ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Diplomová práce

Systémová analýza elektrobusu pro MHD

System Analysis of E-bus for Urban Transport

Bc. Šimon Sychra

Vedoucí práce: *doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.*

Studijní program: *Elektrotechnika, energetika a management*

Obor: *Elektroenergetika*

2016

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sychra** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **398621**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Systémová analýza elektrobusu pro MHD

Název diplomové práce anglicky:

System Analysis of E-bus for Urban Transport

Pokyny pro vypracování:

1) Proveďte rešerši problematiky a proveďte dopravní a energetickou analýzu provozu elektrobusu v městských podmínkách.
2) Analýzu zaměřte na konkrétní provozní situaci ve vybraném městě s počtem několika tisíc obyvatel.
3) Zaměřte se na specifické problémy provozu elektrobusu v cyklickém provozu s možností přerušovaného dobíjení během pracovní směny.

Seznam doporučené literatury:

[1] Lettl J., Čeřovský Z., Pavelka J. ? Výkonová elektronika, skripta ČVUT FEL
[2] Čeřovský, Z., Mindl, P.: Influence of Energy Production Technology on Electric Hybrid and Electric Vehicles. Příspěvek na konferenci EVER Monaco 2011
[3] http://parking.utexas.edu/transportation/ebus/
[4] JAZAR, Reza N. Vehicle dynamics: theory and application. 2nd ed. New York: Springer, 2014
[5] Larminie, J., Lowry, J.: Electric Vehicle Technology Explained, Second Edition, Wiley 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Mindl CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **12.12.2016** Termín odevzdání diplomové práce: 9.01.2017

Platnost zadání diplomové práce: 28.2.2018

Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.12.2016

Datum převzetí zadání | Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá důvody použití elektrických autobusů pro městskou dopravu a jejich aplikací v prostředí českých měst. Nahrazení naftových autobusů elektrobusy má pomoci dosáhnout cíle snížení CO_2, který si celý svět stanovil Pařížskou dohodou. Kapacita baterií však k plnohodnotnému nahrazení vozidel na spalovací pohon zatím není dostatečná. V práci jsou proto popsány možnosti dodatečného dobíjení během dne. Ekonomicky nejvýhodnějším způsobem dobíjení městských elektrobusů v českém prostředí se jeví dobíjení na konečných zastávkách. Autobusy zde mají pravidelné provozní přestávky, během kterých se může baterie dobíjet. Tento model je v práci dále detailněji popsán a je aplikován na studii provozu v Moravské Třebové. Pro tento účel je navržena trasa spojující odlehlé části města s velkou přepravní poptávkou s vlakovým nádražím ležícím na opačném konci města. Detailní jízdní řád je navržen tak, aby navazoval na odjezdy a příjezdy vlaků z/na nádraží. Pro tuto městskou linku je navržen konkrétní elektrobus a s ním je provedena energetická analýza průběhů nabíjení a vybíjení baterie. Závěrem práce jsou vypočteny ušetřené emise CO_2 použitím elektrobusu a také je zde proveden odhad celkových nákladů ve srovnání s naftovým autobusem stejných parametrů, oboje za dobu uvažovaného desetiletého provozu.

Klíčová slova

Elektromobilita, elektrobus, hromadná doprava, MHD, Moravská Třebová, elektrická trakce, baterie, zásobník energie, akumulátor, BMS (Battery management system), Pařížská dohoda, globální oteplování, CO_2, ekologická doprava.

Abstract

The thesis deals with reasons for the use of electric buses for urban transport and their application in Czech cities. Replacing diesel buses by electro buses is supposed to help the achievement of the CO_2 reduction, which the whole world established by the Paris Agreement. However, the capacity of batteries for this replacing is not sufficient at the moment. Therefore the thesis describes the options for an additional charge during the day. The most economical way of charging the urban electric buses in Czech environment seems to be charging at the final stops. There are buses regular operational pauses and during this time the battery can be recharged. This model is in the thesis described in detail and it is applied to the study of operation in Moravská Třebová. For this purpose there is a proposed route connecting remote part of the city (where is a big transport demand) with the train station situated on the other side of the city. Detailed timetable is designed to follow the departures and arrivals of trains to / from the station. For this urban line there is designed a specific electric bus with energetic analysis during charging and battery discharge. At the end of the thesis there are calculated CO_2 emissions by using electric bus and also there are estimated total costs which are compared with diesel bus of the same parameters, both for the period of ten years of operation.

Keywords

Electromobility, electric bus, public transport, urban transport, Moravská Třebová, battery, energy storage, accumulator, BMS (Battery management system), Paris Agreement, global warming, CO_2, green transport.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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 1. 1. 2017 .....

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Pavlu Mindlovi, CSc. za pedagogické vedeni mé diplomové práce. Dále děkuji svému kolegovi a konzultantovi Ing. Jiřímu Pohlovi za účinnou metodickou a odbornou pomoc a další cenné rady, které jsem v průběhu zpracování mé práce často využíval.

Obsah

Úvod *10*

1. Trendy v energetice, ochraně klimatu a ochraně životního prostředí *11*

1.1.1. Národní a evropské směřování 11

1.1.2. Národní akční plán – čistá mobilita 12

1.1.3. Integrovaný regionální operační program 12

1.1.4. Zero Emission Urban Bus System – ZeEUS 15

1.1.5. Pařížská dohoda 15

1.2. Trendy v dopravě 17

1.2.1. Význam hromadné dopravy 17

1.2.2. Kolejová doprava versus automobilová 17

1.2.3. Výhody elektrické trakce 18

1.2.4. Náhrada autobusu elektrobusem 18

1.2.5. Místo e-busu v osobní dopravě 19

1.2.6. Náhrada fosilních paliv elektřinou z obnovitelných zdrojů 20

2. Rešerše problematiky provozu elektrobusů 21

2.1. Základní zákonitosti vozidel polozávislé trakce 21

2.2. Význam vedlejší spotřeby v energetickém jízdním cyklu 25

2.3. Cena elektrické energie odebírané ze zásobníku 26

2.4. Parametry zásobníků elektrické energie 28

2.4.1. Lithium-iontová baterie (Li-Ion) 28

2.4.1.1. Typické parametry lithiové baterie 29

2.4.1.2. Omezující parametry 29

2.4.2. Lithium-železo-fosfátový akumulátor ($LiFePO_4$) 30

2.4.3. $LiFeYPO_4$ (Lithium – Železo – Ytrium – Fosfid) 30

2.4.4. Lithium–titanate battery ($Li_4Ti_5O_{12}$) 31

2.4.5. Vysokoenergetické kondenzátory 31

2.5. Způsoby dobíjení e-busu v MHD 34

2.5.1. Noční nabíjení 34

2.5.2. Noční a polední nabíjení 36

2.5.3. Nabíjení na konečných stanicích 37

2.5.4. Nabíjení na zastávkách 39

2.5.5. Kinematické nabíjení – parciální trolejbus 41

2.5.6. Automatizovaná výměna baterie 42

2.6. Způsoby připojení k nabíjecí infrastruktuře 43

2.6.1. Kabelem 44

2.6.2. Sběračem 45

2.6.2.1. Dvoupólové připojení 46

2.6.2.2. Více pólové s uzemněním 46

2.6.3. Bezkontaktní (indukční) 47

2.7. Prodlužovač dojezdu (Range Extender) 47

2.7.1. Palivový článek ... 48

2.8. Dimenzování zásobníku energie ... 49

2.8.1. Kapacita zásobníku ... 49
2.8.2. Výkon ... 49
2.8.2.1. Rozjezd ... 49
2.8.2.2. Rekuperace ... 50
2.8.2.3. Nabíjení ... 51
2.8.3. Provozní teplota baterie ... 53
2.8.4. BMS – Battery management system ... 53

