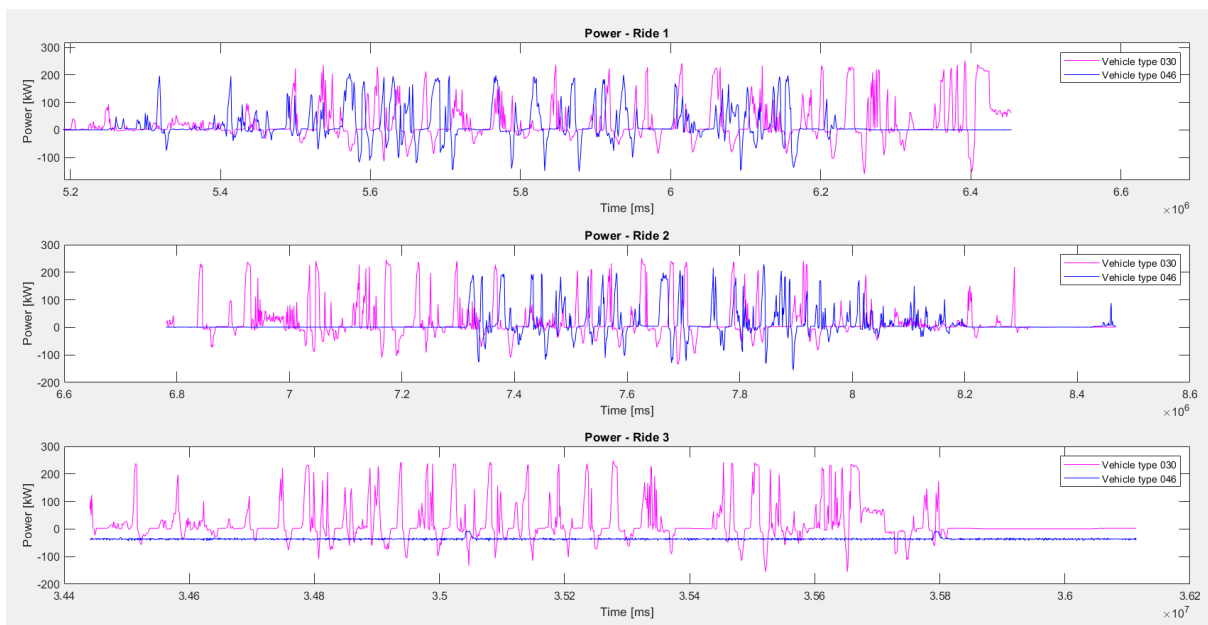
Obrázek 28 - Průběh okamžitého výkonu – vyhlazení plovoucím oknem

Během jízdy 1 mělo vozidlo číslo 030 průměrný okamžitý výkon 20,2 kW, maximálně dosáhlo výkonu 252 kW. Průměrný okamžitý výkon vozidla číslo 046 byl o 3,6 kW nižší a jeho hodnota činila 16,6 kW. Maximální výkon vozidla 046 dosáhl 205 kW.

V rámci druhé jízdy chybí část dat u vozidla číslo 046. Průměrný výkon vozidel za jízdy číslo 2 bude hodnocen pouze u vozidla číslo 030. To v porovnání s vlastní předchozí jízdou dosáhlo podobného maximálního výkonu 251 kW a oproti jízdě 1 o 5,4 kW nižšího průměrného výkonu o hodnotě 14,8 kW.

Během jízdy 3 byla poměrně spolehlivě nasbírána data vozidla číslo 046. Vozidlo číslo 030 mělo během jízdy 3 u parametru výkonu téměř kompletní výpadek. Maximální výkon vozidla číslo 030 byl opět podobný předchozím jízdám a dosahoval 248 kW. Průměrný výkon vozidla během jízdy 3 činil 20,3 kW a byl tedy obdobný s průměrným výkonem dosaženým v jízdě 1.

Výkyvy výkonů vozidel k nejvyšším hodnotám jsou v nevyhlazených datech v grafu na Obrázek 29 v téměř periodických intervalech. Počet výkyvů je v jízdách podobný počtu zastávek linky. Výkyvy k maximálním výkonům odpovídají rozjezdům vozidla především ze zastávek.



Obrázek 29 - Průběh okamžitého výkonu – nevyhlazená data

Tabulka 7 - Okamžitý výkon vozidel

Vozidlo	Okamžitý výkon vozidel [kW]					
	Jízda 1		Jízda 2		Jízda 3	
	Průměrný	Maximální	Průměrný	Maximální	Průměrný	Maximální
030	20,2	252,0	14,8	251,0	20,3	248,0
046	16,6	205,0	-	-	-	-
Rozdíl	3,6	47,0	-	-	-	-

6 Výsledky porovnání vozidel podle provozních dat

V této části jsou uvedeny výsledky porovnání obou vozidel na základě dat zaznamenaných během jízd. Spolehlivost jednotlivých zaznamenaných parametrů se v průběhu jízd lišila. Z celého měření byly pro porovnání vybrány pouze tři jízdy, které se po prvotní selekci jevily v jejich vykreslení, tedy vyznačení polohy vozidla v čase do mapy, jako nejcelistvější. Jedná se o dvě jízdy ve směru ze zastávky Terminál HD do zastávky Rusek škola, které jsou v rámci práce označené jako jízda 1 a 3, a jednu jízdu opačného směru označenou jako jízda 2. Celistvost zaznamenaných dat byla pro porovnání stěžejní a četné výpadky záznamových zařízení během měření představovalo komplikaci nejen ohledně výsledného počtu porovnávaných jízd, ale i u dalších parametrů, které pak nebylo možné dále využít.

Byly porovnávány dva elektrobusy. Jedná se o jedno vozidlo sériové výroby a jeden prototyp. Prototyp je shodným modelem vozidla, který je však osazen jiným pohonným systémem a trakční baterií o rozdílné kapacitě. Porovnání se proto týkalo především parametrů ovlivněných právě pohonným systémem. Souhrnné výsledky zkoumaných parametrů jsou uvedeny v Tabulka 8.

Tabulka 8 - Souhrn porovnávaných parametrů z dat z měření

Parametr	Jízda	Vozidlo	
		030	046
Spotřeba elektrické energie [kWh]	1	0,916	1,541
	2	0,921	1,397
	3	0,992	1,021
	Průměr	0,943	1,320
Rozdíl úrovně nabití baterie během jedné jízdy vůči vlastní kapacitě [%]	1	-4	-2
	2	-4	-2
	3	-4	+3
	Průměr	-4	-2
Průměrný okamžitý výkon vozidel [kW]	1	20,2	16,6
	2	14,8	-
	3	20,3	-
	Průměr	18,4	16,6
Maximální okamžitý výkon vozidel [kW]	1	252,0	205,0
	2	251,0	-
	3	248,0	-
	Průměr	250,3	205,0

výřazeno,
pravděpodobně
chyba měření

Počet ujetých cyklů na 1 nabití	-	20,6	23,6
Potřebný počet nabití baterie pro celodenní obsluhu linky	-	3,2	2,8

V grafu spotřeby (viz Obrázek 26) lze vidět odchylku u vozidla číslo 046 během jízdy 1. Důvod této odchylky není známý. Mohlo se jednat o chybu měření. Během jízdy 2 a 3 měla vozidla poměrně konstantní spotřebu, přičemž vozidlo 030 mělo vždy průměrnou energetickou spotřebu nižší, než má prototyp. Na základě zpracovaných dat vychází vozidlo číslo 030 jako energeticky méně náročné, a to v průměru o 0,38 kWh/km.

Z parametru značícího úroveň nabití baterie lze vyčíst hospodaření vozidla s vlastní kapacitou baterie. Vozidlem odebírajícím menší procentuální kapacitu baterie je dle dat vozidlo 046. Během jízdy 1 a 2 spotřebovalo 2 % kapacity baterie za jízdu. U vozidla číslo 030 bylo v případě obou těchto jízd spotřebováno po shodných 4 % kapacity baterie. Třetí jízda není v porovnání uvažována z důvodu chyby měření u vozidla označovaného číslem 046 (viz kapitola 5.3.1.1).

Parametr okamžitého výkonu byl z porovnávaných jízd zaznamenán kompletně u obou vozidel pouze během jízdy 1. Hodnocení je tak z důvodu nízkého počtu dat méně relevantní než u jiných parametrů. Vyhodnocení jízdy 1 dopadlo ve prospěch vozidla číslo 030, které mělo vyšší průměrný okamžitý výkon o 3,6 kW. Vozidlo 030 dosahovalo i vyššího maximálního výkonu, a to o 47 kW. Skutečností však je, že maximální hodnoty výkonu převyšují hodnoty, které jsou udávány výrobcem. Příčina tohoto jevu nebyla nalezena. Může se jednat o chybu měření.

6.1 Hodnocení vozidel pro vybranou lokalitu

Celkem bylo k roku 2021 v královehradecké MHD 34 autobusových linek o celkové délce 280 km. Tyto autobusové linky obsluhuje 90 autobusů, z nichž je 22 elektrobusů. Vybraná trasa, tedy městská autobusová linka číslo 13, je svou délkou lehce nad průměrem mezi ostatními linkami v rámci královehradecké MHD. Její převýšení činí pouhých 6 výškových metrů a celkem čítá 17 zastávek. Jedná se o linku, která nepředstavuje náročné či neobvyklé podmínky, a nejsou tedy specifické požadavky ani na vozidla, která linku obsluhují. (72)

Vzhledem k podmínkám linky, jejíž součástí není náročné stoupání, na vozidla nejsou kladeny vysoké požadavky ohledně jejich výkonu. K vyšším hodnotám výkonů docházelo téměř

periodicky a ve většině případů vrcholy dosahovaly podobných hodnot. Právě z důvodu podobných hodnot výkonů v jejich vrcholech a kvůli jejich počtu, který téměř odpovídá počtu zastávek linky, jsou tyto výkyvy připisovány rozjezdům nejčastěji právě ze zastávek. K nejvyšším hodnotám výkonů tedy nedocházelo z důvodu potřeby zdolat specifické části trati. Proto se v tomto směru zdají být pro danou lokalitu vyhovující obě vozidla. Maximální naměřené výkony převyšují jejich udávané hodnoty, které u vozidla 030 činí 160 kW a u vozidla 046 175 kW.