3. Dopravně energetická analýza provozu elektrobusu na malém městě ... 55

3.1. Moravská Třebová ... 56

3.1.1. Přepravní poptávka ... 56
3.1.2. Návrh vedení linky ... 57
3.1.3. Návrh jízdního řádu ... 59
3.1.4. Parametry referenčního vozidla ... 60
3.1.5. Výpočet pracovního cyklu ... 61
3.1.6. Návrh vozidla a napájení ... 62
3.1.6.1. Siemens-Rampini ... 62
3.1.6.2. Elektrobus SOR ENB ... 63
3.1.6.3. Elektrické rozhraní ... 63

4. Zhodnocení provozu e-busu v Moravské Třebové ... 65

4.1. Ekologie provozu ... 65

4.1.1. Emise zdraví škodlivých plynů a částic ... 65
4.1.2. Emise oxidu uhličitého (CO_2) ... 66
4.1.3. Emise CO_2 z provozu e-busu v Moravské Třebové ... 67
4.1.4. Parametry ekvivalentního naftového autobusu ... 70
4.1.5. Emise CO_2 z provozu naftového autobusu ... 72
4.1.6. Ekologické srovnání provozu elektrobusu s autobusem ... 72

4.2. Ekonomie provozu ... 75

4.2.1. Cena za elektrickou energii ... 75
4.2.2. Cena za naftu ... 76
4.2.3. Srovnání nákladů na pořízení a provoz ... 77

Závěr ... 80

Použitá literatura ... 82

Seznam obrázků ... 84

Seznam tabulek ... 85

Seznam použitých zkratek ... 85

Příloha ... 86

Úvod

Při cestování a poznávání nových míst stále více obdivuji krásu přírody kolem nás. Bylo by nezodpovědné narušit naším nezodpovědným jednáním křehkou klimatickou rovnováhu. Líbí se mi proto současný trend začleňovat stále více přírody do měst a vize energeticky čistého města. Základní myšlenka je prostá. Používat co možná nejvíce energie spotřebované ve městě z nějakého čistého zdroje. Zdrojů je mnoho, ale elektřina je nejlepší formou této čisté energie pro použití v tak husté zástavbě, jakou jsou města. Za desítky let vývoje jsme se jí naučili využívat snad ve všech lidských činnostech. Také jí umíme čím dál lépe dopravovat na velké vzdálenosti, velice efektivně vyrábět, a také čím dál častěji vyrábět z čistých zdrojů energie. V mém pojetí čisté zdroje energie nejsou jen obnovitelné zdroje, ale jakýkoliv zdroj energie, který nemá negativní vliv na životní prostředí. Řadím sem proto i jadernou energii jak současně používanou ve štěpných reaktorech, tak i budoucí na principu termojaderné syntézy. Vyhořelé radioaktivní palivo sice pro nás představuje určitou hrozbu, ale pro přírodu jako takovou je neškodné. Osobně vidím jako důležitější nejprve nahradit spalovací elektrárny na uhlí či plyn nějakou jejich ekologickou variantou. Pak až v druhém kroku nahrazovat jaderné elektrárny.

Cílem mé práce ale není odpovědět na otázku, jak vyrábět elektřinu ze 100% čistých zdrojů. Tuto úlohu rád přenechám jiným. Pro účely této práce budu tiše předpokládat, že se tak dříve nebo později stane. Do té doby bychom se měli naučit co nejvíce využívat elektřinu i v oblastech, kde to doposud nebylo běžné. Zvláště tam, kde vzniká hodně zdraví škodlivých emisí, což je například doprava. V této práci si dávám za cíl prověřit a zhodnotit možnost náhrady klasických naftových autobusů jejich elektrickou variantou v městském provozu. To, že jsme z technického hlediska schopni vyrobit elektrobus poháněný energií z baterií, asi nikoho nepřekvapí. Když lidstvo chce, tak doletí i na Měsíc. Je ale takový elektrobus také prakticky použitelný pro běžný každodenní provoz? A jak vypadá ekonomická stránka věci? Nebylo by to příliš drahé? Na tyto a další otázky se pokusím postupně odpovědět. Pro účely ověření proveditelnosti provozu elektrobusu v MHD navrhnu v nějakém menším českém městě autobusovou linku, která by byla po celý den obsluhována pouze elektrobusy. Požadavky na takovou linku budu klást stejné, jako jsou kladené na linku s klasickými autobusy. Na závěr chci provést ekologické a i částečně ekonomické srovnání provozu elektrobusu a naftového autobusu.

1. Trendy v energetice, ochraně klimatu a ochraně životního prostředí

Notoricky známý zákon zachování energie platí i v případě spalování fosilních uhlovodíkových paliv – uhlí, nafty i zemního plynu. To znamená, že uhlík, který je v nich obsažen, se nikam při spalování neztrácí. Pouze se přesouvá z podzemí, kde byl léta uskladněn v podobě geologických zásob, na oblohu ve formě oxidu uhličitého (CO_2). Ještě v době předindustriální bylo v atmosféře zhruba 3 500 miliard tun CO_2. Poté, co lidská společnost začala hojně spalovat uhlí, následně ropné produkty a zemní plyn, začala koncentrace CO_2 v zemském obalu narůstat. A nejde o malé množství. Jen za rok 2015 přibylo v atmosféře dalších 32 miliard tun CO_2 a celkově dosáhlo hodnoty 5 000 miliard tun. Právě tomuto razantnímu zvýšení množství oxidu uhličitého v atmosféře se připisuje oteplení Země o cca 1 °C od předindustriální doby. Další zvýšení o jediný stupeň už začne přinášet velké klimatické problémy. Rozhodně bychom tuto hodnotu neměli překročit. Pokud bychom své energetické chování nezměnili a i v dalších letech pálili uhlí, ropu a zemní plyn stejným tempem jako minulý rok, máme před sebou už jen 47 let energetického blahobytu. Pokud nemá být oteplení Země zvýšeno nad zmíněnou hodnotu, nesmíme pak již spálit ani kousíček uhlí, ropy či plynu, nic. Nevyčerpané geologické zásoby se promění v neprodejné zbytky. Nezapomínejme ale také na fakt, že i když by lidstvo již po tomto limitu nevyprodukovalo ani molekulu skleníkových plynů, tak jejich uvolňování přirozenou cestou bude pokračovat. Nejvíce nám dělá vrásky metan (CH_4), který se začíná uvolňovat z rozmrzajících permafrostů. Navíc metan je 20x účinnější skleníkový plyn než oxid uhličitý. Čím bude tepleji, tím více se bude CH_4 přirozeně uvolňovat do atmosféry. Tomuto jevu již nijak zabránit nedokážeme, a jakmile překročíme bod zvratu, tak už nebude v našich silách s následujícími událostmi cokoliv udělat. O to více je důležité naše chování rychle změnit. Zažíváme energetický blahobyt, kdy na každého občana České republiky připadá denně 102 kWh spotřeby fosilních paliv. To znamená, že každému z nás někde hoří ohýnek o výkonu přes 4 kW. [1] Jak si zachovat tento energetický přepych a přitom nenarušit křehkou klimatickou rovnováhu? V Evropě i po světě se touto problematikou vlády již nějaký čas zabývají. Uvedu zde několik hlavních aktivit týkající se především Evropy či České republiky.