Kapacitu a kvalitu trakčních baterií, vzhledem k požadavkům daným tratí, bude obtížné hodnotit. Důvodem je nedostatek informací o délce a četnosti nabíjení vozidel. Pro stanovení potřebného nabíjení vozidla pro celodenní obsluhu linky, by bylo potřeba porovnat varianty způsobu, rychlosti, četnosti a času nabíjení baterie vozidla. Optimalizace nabíjení ale není předmětem této práce. Proto je porovnání postaveno spíše na spotřebě elektrické energie vozidel, které je uvedeno v Tabulka 6 a v kapitole 5.3.2.1. V té je stanoveno teoretické množství elektrické energie pro celodenní obsluhu linky číslo 13 čítající 65 jízd a počet jízd, které vozidlo obslouží na jedno nabití baterie.

U vozidla číslo 030 je teoretická využitelná kapacita baterie 193,60 kWh a za jednu jízdu vozidlo spotřebuje přibližně 9,38 kWh. U vozidla číslo 046 je využitelná teoretická kapacita baterie 310,40 kWh. Úbytek kapacity baterie za jednu jízdu činí přibližně 13,13 kWh.

Za předpokladu, že nebudeme brát v úvahu vybíjecí křivky baterií, jejich degradaci a další faktory, ovlivňující její provoz a budeme počítat s hloubkou vybití baterie 80 %, byly získány pro představu o provozu těchto vozidel tyto hodnoty:

- a. Pro celodenní obsluhu linky číslo 13 by baterie vozidla číslo 030 musela být nabita přibližně 3,2krát.
- b. Pro shodné využití, tedy obsluhu linky 13 během celého všedního dne, by vozidlo číslo 046 muselo být nabito 2,8krát.
- c. Na jedno nabití by vozidlo 030 obsloužilo 20 celých jízd linky číslo 13.
- d. Vozidlo 046 by na jedno nabití obsloužilo 23 celých jízd shodné linky.

7 Závěr

V teoretické části práce bylo zmapováno současné zastoupení elektrobuses v městské hromadné dopravě v České republice i ve světě. U vybraných lokalit bylo popsáno rozšíření elektrobuses v rámci jednotlivých dopravních podniků. U vybraných lokalit byla nastíněna místní politika elektromobility a její vize. Vozidla, která byla zastoupena ve flotilách zmíněných dopravních podniků, pak byla blíže představena. Rozdíly především v přístupu k elektromobilitě v MHD jsou značné nejen mezi zeměmi, ale i mezi menšími správními celky, jako jsou jednotlivá města.

V rámci této práce byla řešena specifika provozu městských elektrobuses. Bylo řešeno, jaký vliv má na vozidla prostředí či klima, ve kterém jsou provozována. Mezi nejvýraznější specifika provozu všech elektromobilů patří například vliv nízkých venkovních teplot. Ty mohou mít negativní vliv na dojezd vozidel. V jisté míře je odebírána energie z baterie pro vytápění vozidla. Podstatný vliv mají nízké teploty na rychlost chemických a fyzikálních dějů v baterii, které jsou pak zpomalovány. Dalším významným a na řešení finančně nákladným specifickým je potřeba vybudování nové infrastruktury pro nabíjení těchto vozidel. U nabíjení je více řešení, a každé je vhodné pro jiné podmínky.

V teoretické části byla pozornost věnována také pohonu a bateriím vozidel. Byly popsány jejich varianty i principy.

Praktická část práce obsahuje porovnání dvou elektrobuses SOR NS 12 electric. Obě vozidla jsou téhož modelu. Jedno je ze sériové výroby, druhé je prototypem osazeným komplexním pohonným systémem ZF CeTrax. Vlastnosti vozidel byly nejprve porovnány podle jejich parametrů stanovených výrobcem. Zásadní rozdíl mezi těmito vozidly je v pohonném systému včetně jejich výkonu. Vyšší výkon o hodnotě 175 kW má prototyp, vozidlo v této práci označované číslem 046, a to o 15 kW.

Dále byla vozidla porovnána na základě jejich provozních parametrů a podle vhodnosti jejich provozu v dané lokalitě. V první řadě byla zhodnocena lokalita – parametry konkrétní autobusové linky. Její délka, výškový profil a celkový charakter. V jednom směru má trasa linky délku 9,8 km, ve druhém 10,1 km. Výškové převýšení trasy je 6 m. Především nízké převýšení trati neklade vysoké nároky na výkon vozidla. Následně byly porovnány provozní parametry vozidel, které byly naměřeny v rámci projektu eUltimate. Parametry, vybrané pro porovnání, byly spotřeba elektrické energie, úroveň nabití baterie a okamžitý výkon vozidla. Tyto parametry byly zvoleny na základě jejich charakteristiky i spolehlivosti, která ovšem

nebyla stoprocentní ani u těchto parametrů. Kromě výběru parametrů pro porovnání ovlivnily výpadky zaznamenávání parametrů také počet porovnávaných jízd, který čítal pouze tři jízdy.

Z provedeného porovnání vozidel nevzešel výsledek, který by označil celkově vhodnější vozidlo pro vybranou lokalitu. Tato skutečnost může být dána několika faktory. Jedním z nich může být vysoká podobnost vozidel. Vozidla se lišila především výkonem jejich pohonných soustav a kapacitou trakční baterie.

Na základě stanovení využitelných kapacit baterií a předpokladů, jako že je hodnota hloubky vybití baterií obou vozidel 80 %, byly získány pro přibližnou představu o provozu testovaných vozidel na vybrané autobusové lince hodnoty o potřebném počtu nabití baterií vozidel pro jejich celodenní obsluhu vybrané linky a počet obslužených cyklů linky na jedno nabití baterie.