1.1.1. Národní a evropské směřování

Evropská unie vydává pro své členské státy návrhy na součinnost v určité oblasti, např. v sociální oblasti, politice či dopravě. Tyto návrhy se označují jako tzv. bílé knihy. Z důvodu zvětšujících se klimatických změn, které jsou s největší pravděpodobností zapříčiněné činností lidstva, vydala EU v březnu roku 2011 Bílou knihu o dopravě. Změny klimatu jsou připisovány hlavně vypouštění skleníkových plynů do ovzduší (převážně CO_2). V tomto dokumentu nazvaném celým jménem „BÍLÁ KNIHA – Plán jednotného evropského dopravního prostoru – vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje“ [4] se EU zaměřuje na dopravu, protože je to jeden z největších producentů CO_2. Tento dokument ale není pro členské státy závazným, nýbrž má pouze doporučující a informační povahu. Upozorňuje se zde však na omezenost energetických zdrojů a závislost Evropy na

těchto zdrojích a naznačuje se další směřování evropského společenství v následujících 30 letech.

Cíle této Bílé knihy lze obecně a stručně popsat těmito body:

- neomezovat, ale naopak rozvíjet mobilitu, která je nedílnou součástí hospodářského, společenského i rodinného života
- zbavit mobilitu závislosti na kapalných uhlovodíkových palivech, které v současnosti pokrývají 96 % energie pro dopravu v EU
- zvýšení energetické účinnosti vozidel u všech druhů dopravy
- spotřebovávat méně energie, používat čistší energie a zlepšit efektivitu ve využívání stávající i nově budované dopravní infrastruktury
- snížit produkci CO_2 dopravou o 20 % do roku 2030 a o 70 % do roku 2050 v porovnání s výchozí úrovní z roku 2008
- postupně omezovat (až zakázat) vjezd vozidel s konvenčním palivem do center měst do roku 2050.

1.1.2. Národní akční plán – čistá mobilita

Národní akční plán čisté mobility (dále NAP CM) je jeden z nelegislativních úkolů Ministerstva průmyslu a obchodu. Dává si za cíl zajistit transpozici směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/94/EU o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva do právní úpravy ČR. NAP CM se zabývá elektromobilitou, CNG, LNG a rovněž vodíkovou technologií. Snaží se podpořit primární technologie, které jsou v současnosti na prahu plného komerčního využití. NAP CM má napomoci naplnit tyto základní energetické, environmentální a dopravně-politické cíle:

- snížení negativních dopadů dopravy na životní prostředí, zejména pokud jde o emise látek znečišťujících ovzduší a emise skleníkových plynů
- snížení závislosti na kapalných palivech, diverzifikace zdrojového mixu a vyšší energetická účinnost v dopravě.

Cíle NAP CM jsou v souladu rovněž se Státní politikou životního prostředí. Dokument byl schválen 20. 11. 2015 a bude každé tři roky aktualizován. [5] Do tohoto národního plánu dobře zapadá i činnost Evropské unie, která poskytuje dotace z fondu pro regionální rozvoj v rámci Integrovaného regionálního operačního programu (IROP).

1.1.3. Integrovaný regionální operační program

Národním orgánem pro koordinaci čerpání finančních prostředků z EU je Ministerstvo pro místí rozvoj. Evropská unie má několik strukturálních a investičních fondů. Jedním z nich je Evropský fond pro regionální rozvoj. Program pro čerpání finančních prostředků z tohoto fondu se nazývá Integrovaný regionální operační program, zkráceně IROP, který byl schválen Evropskou komisí 4. června 2015. Čeští žadatelé z něj mohou získat, započítáme-li národní spolufinancování (15 %), přibližně 144 miliard korun. IROP je široce zaměřený program směřující k vylepšení kvality života v různých částech České republiky formou podpory rozvoje konkurenceschopnosti, infrastruktury, veřejné správy a dalších oblastí. Struktura IROPu je následující:

- **Prioritní osa 1 – Infrastruktura**
  - Konkurenceschopné, dostupné a bezpečné regiony
    - **Doprava, integrované dopravní systémy**
  - Alokace 1,6 mld. EUR
- Prioritní osa 2 – Lidé
- Prioritní osa 3 – Instituce
- Prioritní osa 4 – Komunitně vedený místní rozvoj.

Pro jednotlivé prioritní osy se stanovují specifické cíle. Protože se v této práci zaměřuji na bezemisní hromadnou dopravu, podíváme se blíže na prioritní osu 1 – Infrastrukturu a na její specifický cíl *1.2 – Zvýšení podílu udržitelných forem dopravy.*

- **Prioritní osa 1** – Infrastruktura
  - SC 1.1 Zlepšení infrastruktury železniční dopravy
  - **SC 1.2 Zvýšení podílu udržitelných forem dopravy**
    - Alokace 473 mil. EUR z ERDF, cca 15 mld. Kč včetně národního kofinancování
  - SC 1.4 Infrastruktura městské drážní dopravy
  - ...

SC 1.2 Zvýšení podílu udržitelných forem dopravy:

Cíle

- posílit přepravní výkony veřejné dopravy
- snížit zátěže plynoucí z individuální automobilové dopravy (IAD)
- rozvinout vozový park městských autobusů s alternativním pohonem
- zajistit bezpečnost a bezbariérovost dopravy v zájmu zvýšení podílu udržitelných forem dopravy
- ...

Aktivity

- bezpečnost dopravy
- cyklodoprava
- **nízkoemisní a bezemisní vozidla**
- telematika pro veřejnou dopravu
- terminály a parkovací systémy

Územní zaměření podpory

- celé území ČR mimo území hl. m. Prahy.

V rámci specifického cíle 1.2 byla v lednu 2016 vyhlášena **výzva č. 20 – Nízkoemisní a bezemisní vozidla** (alokace 1,4 mld. Kč). Výzva je zaměřena na podporu projektů v následujících aktivitách: nákup silničních nízkoemisních vozidel využívajících alternativní palivo CNG nebo LNG, nákup silničních bezemisních vozidel využívajících alternativní palivo

elektřinu nebo vodík a nákup drážních vozidel městské dopravy (tramvají nebo trolejbusů) pro zajištění dopravní obslužnosti podle smlouvy o veřejných službách v přepravě cestujících.

Termín příjmu žádostí byl od 21. 1. do 29. 7. Vyhodnocení všech žádostí v době psaní této práce ještě nebylo ukončeno. O tyto dotace byl velmi velký zájem. Celkový finanční objem 36 předložených žádostí v procesu hodnocení činí 4 063 608 050 Kč, což představuje trojnásobek alokace výzvy. [6]

Výzva byla z mého pohledu trochu nešťastně zaměřená. V ČR byly do výzvy zahrnuty i nízkoemisní vozidla, což jsou v praxi převážně autobusy na CNG (Compressed Nature Gas – stlačený zemní plyn). Motory na CNG mají prokazatelně menší emise škodlivých plynů, jako jsou například oxidy dusíku (NOx), oxidu uhelnatého (CO), oxidu siřičitého (SO_2), reaktivní uhlovodíky (HxCx) a jemného prachu. Bohužel o snižování CO_2 se zde příliš mluvit nedá. CNG je uhlovodíkové palivo a i při dokonalém spalování se uhlík obsažený v palivu nikam ztratit nemůže. Uhlík se při spalování sloučí s kyslíkem za vzniku molekuly CO_2. Pokud přijmeme fakt, že změna klimatu v důsledku nadměrné produkce CO_2 může způsobit masivní migrační vlny obyvatel a války o jídlo či obyvatelné území, jsou emise CO_2 mnohem závažnější, než ostatní výše zmiňované škodlivé emise, které způsobují "pouze" zdravotní problémy.