Na jedno plné nabití by vozidlo 030 obsloužilo linku číslo 13 dvacetkrát. Pro teoretickou celodenní obsluhu linky by toto jedno vozidlo muselo být nabito třikrát do plné kapacity baterie a jedenkrát do jedné pětiny využitelné kapacity baterie.

Na jedno nabití baterie by vozidlo 046 teoreticky obsloužilo linku číslo 13 třidvacetkrát. Pro celodenní obsluhu linky pouze tímto vozidlem by bylo třeba nabít jeho baterii do plné kapacity dvakrát a jedenkrát do čtyř pětin využitelné kapacity baterie.

Pro posouzení vlivu vybraných parametrů na vhodnost provozu vozidel na této lince by bylo přínosné disponovat informacemi o způsobu a četnosti nabíjení vozidel za běžného provozu. Dalším faktorem může být vybraná lokalita. Byly zmapovány a popsány podmínky vybrané autobusové linky. Ta díky své charakteristice příliš nelimitovala výběr vozidel vhodných pro její obsluhu. Obě vozidla se tedy zdají být pro obsluhu vybrané linky vhodná a minimálně ohledně výkonu pohonné soustavy a kapacity trakční baterie dostatečná.

Zajímavé by mohlo být řešení vhodnosti různých kapacit baterií a způsobů nabíjení vozidel obsluhujících tuto autobusovou linku. Především pak hodnocení různých kombinací kapacity baterie, způsobu nabíjení, četnosti nabíjení a počtu vozidel obsluhujících linku.

Pro vyšší přínos zpracování tohoto tématu by zajisté přispělo spolehlivější zaznamenávání jízdních parametrů. Bylo by možné hodnotit více různých parametrů, a to i z většího vzorku dat než pouze ze třech jízd, ze kterých byla data čerpána v rámci této práce. Pro snazší a efektivnější práci s daty by přispěla varianta měření, kdy by byly záznamy jízd ukládány vždy po jejich dokončení, a data by tak byla rovnoměrně rozdělena dle jednotlivých jízd. Jelikož data obsahovala

parametr reálného času, data by nebyla ani při této variantě ochuzena o informaci o délce stání vozidla na konečné stanici.

Řešené téma by mohl obohatit vyšší počet testovaných vozidel, nebo testování vozidel na více různých autobusových linkách, a to především na těch, které mají nějakou specifickou charakteristiku. Tou může být vysoké převýšení, vedení trasy dopravně vytíženou lokalitou, nebo například dostupnost trolejového vedení pro možné dobíjení vozidla.

8 Citovaná literatura

1. **WITT, Jon.** The Truth About Winter EV Range Loss. *Reccurent*, ©2022. [Online] 19. prosinec 2021. [Citace: 8. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.recurrentauto.com/research/winter-ev-range-loss>.
2. **BÁRTA, Martin.** Silné mrazy omezují provoz elektrických autobusů v Berlíně. *EnergoZrouti.cz*, © 2019 - 2022. [Online] 11. únor 2021. [Citace: 19. únor 2022.] Dostupné z: <https://energozrouti.cz/z/silne-mrazy-omezuji-provoz-elektrickych-autobusu-v-berline>.
3. **Působivá dojezdová vzdálenost: tepelné čerpadlo ve voze ID.4.** *AUTO-HOREJSEK*, © 2022. [Online] [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.auto-horejsek.cz/tepelne-cerpadlo-vw-id-4>.
4. **Tepelné čerpadlo šetří trakční spotřebu elektrobuses.** *Smart city v praxi*. [Online] Jakub Slavík, © 2012 – 2022, 14. květen 2020. [Citace: 3. únor 2022.] Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_120.php.
5. **ČERNÝ, Ladislav.** Jezdili jsme elektrickým městským autobusem Mercedes eCitaro. *Auto.cz*. [Online] 8. říjen 2021. [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.auto.cz/jezdili-jsme-elektrickym-mestskym-autobusem-mercedes-ecitaro-141068>.
6. **Elektrobus Scania Citywide LF se představil veřejnosti.** *Smart city v praxi*. [Online] Jakub Slavík, © 2012 – 2022, 18. červen 2021. [Citace: 11. březen 2022.] Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_152.php.
7. **ERŠIL, Lukáš.** Elektrobus má za sebou úspěšný rok provozu. *Čistou stopou Prahou*. [Online] 2. září 2016. [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.cistoustopou.cz/mhd/clanek/elektrobus-ma-za-sebou-uspesny-rok-provozu-213>.
8. **Konvekta CO2 heat pump and fossil-free heating on 18m e-bus. A premiere in Nuremberg.** *Sustainable Bus*. [Online] 12. květen 2020. [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/components/konvekta-co2-heat-pump-electric-bus/>.
9. **CAISL, Petr.** Nabíjení elektromobilů, zatížení sítě a řízení výkonu – část I., typy nabíjení. *TZB-info*. [Online] 16. červenec 2020. [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z:

<https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/20937-nabijeni-elektromobilu-zatizeni-site-a-rizeni-vykonu-cast-i>.

10. Connector types for EV charging around the world. *EV EXPERT*. [Online] [Citace: 8. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/connector-types-for-ev-charging-around-the-world>.

11. Revoluce v elektromobilitě: Za 5 minut nabíjení hodina jízdy! *AUTO.CZ*. [Online] 2. duben 2019. [Citace: 8. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.auto.cz/revoluce-v-elektromobilite-za-5-minut-nabijeni-hodina-jizdy-128582>.

12. ZACHOVÁ, Aneta. Na auta i nabíječky přispěje EU. Kdo má nárok na dotaci? *Hospodářské noviny*. [Online] 11. listopad 2021. [Citace: 19. únor 2022.] Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66998410-na-auta-i-nabijecky-prispeje-eu-kdo-ma-narok-na-dotaci>.

13. Elektrobuses v hradecké MHD ujely již přes tři miliony kilometrů. *Sdružení dopravních podniků ČR*. [Online] © 1991-2022 SDP-ČR, 12. duben 2021. [Citace: 29. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.sdp-cr.cz/systext/41/6/178/elektrobuses-v-hradecke-mhd-ujely-jiz-pres-tri-miliony-kilometru/>.

14. Modernizační fond. *Státní fond životního prostředí ČR*. [Online] leden 2021. [Citace: 19. únor 2022.] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/modernizacni_fond/\\$FILE/OPTNE-PDMdF-20210125.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/modernizacni_fond/$FILE/OPTNE-PDMdF-20210125.pdf).

15. smartEn White Paper. *Smart Energy Europe*. [Online] červenec 2019. [Citace: 3. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.smarten.eu/wp-content/uploads/2019/07/FINAL-smartEn-White-Paper-E-Mobility.pdf>.

16. BŘEZINOVÁ, Jana. Poznejte tajemství elektromotoru. *elektrina.cz*, © 2014 – 2022. [Online] 7. únor 2020. [Citace: 30. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/jak-funguje-elektromotor>.

17. KRÁLOVÁ, Magda. Elektromotory. *Techmania Science Center o.p.s.* [Online] [Citace: 13. březen 2022.] Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/elektromotory>.

18. NOVÁK, Ivo. Kapitola 5: Asynchronní elektromotor jednofázový. *ICT v učivu elektromotorů na SŠ.* [Online] [Citace: 16. březen 2022.] Dostupné z: <http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-jednofazovy.htm>.
19. —. Kapitola 4: Asynchronní elektromotor třífázový. *ICT v učivu elektromotorů na SŠ.* [Online] [Citace: 16. březen 2022.] Dostupné z: <http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-trifazovy.htm>.
20. Redakce Svět motorů. Přehledně: Všechny typy elektromotorů! Čím se liší? A jaké mají výhody/nevýhody? *Auto.cz.* [Online] 28. listopad 2021. [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.auto.cz/prehledne-vsechny-typy-elektromotoru-cim-se-lisi-a-jake-maji-vyhody-nevychody-141704>.
21. NOVÁK, Ivo. Kapitola 6: Synchronní elektromotor třífázový. *ICT v učivu elektromotorů na SŠ.* [Online] [Citace: 16. březen 2022.] Dostupné z: <http://www.emotor.cz/synchronni-elektromotor-trifazovy.htm>.
22. Baterie elektromobilu - základní parametry. *DEVINN s.r.o., © 2022.* [Online] 31. březen 2020. [Citace: 26. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/baterie-elektromobilu/>.
23. MICHALEC, Libor. Správa baterií v automobilovém průmyslu – jde to i bezdrátově. *HW server s.r.o., © 1997 - 2022.* [Online] 25. únor 2021. [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/sprava-baterii-v-automobilovem-prumyslu-jde-to-i-bezdratove.html>.
24. Olověné akumulátory. *Jungheinrich AG, © 2022.* [Online] [Citace: 18. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.jungheinrich.cz/produkty/baterie-nabijecky/baterie/olovene-akumulatory-491992>.
25. A review of battery technologies for automotive applications. *ACEA, © 2022.* [Online] 19. květen 2014. [Citace: 2. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.acea.auto/publication/a-review-of-battery-technologies-for-automotive-applications/>.
26. Lithium-iontové baterie. *Jungheinrich AG, © 2022.* [Online] [Citace: 19. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.jungheinrich.cz/produkty/baterie-nabijecky/baterie/li-ion-baterie-491954>.