Snížení emisí použitím CNG oproti naftě:

- SO_2 – 100 %
- HxCx – 80 %
- NOx – 80 %
- CO – 50 %
- jemné prachové částice oproti EURO V – 50 %
- **CO_2 – pouze 10 %.**

Pohon na CNG má určitě pozitivní ekologický přínos, ale dle propočtů v návaznosti na Pařížskou dohodu by se uhlovodíková paliva měla do roku 2060 úplně přestat používat. Tedy snížení produkce CO_2 ne o 10 %, ale o 100 %! Investice do nových CNG autobusů z tohoto hlediska nemá moc logiku, přitom ale mnohonásobně převyšují investice do čistě bezemisních elektrobusů. Technika elektrobusů je přitom, jak dokazuji v této práci, již dostatečná pro nasazení do plného provozu. Stále je v rozhodnutí politiků cítit lobby jiných zájmů. Malou útěchou může být technologie výroby syntetického metanu (zemního plynu) z obnovitelných zdrojů. Po Evropě již funguje několik testovacích provozů. Je to zároveň jedna z cest, jak dočasně ukládat tuto zelenou energii. Autobusy na CNG by se díky tomu přeci jen časem mohly zapojit do udržitelné dopravy s CO_2 neutrálním cyklem. I když takový autobus bude ve městě stále hlučet a vlivem nedokonalosti spalování bude zdrojem škodlivých emisí (byť v menší míře). S napětím očekávám vyhlášení výsledů výzvy č. 20, které nám prozradí, kolik peněz z celkového množství 1,4 mld. Kč poputuje na pořízení elektrických autobusů a kolik na pořízení CNG autobusů.

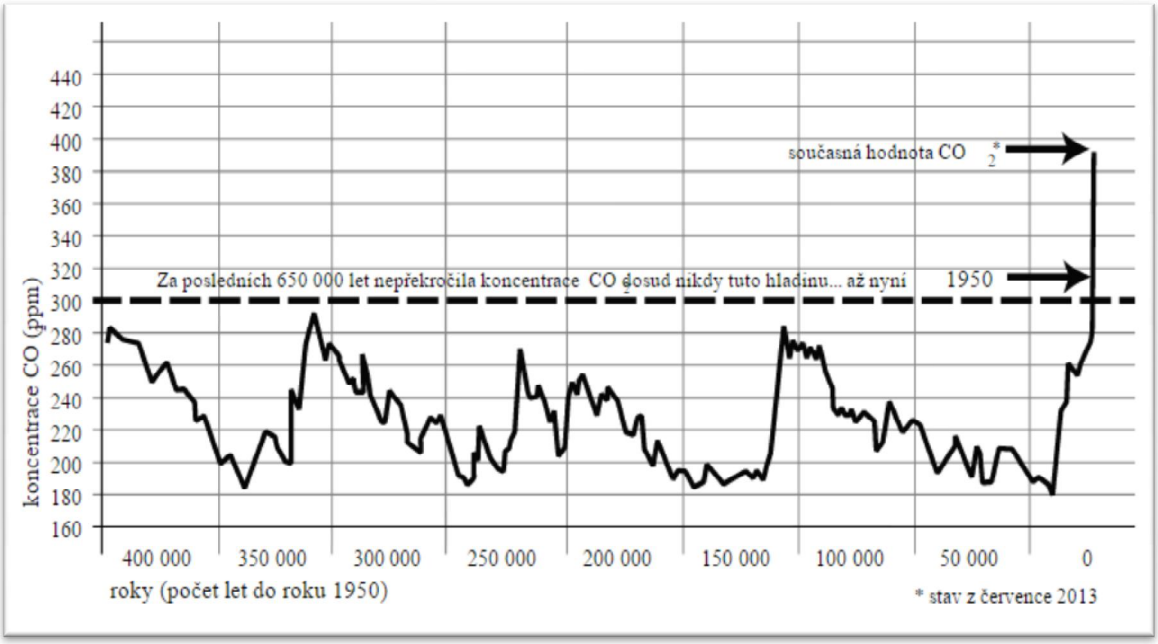
1.1.4. Zero Emission Urban Bus System – ZeEUS

Zero Emission Urban Bus System (ZeEUS), je evropský inovační projekt městských autobusů s nulovými emisemi koordinovaný Mezinárodní unií veřejné dopravy – UITP. Během tohoto 3,5 letého projektu budou demonstrována různá inovativní technologická řešení pro elektrobusy a jejich dobíjecí infrastruktury. Projekt byl slavnostně zahájen 23. ledna 2014 a zapojilo se do něj osm evropských měst, mezi nimi i západočeské město Plzeň. Výsledky z těchto demonstračních provozů budou použity jako návod pro rozvoj elektrobusů v ostatních evropských městech. V testovacích provozech se objeví jak čistě elektrobusy, tak i plug-in hybridní autobusy. Partnery jsou nejen dopravní podniky, ale také výrobci, energetické společnosti, výzkumná pracoviště a školy. V ČR jsou partnery projektu ZeEUS Škoda Transportation, Plzeňské městské dopravní podniky, Plzeňská teplárenská a Západočeská univerzita. V rámci tohoto projektu budou v letech 2015-2017 nasazeny dva bateriové autobusy Škoda PERUN HP doplněné rychlodobíjecí stanicí ŠKODA na autobusových linkách č. 27 a 33. Rozpočet projektu dosahuje 22,5 mil. €, z čehož 13,5 mil. € jsou dotace EU. [7]

1.1.5. Pařížská dohoda

Změny globálních teplot vždy přinášely výrazné klimatické změny, které by dnes měly fatální vliv na lidskou společnost, tak jak ji známe dnes. Když došlo v minulosti ke zvýšení teploty o pět stupňů Celsia, tak se hladiny oceánů zvedly o více než 100 metrů a vždy tyto změny trvaly tisíce let. V současnosti se nacházíme v době meziledové a před příchodem průmyslové revoluce globální teploty opravdu mírně klesaly. V nadcházejících tisíciletích by došlo k nastoupení nové doby ledové. *"Nejnovější studie dokazují, že my jsme tento trend zvrátili a že příchod další doby ledové v dalších minimálně padesáti až stech tisících letech nehrozí," tvrdí* Alexander Ač, respektovaný odborník na klimatické změny. [8]

Měření z mnoha tisíc meteorologických stanic rozmístěných po celém světě nám jasně ukazují, že za posledních více než 120 let se průměrná globální teplota zvýšila asi o jeden stupeň Celsia. Což je na tak krátkou dobu extrémně rychlá změna. Rok 2014 byl rekordně teplý, po něm i rok 2015 a také letošní rok atakuje rekordní hodnoty. Současné oteplování způsobuje zvýšený skleníkový efekt, který je úměrný množství skleníkových plynů v atmosféře. Samotný skleníkový jev není nikterak špatný, naopak, vděčíme mu za naše příjemné teplé podnebí. Dominantním skleníkovým plynem rovněž není CO_2, nýbrž vodní pára, která se podílí na výsledném efektu z více než 60 %. [9] Problém v současnosti nastává ale velkým zvýšením skleníkového jevu, který je již prokazatelně způsoben výrazně narůstající koncentrací CO_2 v atmosféře, jak ukazuje následující graf.