27. ŠŤASTNÝ, František. Baterie pro elektrobusey. *Proelektrotechniky.cz*. [Online] 12. leden 2021. [Citace: 6. únor 2022.] Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/387.php>.
28. HORČÍK, Jan. Elektromobil v zimě: Nenechte se zaskočit! *Hospodářské noviny*. [Online] 11. listopad 2021. [Citace: 14. únor 2022.] Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66998360-elektromobil-v-zime-nenechte-se-zaskocit>.
29. BORSKÝ, Michal. ADAC: S některými elektromobily nehnete, ani když jsou zcela nabité. Příčina je prozaická. *Autosalon.tv, FTV Prima, © 2022*. [Online] 17. září 2021. [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.autosalon.tv/novinky/ridicuv-chleba/adac-s-nekterymi-elektromobily-nehnete-ani-kdyz-jsou-zcela-nabite-pricina-je-prozaicka>.
30. MAREK, Jan. Recyklace baterií do elektroaut. Vozy umí být levné i čisté. *Seznam.cz a.s., © 1996–2022*. [Online] 24. leden 2021. [Citace: 2. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/tech-technologie-recyklace-baterii-do-elektroaut-vozy-umi-byt-levne-i-ciste-186141>.
31. BUCHHOLZ, Katharina. What's really driving the trend in e-vehicles? Your local electrical bus. *World Economic Forum, © 2022*. [Online] 25. březen 2021. [Citace: 27. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.weforum.org/agenda/2021/03/municipal-buses-lead-electrification-effort>.
32. Electric buses: where are we? *IES, © 2020*. [Online] 4. březen 2021. [Citace: 13. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.ies-synergy.com/en/electric-buses-where-are-we/>.
33. RANDALL, Chris. Santiago de Chile receives 150 new BYD buses. *electrive.com, © 2022*. [Online] 30. červen 2020. [Citace: 8. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.electrive.com/2020/06/30/santiago-de-chile-receives-150-new-byd-buses/>.
34. 100 electric buses now on roads across Hamburg. *Hamburg News*. [Online] 24. listopad 2021. [Citace: 14. leden 2022.] Dostupné z: <https://hamburg-news.hamburg/en/innovation-science/100-electric-buses-now-roads-across-hamburg>.
35. The green foundation stone: bus depots for electromobility. *Hamburger Hochbahn AG 2021*. [Online] září 2021. [Citace: 9. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.hochbahn.de/en/projects/new-bus-depots>.

36. Elektrobuse in Hamburg nehmen Betrieb auf. *Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH*. [Online] 19. srpen 2021. [Citace: 7. únor 2022.] Dostupné z: <https://vhhbus.de/elexity/>.
37. E120 Elektrisch. *Rampini Carlo S.p.A.* [Online] [Citace: 6. listopad 2022.] Dostupné z: <https://www.rampini.it/upload/E120%20D-1547111243753-283.pdf>.
38. E80. *Rampini Carlo S.p.A., © 2018.* [Online] [Citace: 6. únor 2022.] Dostupné z: https://www.rampini.it/en/buses-specialty-vehicle_4/prodotti/e80-e-bus-electric-bus_101/.
39. Výbava eCitaro. *Mercedes-Benz Česká republika s.r.o., © 2022.* [Online] [Citace: 4. únor 2022.] Dostupné z: https://www.mercedes-benz-bus.com/cs_CZ/models/ecitaro/facts/equipment.html.
40. The eCitaro Technical information. *EvoBus GmbH*. [Online] září 2021. [Citace: 13. únor 2022.] Dostupné z: https://www.mercedes-benz-bus.com/cs_CZ/models/ecitaro.html.
41. REBUS. MAN Lion's City 12 E poprvé v České republice. *BUSportál*. [Online] 24. květen 2021. [Citace: 19. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=17387>.
42. Bus Fleet Audit. *Transport for London*. [Online] 31. březen 2021. [Citace: 3. únor 2022.] Dostupné z: <https://content.tfl.gov.uk/fleet-annual-audit-report-31-march-2021.pdf>.
43. London's buses now meet ULEZ emissions standards across the entire city. *Transport for London*. [Online] 14. leden 2021. [Citace: 16. únor 2022.] Dostupné z: <https://tfl.gov.uk/info-for/media/press-releases/2021/january/london-s-buses-now-meet-ulez-emissions-standards-across-the-entire-city>.
44. List of bus types uses in London. *Wikipedia*. [Online] 14. březen 2022. [Citace: 4. únor 2022.] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bus_types_used_in_London.
45. BYD ADL Enviro400EV. *BYD Company and Alexander Dennis*. [Online] květen 2021. [Citace: 2. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.alexander-dennis.com/media/85868/byd-adl-enviro400ev.pdf>.

46. BYD ADL Enviro200EV. *BYD Company and Alexander Dennis*. [Online] květen 2021. [Citace: 2. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.alexander-dennis.com/media/85867/byd-adl-enviro200ev.pdf>.
47. Commercial Vehicle India. Optare delivers Metrodeckers EVs. *Issu Inc*. [Online] listopad 2020. [Citace: 14. únor 2022.] Dostupné z: https://issuu.com/commercialvehicle/docs/cv_november_2020_digital/s/11296324.
48. CROTHERS, Brooke. This Chinese City Has 16,000 Electric Buses And 22,000 Electric Taxis. *Forbes Media LLC*, © 2022. [Online] 14. únor 2021. [Citace: 22. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/brookecrothers/2021/02/14/this-chinese-city-has-16000-electric-buses-and-22000-electric-taxis/?sh=34aca72b3a92>.
49. RALSTON, William. How Shenzhen turned all its 16,000 buses fully electric. *Wired*. [Online] © Condé Nast Britain 2022, 30. listopad 2020. [Citace: 23. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.wired.co.uk/article/shenzhen-electric-buses-public-transport>.
50. A. BERLIN, X. ZHANG, Y. CHEN. Case Study: Electric buses in Shenzhen, China. [Online] 2020. [Citace: 25. únor 2022.] Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Shenzhen.pdf>.
51. K8. *Cimex Inc.*, © 2022. [Online] 2018. [Citace: 8. únor 2022.] Dostupné z: <https://cimex.com.np/wp-content/uploads/2020/09/K8-compressed.pdf>.
52. K9. *Cimex Inc.*, © 2022. [Online] 2017. [Citace: 8. únor 2022.] Dostupné z: <http://cimex.com.np/wp-content/uploads/2020/09/K9-Brochure-compressed-.pdf>.
53. HINČICA, Libor. Elektrobusy SOR NS 12 electric v Hradci Králové. *Československý Dopravák* 2020. [Online] 2018. [Citace: 29. leden 2022.] Dostupné z: https://www.dpmhk.cz/common/cms_files/microsites/reklama/22-23_v%c4%9bt%c5%a1%c3%ad.pdf.
54. SOR EBN 8/EBN 9,5/EBN 11. *SOR Libchavy spol. s.r.o.* [Online] [Citace: 17. únor 2022.] Dostupné z: https://www.sor.cz/wp-content/uploads/2017/09/EBN_8-95-11_CZ_LoRes.pdf.

55. PAVLŮSEK, Ondřej. Elektrobuses SOR EBN 11 a jeho testování v Praze. [Online] 18. únor 2016. [Citace: 27. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.auto.cz/elektrobuses-sor-ebn-11-a-jeho-testovani-v-praze-93004>.
56. Elektrobuses se standardním dobíjením. ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [Online] [Citace: 18. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobuses-se-standardnim-dobijenim>.
57. SOR NS 12 electric. SOR Libchavy spol. s.r.o. [Online] [Citace: 28. leden 2022.] Dostupné z: https://www.sor.cz/wp-content/uploads/2019/11/NS_12_electric_CZ_NEW2_LoRes_23.10.2019.pdf.
58. Elektrobuses v BB Centru najely už přes 200 000 km a svezly přes 2 miliony pasažérů. Hybrid.cz. [Online] 15. září 2021. [Citace: 22. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/elektrobuses-v-bb-centru-najely-uz-pres-200-000-km-a-svezly-pres-2-miliony-pasazeru/>.
59. Další dva elektrobuses SOR EBN 9,5 zahájily pravidelný provoz v Praze. BusPress.cz. [Online] 3. únor 2016. [Citace: 4. leden 2022.] Dostupné z: <http://www.buspress.eu/dalsi-dva-elektrobuses-sor-ebn-95-zahajily-pravidelny-provoz-v-praze/>.
60. VACOVSKÝ, Marek. Praha nakoupí první elektrobuses standardní délky, vyrobí je Škoda Electric. fDrive.cz. [Online] 2. únor 2021. [Citace: 18. leden 2022.] Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/praha-nakoupi-prvni-elektrobuses-standardni-delky-vyrobi-je-skoda-electric-6490>.
61. Nové elektrobuses v ulicích Prahy. Dopravní podnik hl. m. Prahy a.s., © 2022. [Online] 21. únor 2022. [Citace: 10. leden 2022.] Dostupné z: https://www.dpp.cz/spolecnost/aktuality/detail/66_1562-nove-elektrobuses-v-ulicich-prahy.
62. Trutnov má nové elektrobuses a autobusy na CNG. Hybrid.cz. [Online] 5. únor 2019. [Citace: 28. leden 2020.] Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/trutnov-ma-nove-elektrobuses-autobusy-na-cng/>.
63. STACH, Matěj. Elektrobuses jako předzvěst nové éry MHD Písek. Československý dopravák 2020. [Online] 26. říjen 2020. [Citace: 14. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/elektrobuses-jako-predzvest-nove-ery-mhd-pisek/>.

64. VACOVSKÝ, Marek. Největší dodávka elektrobusů v ČR míří do Ostravy. *fDrive.cz*. [Online] 5. březen 2021. [Citace: 24. leden 2022.] Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/nejvetsi-dodavka-elektrobusu-v-cr-miri-do-ostravy-6671>.
65. Ekova Electron 12. *Dopravní podnik Ostrava a.s., 2019*. [Online] [Citace: 17. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.dpo.cz/o-spolecnosti/vozy/autobusy/3469-electron-12.html>.
66. SOR EBN 8 SOR EBN 10,5. *SOR Libchavy spol. s.r.o.* [Online] [Citace: 17. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.vlaky.net/upload/images/reports/004535/EBN8-10-a-8-1340107138.pdf>.
67. Ultimate. *The Polytechnic University of Catalonia, BarcelonaTech*. [Online] © UPC. [Citace: 28. duben 2022.] Dostupné z: <https://eultimate.upc.edu/>.
68. ZF CeTrax, it's time for series production. The central motor joins the electric axle AxTrax. *Sustainable Bus*. [Online] 20. květen 2020. [Citace: 10. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/components/zf-cetrax-its-time-for-series-production-electric-bus/>.
69. CeTrax System - Datasheet and Questionnaire. [Online] ZF Friedrichshafen AG. [Citace: 20. listopad 2022.]
70. 10 důvodů proč LiFEPO baterie nahrazují Pb baterie. *Prosolar*. [Online] [Citace: 20. listopad 2022.] Dostupné z: <https://www.prosolar.cz/novinky-blog/10-duvodu-proc-lifepo-baterie-nahrazuji-pb-baterie>.
71. MURDEN, Dave. LITHIUM NMC VS LIFEPO4 – HOW TO CHOOSE THE BEST ONE FOR YOUR NEEDS. *Eco Tree Lithium*. [Online] 20. říjen 2022. [Citace: 20. listopad 2022.] Dostupné z: <https://ecotreelithium.co.uk/news/lithium-nmc-vs-lifepo4/>.
72. Výroční zpráva. [Online] Dopravní podnik města Hradce Králové a.s., 2021. [Citace: 15. listopad 2022.] Dostupné z: https://www.dpmhk.cz/common/cms_files/Vyrocní_zprava_2021.pdf.
73. OppCharge. *AB Volvo 2022*. [Online] [Citace: 1. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.oppcharge.org/>.