Obr. 1.1 Koncentrace atmosférického CO_2 za posledních 650 tisíc let. [10]

Tyto hodnoty jsou již natolik průkazné, že pomalu již celý svět začíná uznávat výrazný vliv lidské činnosti na globálním oteplování. Protože si lidstvo jako celek konečně uvědomuje palčivost tohoto problému, začíná se konečně efektivně jednat. Jedním z důkazů je uzavření takzvané Pařížské dohody.

V prosinci roku 2015 se v Paříži konala klimatická konference, na níž byla dojednána dohoda o snižování emisí skleníkových plynů. Podepsána byla 22. dubna 2016 (Den Země) celkem 177 členskými státy, z nichž 15 ji hned ratifikovalo[1]. Tato dohoda si dává za cíl udržet vzestup globální průměrné teploty pokud možno o 1,5 °C nad předindustriální úroveň, maximálně ovšem o 2 °C. Jen připomenu, že ke zvýšení o 1 °C již došlo, takže zbývá pouhý 0,5 °C, respektive 1 °C! Dohoda ukládá všem smluvním stranám povinnost stanovit si vnitrostátní redukční příspěvky a plnit je. Česká republika se jako člen EU zavázala společně s ostatními členskými státy EU společně snížit do roku 2030 emise GHG[2] o 40 % ve srovnání s rokem 1990. Dohoda vstoupí v platnost 30. den po uložení ratifikačních listin nejméně 55 smluvních stran rámcové úmluvy, jejichž celkové emise skleníkových plynů představují 55 % globálních emisí skleníkových plynů. Tohoto klíčového okamžiku bylo nedávno dosaženo. K 13. říjnu 2016 dohodu podepsalo již 190 států a 79 z těchto států dohodu ratifikovalo. Těchto 79 zemí reprezentuje 60,1 % globálních emisí. Nejvýznamnější z těch, kteří ratifikovali, jsou Čína, Spojené státy americké a Indie, země s třemi největšími emisemi skleníkových plynů ze všech signatářů (asi 42 % dohromady). Pařížská klimatická dohoda tedy vstoupila v platnost 4. listopadu 2016. [11] Barack Obama na konferenci v Paříži v emotivním projevu řekl: *„Jsme první generace, která vážně pociťuje důsledky změn klimatu, a poslední, která ještě může běh událostí citelně ovlivnit.“*

[1] Ratifikace – závazné potvrzení platnosti zvláště důležitého dokumentu.
[2] Greenhouse gas – skleníkový plyn.

1.2. Trendy v dopravě

Doprava v ČR je z 97 % závislá na uhlovodíkových palivech! Zbylá 3 % zajišťuje elektrická trakce, která ale přitom zajišťuje 18 % přepravních výkonů osobní dopravy a 20 % přepravních výkonů dopravy nákladní. Kde se bere taková vysoká efektivnost? Je to dáno kombinací dvou skutečností:

1. Ve spalovacích motorech se pouze jedna třetina energie proměňuje v mechanickou práci. Zbylé dvě třetiny se ztrácí ve formě tepla. Na druhou stranu elektromotor má účinnost přes 90 %, což znamená, že využívá vstupní energii 2,5 krát lépe.
2. Elektřinu jako zdroj energie pro dopravu využíváme především v kolejové dopravě, zejména na železnici. Ta má oproti silniční dopravě výhodu v nízkém valivém odporu (ocelová kola) a v nízkém aerodynamickém odporu (využívání jízdy vozidel v zákrytu). Díky těmto aspektům dosahuje při stejné přepravní práci pouze třetinové trakční spotřeby energie oproti dopravě automobilové.

Výsledkem těchto dvou skutečností (2,5 krát vyšší účinnost a 3 krát nižší trakční odpor) je 7,5násobná spotřeba energie v silniční automobilové dopravě ve srovnání s elektrickou železnicí. Neznamená to, že bychom neměli používat automobily či autobusy, ale využít přednosti železniční dopravy tam, kde je to vhodné.

1.2.1. Význam hromadné dopravy

Osobní automobil je nejčastěji používán pro dopravu osob do práce a z práce. Jde přitom často jen o jednu osobu, která se potřebuje přepravit z místa bydliště do zaměstnání, kde automobil odloží a věnuje se své práci. Průměrný automobil je v České republice využíván denně méně než půl hodiny. To znamená, že zbylých 23,5 hodin denně někde překáží.

Pro řidiče autobusu je řízení jeho zaměstnáním a navíc po skončení své pracovní doby předá autobus svému kolegovi. Autobus, tramvaj či jiný hromadný dopravní prostředek, může být proto v provozu dvacet nebo i více hodin denně.

Individuální automobilová doprava má určitě své uplatnění, ale nemůže být nosným trendem mobility. Jak z hlediska energetických úspor, tak i z hlediska snížení škodlivých emisí, je základem úspěšné aplikace čisté mobility orientace na hromadnou dopravu.

1.2.2. Kolejová doprava versus automobilová

Elektrická železnice má mnohem nižší spotřebu energie než automobilová (asi 7x). Není dobré ale tuto skutečnost interpretovat jako souboj dvou přepravních módů. Spíše je potřeba ji vnímat jako návod ke spolupráci. Pro dlouhé a pravidelné přepravy je výhodné využít kolejové dopravy, protože má výrazně nižší energetické nároky, ale její vybudování je zase na druhou stranu nákladné. Čím je systém provozně úspornější, tím je investičně nákladnější. V městské dopravě je to dobře vidět například na metru, které je jednoznačně nejnákladnější na vybudování, ale pak v provozu má nejnižší spotřebu ze všech druhů městské dopravy. Investice do rekonstrukce či nových tramvajových tratí v Praze v letech 2011-2015 činily průměrně 590 mil. Kč ročně. Zatímco se investice do metra pohybovaly v částkách 3-4 mld. Kč za rok.

Metro se zdá drahé ale jen do té chvíle, než se podíváme na provozní náklady. V roce 2015 byla spotřeba trakční práce na jeden vozový kilometr u metra 1,97 kWh oproti tramvaji 2,9 kWh [12]. Ekonomické výhody metra se oproti tramvaji projeví až od určitého přepravního výkonu. Stejným způsobem se dá srovnávat autobusová doprava s tramvajovou. Autobus je konstrukčně jednodušší a především používá již existující infrastrukturu vybudovanou pro automobilovou dopravu. Z toho plynou minimální investiční náklady (pouze garáže a zastávky). Z důvodu vysokého valivého odporu a nízké účinnosti spalovacího motoru jsou zde ale vysoké provozní náklady.

Tyto důvody vedou jednoznačně k použití kolejové dopravy (metro, tramvaj či vlak) na místech vysoké přepravní poptávky. Tam, kde se nevyplatí tyto dopravní systémy budovat, se použijí silnice. Tedy autobusy, případně trolejbusy.

1.2.3. Výhody elektrické trakce

Výhoda elektrické trakce spočívá v její účinnosti. Elektrický motor má oproti spalovacímu protějšku o mnoho větší účinnost přeměny vstupní energie na mechanickou práci. Elektrický motor je schopen přeměnit až 90 % energie v porovnání s 30 % motoru spalovacího.

Druhou velkou výhodou je možnost využít elektrický motor jako generátor, který při brzdění vozidla přeměňuje kinetickou energii zpátky na elektrickou. Tato výhoda se projevuje hlavně tam, kde je hodně zastávek, neboli tam, kde se často brzdí (kde se maří kinetická energie). Soupravy metra jezdící na trase C dokážou vrátit při zastavení do sítě až 52 % energie spotřebované při rozjezdu a jízdě do následující stanice. Převážně díky této rekuperaci má moderní metro M1 na lince C elektrickou spotřebu 8 kWh/km oproti starší vlakové soupravě typu 8171 se potřebou 13 kWh/km.