74. E-bus/hydrogen bus. *Rampini Carlo S.p.A*, © 2018. [Online] [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: https://www.rampini.it/en/buses-specialty-vehicle_4/categorie/e-bus-hydrogen-bus-for-urban-public-transport_1/.
75. KLEINER, Henrich. SOR EBN 9,5 #659 v Hraniciach na Moravě. [Online] 11. duben 2020. [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: <https://imhd.sk/nr/galeria-media/u/13637/Hranice-na-Morave-11-4-2020/226170/SOR-EBN-9-5-659-v-Hraniciach-na-Morav%C4%9B?ref=nr%2Fgaleria%2Fu%2F13637%2FHranice-na-Morave>.
76. HEJNA, Petr. Elektrobus Škoda E'CITY. *DPP*. [Online] [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: https://www.dpp.cz/spolecnost/aktuality/detail/66_1562-nove-elektrobusy-v-ulicich-prahy.
77. ČERNÝ, Jiří. Elektrobus SOR EBN 8 v areálu vozovny Komín. *DPMB*. [Online] [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/2016-2-11-ulicemi-brna-jezd-elektrobus-typu-sor-ebn-8/>.
78. Pengiun9. Ekova Electron 12 v Ostravě. *Wikipedia*. [Online] 10. červenec 2019. [Citace: 4. duben 2022.] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ekova_Electron_12#/media/Soubor:Ekova_Electron_\(cropped\).jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ekova_Electron_12#/media/Soubor:Ekova_Electron_(cropped).jpg).
79. PAULRAJ, Pon. CHARGING BASICS 102: Electric Vehicle Charging Levels, Modes and Types Explained | North America Vs. Europe Charging cables and plug types. *E-Mobility Simplified*. [Online] 26. říjen 2019. [Citace: 18. duben 2022.] Dostupné z: <https://www.emobilitysimplified.com/2019/10/ev-charging-levels-modes-types-explained.html?m=1>.
80. *Mapy.cz*. [Online] [Citace: 6. listopad 2022.]

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pantografová konzole systému OppCharge s pantografem uloženým v konstrukci nabíjecí stanice (73).....	13
Obrázek 2 - Vybrané nabíjecí konektory (79).....	13
Obrázek 3 - Pantografová konzole systému OppCharge s pantografem dosedajícím na ližiny (73)	14
Obrázek 4 - Systém správy baterie (23)	20
Obrázek 5 - Elektrobuses Rampini E80 a E120 (74).....	25
Obrázek 7 - Elektrobuses eCitaro (40)	26
Obrázek 6 - Elektrobuses eCitaro G (40).....	26
Obrázek 8 - Elektrobuses MAN Lion's City 12 E (41).....	27
Obrázek 9 – BYD ADB Enviro400EV (45).....	28
Obrázek 10 - BYD ADB Enviro200EV (46).....	28
Obrázek 11 - Elektrobuses MetroDecker EV (47).....	29
Obrázek 12- Elektrobuses BYD K8 (51).....	30
Obrázek 13 - Elektrobuses BYD K9 (52).....	30
Obrázek 15 - SOR EBN 9,5 (75).....	31
Obrázek 16 - Škoda HE (56)	32
Obrázek 14 - SOR EBN 11 (55).....	32
Obrázek 17 - Elektrobuses SOR NS 12 electric (57).....	33
Obrázek 18 - konfigurace interiéru elektrobusesu SOR NS 12 electric (1).....	34
Obrázek 19 - Elektrobuses Škoda E'City (76)	35
Obrázek 20 - Elektrobuses SOR EBN 8 (77).....	35
Obrázek 21 - Elektrobuses Ekova Electron 12 (78).....	36
Obrázek 22 - Elektrobuses SOR EBN 10,5 (66).....	37
Obrázek 24 - Výškový profil linky č. 13 (80)	41
Obrázek 23 – Poloha zastávek zobrazená na jízdě vozidla číslo 030 v obou směrech linky ...	41
Obrázek 25 - Znázornění jízd v mapě	44
Obrázek 26 - Spotřeba elektrické energie vozidel.....	45
Obrázek 27 – Úroveň nabití baterie.....	47
Obrázek 28 - Průběh okamžitého výkonu – vyhlazení plovoucím oknem.....	50
Obrázek 29 - Průběh okamžitého výkonu – nevyhlazená data.....	51

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické parametry vozidla SOR NS 12 electric (57).....	33
Tabulka 2 - Parametry použité pro hodnocení vozidel.....	42
Tabulka 3 - Spotřeba elektrické energie obou vozidel	46
Tabulka 4 – Úroveň nabití baterie vozidla	48
Tabulka 5 - Přibližná využitelná kapacita baterie vozidel SOR NS 12 electric	48
Tabulka 6 – Počet obslužených cyklů linky č. 13 na jedno nabití baterie a počet potřebných nabití pro celodenní obsluhu linky	49
Tabulka 7 - Okamžitý výkon vozidel	51
Tabulka 8 - Souhrn porovnávaných parametrů z dat z měření.....	52

11 Seznam příloh

Příloha 1 - Zaznamenané parametry vozidel