Politickou výhodou elektrické trakce může být zajištění energie pro dopravu z vlastních zdrojů. ČR je velkým exportérem elektřiny. Dle výroční zprávy o provozu naší energetické soustavy bylo za rok 2015 exportováno 16,3 TWh elektrické energie [42], což představuje přibližně 22 % naší produkce. Celková spotřeba trakční energie v Praze (metro, tramvaje) za rok 2015 činila při porovnání pouze 0,2 TWh [12]. I kdyby veškerá doprava v ČR byla zajišťována pomocí elektrické energie, stále bychom dokázali tuto zvýšenou spotřebu uspokojit z vlastních zdrojů. Elektřina je u nás vyráběna především z uhlí a z jádra. Uhlí máme na našem území dostatek a palivo pro jaderné elektrárny se doplňuje pouze jednou ročně (čtvrtina z celkového množství v reaktoru). Používání elektrické trakce je tedy výhodné také z pohledu národní bezpečnosti.

1.2.4. Náhrada autobusu elektrobusem

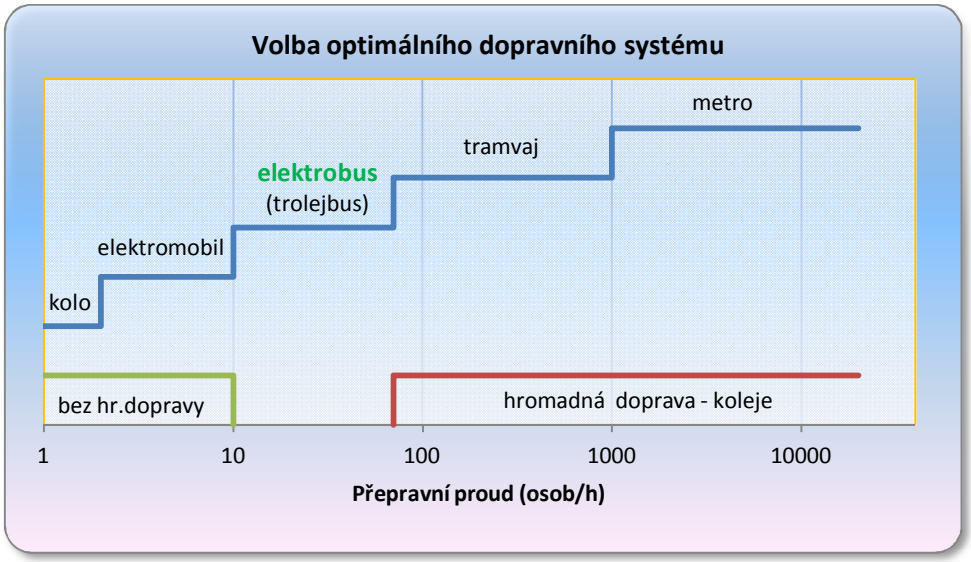
Nesporné výhody elektrické trakce byly vysvětleny v předchozích kapitolách. Většina hromadné dopravy již elektrický pohon používá. Dokonce i autobusy byly vybaveny elektrickým pohonem a byly připojeny k trolejím (trolejbusy). Velká nevýhoda trolejbusů je právě ve zmiňovaném trolejovém vedení. Oproti tramvajovému trolejovému vedení s jedním vodičem zde potřebujeme vodiče dva, což komplikuje samotnou instalaci nad vozovku, zejména v případě křížení dvou obousměrných linek. Takováto křižovatka vypadá nevzhledně, nemluvě o množství upevňovacích míst často připevněných na fasády okolních budov. Toto řešení je sice funkční a v mnoha městech praktikované, ale má stále velké omezení jako mají tramvaje,

a tím je předem daná trasa s vybudovanou infrastrukturou. Autobusy mají v dopravě své nezastupitelné místo v případě nenadálých událostí a na trasách s menší přepravní poptávkou. Také v historických centrech, kde je zadrátování dvojitou trolejí nemyslitelné. Rachotící a zapáchající autobus ale také není příliš dobrým řešením. Naštěstí technika a vývoj pokročily a začínají se objevovat elektrické autobusy s bateriemi, které spojují výhody elektrické trakce s operativní přizpůsobivostí autobusů.

Největší komplikace e-busu jsou baterie. Jejich malá kapacita má negativní vliv na dojezd, váhu a cenu vozidla. Zjednodušeně řečeno, elektrické autobusy se již dají provozovat v městské hromadné dopravě, jsou ale drahé, těžké a daleko bez pravidelného dobíjení nedojedou. Další výhody a nevýhody elektrických autobusů a problematika jejich provozu bude podrobně komentována v následujících kapitolách.

1.2.5. Místo e-busu v osobní dopravě

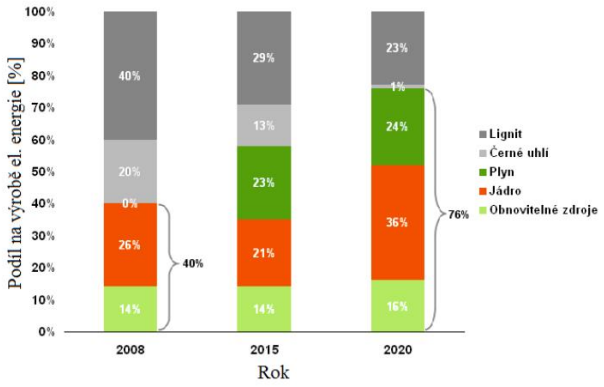
Budovat koleje má smysl v místech, kde je přepravní poptávka alespoň 80 osob za hodinu. Poptávka menší než 10 osob za hodinu bude odkázána na individuální dopravu. Prostor mezi těmito hranicemi je doménou právě pro elektrobus, případně trolejbus. Samozřejmě existují přesahy. Pár osob za hodinu může odvážet malý 8m autobus, nebo stovky osob může odvážet velký kloubový, případně dvoukloubový 25m autobus, jak tomu je na trase Nádraží Veleslavín – Letiště Václava Havla. Provoz takto dlouhého autobusu je vyžádán nestandardní situací, kdy zatím neexistuje na této trase adekvátní kolejová doprava. Je jasné, že vybudování metra či rychlodráhy vedoucí na letiště je více než smysluplné. Provoz autobusů má primárně obsluhovat menší sídliště a dovážet obyvatele na metro či tramvajovou linku.



Obr. 1.2 Volba dopravního systému dle přepravního proudu

1.2.6. Náhrada fosilních paliv elektřinou z obnovitelných zdrojů

K zesilování skleníkového jevu dochází převážně z důvodu rostoucí koncentrace CO_2 v atmosféře. Jedním ze zdrojů tohoto plynu je spalování fosilních paliv. Uhlík v nich obsažený se přesouvá z podzemí na oblohu právě ve formě CO_2. Za rok 2015 přibylo v atmosféře 32 mld. tun CO_2. Jeden litr nafty váží sice pouze 0,84 kg, ale při jeho spálení se vyprodukuje 2,65 kg CO_2. Při spalování totiž dochází ke sloučení jednoho atomu uhlíku (atomární hmotnost 12) s dvěma atomy kyslíku (atomární hmotnost 16) za vzniku molekuly oxidu uhličitého (mol. hm. 44). Poměr hmotností CO_2 ku C je 44/12, což znamená že molekula oxidu uhličitého je 3,67 krát těžší než samotný atom uhlíku obsažený v palivu. Žádny filtr, přísada do paliva či jiná konstrukce motoru tuto úměru nemůže změnit. Cestou k zastavení růstu CO_2 v atmosféře (potažmo oteplování), je zcela zamezit používání fosilních paliv. Dobrou náhradou může být elektřina, ovšem za podmínky, že bude vyráběna 100% z obnovitelných zdrojů, případně z jádra. Při současném českém energetickém mixu se při výrobě každé kilowatthodiny elektřiny vyprodukuje přibližně 0,59 kilogramu oxidu uhličitého. Zvyšováním podílu obnovitelných zdrojů bude tato hodnota postupně klesat. Vzhledem ke geografické poloze České republiky bohužel není pro další rozšiřování vodní, větrné či solární energie příliš velký prostor. Jaderná energetika bude proto u nás při snižování produkce CO_2 hrát důležitou roli. Dostavba 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Temelín bude z tohoto důvodu nejspíš nezbytná. Podíl jednotlivých druhů zdrojů energie na celkové výrobě elektrické energie skupiny ČEZ s výhledem do roku 2020 ukazuje následující obrázek.



Obr. 1.3 Energetický mix skupiny ČEZ, převzato z [31]

2. Rešerše problematiky provozu elektrobusů

Průměrný automobil najede denně 20 až 30 km. Nahradit ho elektrickou variantou společnosti (potažmo ekologii) moc nepřinese. Po většinu času není v provozu a pouze zabírá místo. Navíc je to dosti drahé zařízení, ale tato problematika se snadno řeší. Stačí dát do automobilu místo motoru mnohem jednodušší a spolehlivější zařízení – elektromotor, a místo nádrže elektrickou baterii (zjednodušeně řečeno). Pro dojezd 30 km není potřeba nijak velká baterie. Dokonce ani dojezd 500 km již není technický problém, jak se mnozí lidé domnívají. Je zde ale ekonomický aspekt, bránící masovému prodeji takových elektromobilů. Samotná baterie schopná dodat energii pro dojezd 500 km bude stát i tři čtvrtě milionu korun. Pokud pomineme ekologii, tak výhoda elektromobilu je v jeho nízkých provozních nákladech. Ve srovnání s velmi vysokou pořizovací cenou vychází jednoznačný závěr. Elektromobil musí hodně jezdit, aby jeho výhody z provozu vyrovnaly nevýhodu v podobě ceny. Tuto podmínku velice dobře splňuje hromadná doprava, kde by úspory provozních nákladů e-busu mohly vyrovnat jeho vyšší pořizovací cenu, nehledě na ekologický přínos.

Běžný autobus v městské dopravě najede za den 200 až 300 km a spálí 90-135 litrů nafty. Za rok to může být až 40 tun nafty. Výměna byť jednoho klasického autobusu za elektrickou variantu přináší již nezanedbatelné snížení emisí v oblastech s velkou hustotou zalidnění. Přínos elektrického autobusu je velký, ale řešení provozu již není tak triviální jako v případě osobního elektromobilu. Baterie o dostatečné kapacitě pro celodenní provoz svými rozměry i hmotností přesahuje únosnou mez. Baterii je proto nutné dobíjet nejen během noci, ale i během dne. To je ale v rozporu s provozními požadavky i s požadavky na ekonomickou návratnost. Elektrobus má především co možná nejvíce převážet cestující. Každá zbytečná zastávka kvůli nabíjení je nežádoucí. Problematika průběžného nabíjení i ostatní aspekty provozu elektrobusu v městské hromadné dopravě budou podrobně probrány v následujících kapitolách.

2.1. Základní zákonitosti vozidel polozávislé trakce

Hlavním požadavkem na autobus je přepravovat cestující bez zbytečných technických přestávek, jako je například doplňování paliva. Naftový autobus tento požadavek bez problému splní. Stačí před započetím jízdy natankovat plnou nádrž, ve které je pak dostatek energie pro celodenní provoz. Stejný požadavek je přirozeně kladen i na elektrobus, kde je ale bohužel situace méně příznivá. Přirovnal bych situaci k raketoplánu, kde byl jasný požadavek, vynést na oběžnou dráhu určité množství nákladu. Ke splnění tohoto požadavku je zapotřebí velké množství energie v podobě pevného či kapalného paliva. Jenže palivo samo o sobě má velkou hmotnost a je zapotřebí dalšího velkého množství paliva, aby ho bylo možné vzít s sebou. Ve výsledku celkovou hmotnost raketoplánu tvoří převážně palivo a přepravovaný náklad je zanedbatelný. Podobnou analogii nalezneme u elektrobusu, kde je prvotním požadavkem dojezd. Pokud bychom chtěli vyrobit elektrobus s dojezdem 600 km, potřebovali bychom baterii o hmotnosti 20 tun. Jak by takový autobus vypadal? Byl by to spíše nákladní automobil, vezoucí obrovskou baterii a v kabině by zbylo místo jen pro pár cestujících. U raketoplánu jiná možnost není, my se ale touto cestou v případě přepravy cestujících ubírat rozhodně

nebudeme. Přesto dojezd alespoň 300 km na jedno nabití je do budoucna žádoucí. Je možné vůbec takového cíle dosáhnout, aniž bychom omezili kapacitu autobusu? Abychom si mohli na tuto otázku odpovědět, potřebujeme se nejprve podívat blíže na základní fyzikální zákonitosti provozu elektrobusu.

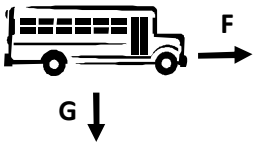
Práce A_p potřebná pro přesun tělesa z bodu A do bodu B se spočítá jako síla, která posunuje těleso směrem po trase krát celková uražená vzdálenost *L*.

$$A_p[kWs] = F\ L\ [N, km] \tag{2.1}$$

Kde F je:

$$F\ [N] = G\ p\ \left[kN, \frac{N}{kN}\right] = m\ g\ p[t, \frac{m}{s^2}, \frac{N}{kN}] \tag{2.2}$$

G = gravitační síla
m = hmotnost vozidla (včetně zásobníku)[t]
g = gravitační zrychlení [m/s²]
p = měrný trakční odpor [N/kN].



Sílu *F* dosadíme do rovnice (2.1) a vydělíme 3600, aby výsledek byl v kWh. Dostaneme tak výsledný vztah pro potřebnou práci k ujetí vzdálenosti *L*.

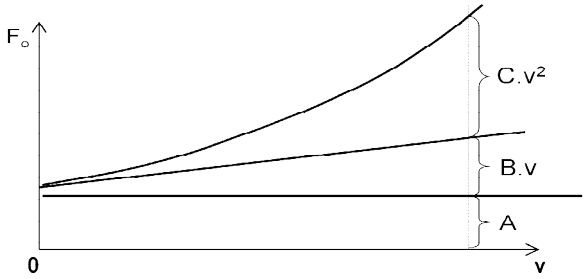
$$A_p[kWh] = \frac{m\ g\ p\ L}{3600}[t, \frac{m}{s^2}, \frac{N}{kN}, km] \tag{2.3}$$

Měrný trakční odpor *p* má tři základní složky, které mají svou určitou závislost, popřípadě nezávislost, na rychlosti a hmotnosti.

$$p = a + bv + cv^2 \tag{2.4}$$

Složka *a* obsahuje valivé tření kolo/vozovka a tření v ložiskách. Na rychlosti nezávisí. Její hodnoty se u kolejové dopravy pohybuji okolo 1 ‰ a u automobilové okolo 8 ‰, což je jedna z velkých výhod kolejové dopravy. Složka *b* reprezentuje přídavné odpory vlivem vypružení. Jízda po nerovné trati vyvolává kmitavé pohyby vozidla, které se pomocí tlumičů potlačují, což spotřebovává určitou energii. Tato energie je poměrně malá a pohybuje se zhruba do 1 ‰ při rychlosti 100 km/h. Složka *c* je kvadratickým členem, který závisí s druhou mocninou na rychlosti a reprezentuje aerodynamický odpor. Pro dvanácti tunový autobus jedoucí rychlostí 50 km/h je *c ≈ 7 ‰* [41]. Tento odpor závisí na čelní ploše vozidla, na různých výstupcích (kontejnerech) na střeše či pod vozem a na hustotě okolního vzduchu. Čím bude vozidlo oblejší, čím bude klást menší odpor. Největší vliv na složku *c* má čelní plocha, proto když budeme vozidlo prodlužovat, nebo přidávat další vagóny, tak se aerodynamický odpor již mnoho zvětšovat nebude. Měrný odpor *p* se poměřuje vůči celé hmotnosti vozidla, a tak se zde objevuje paradox, že dlouhá (a těžká) vozidla mají kvadratickou složku menší než vozidla

krátká. Opět se zde ukazuje výhoda železničních vozidel oproti autobusům. Na druhou stranu rychlost městských autobusů není příliš velká, a tím i ztráty vlivem aerodynamického odporu nejsou příliš výrazné.



Obr. 2.1 Závislost složek jízdního odporu na rychlosti

Nyní známe množství energie potřebné k ujetí určité vzdálenosti. To se musí rovnat trakční práci A_t. Tu spočítáme následovně.

Energii uloženou v baterii můžeme definovat jako měrnou energii k_A krát hmotnost zásobníku m_Z. Část této uložené energie použijeme na vedlejší spotřebu definovanou jako poměrná vedlejší spotřeba β, což je procentuální vyjádření z celkové spotřeby. Zbylou energii (1-β) přeměníme na trakční práci, poníženou o ztráty η v měniči a motoru.

$$A_t = k_A \, \mathrm{m_z} \, \eta \, (1 - \beta) \tag{2.5}$$

Nyní dáme rovnice pro práci (2.3) a (2.5) do rovnosti.

$$\frac{m \, g \, p \, L}{3600} = k_A \, \mathrm{m_z} \, \eta \, (1 - \beta) \tag{2.6}$$

Na levé straně necháme pouze vzdálenost.

$$L = \frac{3600 \, k_A \, \mathrm{m_z} \, \eta \, (1 - \beta)}{m \, p \, g} \tag{2.7}$$

Vzorec můžeme ještě zjednodušit, když dáme do poměru hmotnost zásobníku vůči celkové hmotnosti vyjádřenou jako poměrná hmotnost zásobníku k_m.

$$k_m = \frac{m_z}{m} \tag{2.8}$$

Výsledný vzorec je často označován jako Kummlerův vztah, nazvaný po švýcarském elektrotechnikovi Hermannu Kummlerovi, který tuto rovnici definoval již před sto lety.

$$L = \frac{3600\ k_A\ k_m\ \eta\ (1-\beta)}{p\ g} \tag{2.9}$$

g = gravitační zrychlení [m/s²]
p = měrný trakční odpor [N/kN]
k_A = měrná energie zásobníku [kWh/t]
k_m = poměrná hmotnost zásobníku energie [-]
η = účinnost trakčního pohonu [%]
β = poměrný příkon vedlejší spotřeby (osvětlení, klimatizace, …) [%]

Protože dojezd je nejpalčivější otázkou elektromobility, Kummlerův vztah nám pomůže pochopit, jaká složka má na dojezd vliv a jak ho pozitivně ovlivnit. Prvně se ve vzorci objevuje konstanta 3600 a gravitační zrychlení g. Ty nijak ovlivnit nemůžeme. Trakční pohony a měniče jsou již velmi technologicky vyspělé a možnost dále zlepšovat jejich účinnost η je minimální. Navyšovat poměrnou hmotnost zásobníku k_m také nedává příliš smysl, protože jak jsem již dříve vysvětlil, nechceme přepravovat baterii, nýbrž cestující. Z pohledu dojezdu chceme co největší baterii, ale z pohledu hmotnosti, zástavového prostoru i ceny chceme baterii co možná nejmenší. Rozumná poměrná hmotnost je okolo 10 %.

Měrný trakční odpor p je závislý na rychlosti a tvaru vozidla. Při velmi vysokých rychlostech, typicky u vysokorychlostní železnice, hraje jednu z nejdůležitějších rolí. V našem případě městských autobusů ho sice můžeme snížit lepším aerodynamickým tvarem a větší délkou vozidla, ale příliš velký vliv na výsledný dojezd to mít nebude.

Vedlejší spotřeba β ovlivňuje dojezd již velmi výrazně. V extrémních případech (velké mrazy) to může být i více než 50 %. Na tuto oblast se již má cenu zaměřit. Vedlejší spotřebu tvoří hlavně klimatizace a vytápění. Lze ji snížit například použitím lepších izolačních materiálů. Vzhledem k častým zastávkám autobusu MHD není ale toto řešení příliš účinné, neboť nejvíce tepla (chladu) uteče otevřenými dveřmi při výstupu a nástupu cestujících. Další možností je použití naftového topení. Takový autobus ale potom ztrácí označení bezemisní a nelze na něj čerpat dotace. V současnosti se v Praze testuje již druhým rokem elektrobus, do kterého bylo letos v létě nainstalováno tepelné čerpadlo. Vedlejší spotřeba v létě díky němu poklesla a nyní se čeká, jak velký vliv bude mít tepelné čerpadlo na vedlejší spotřebu v nadcházející zimě.

Až na měrnou energii zásobníku k_A jsem probral již všechny položky a přitom možnost ovlivnit dojezd byla minimální. Naštěstí v případě měrné energie je situace velice příznivá. Používaná technologie baterií má stále své rezervy a každým rokem se vylepšuje. Navíc jsou vyvíjeny další slibné technologie jako například Li-air[3] baterie, jejíž měrná energie by měla být desetinásobná oproti Li-Ion. Pokud nyní mluvíme o dojezdu okolo 150 km na jedno nabití, tak s Li-air baterií bude dojezd i přes 1000 km, což bude již použitelné nejen do města, ale i na příměstských linkách. Použití tohoto typu baterií v reálném provozu bude ale ještě pár let trvat.

[3] Lithium-vzduchová baterie.

2.2. Význam vedlejší spotřeby v energetickém jízdním cyklu

Vedlejší spotřeba byla až dosud minoritní záležitostí oproti trakční spotřebě. Jednalo se převážně o osvětlení, ventilaci nebo informační systém. Vytápění bylo zajištěno odpadním teplem z motoru a klimatizace se nepoužívala. Desetimetrový autobus poháněný 150kW spalovacím motorem s 30% účinností produkuje 350 kW tepla. Z tohoto tepla 200 kW odejde ve formě spalin výfukem a zbylých 150 kW se využívá k vytápění. Oproti tomu elektromotor o stejném výkonu 150 kW a účinnosti 93 %, produkuje pouze 11 kW odpadního tepla. Pro vytopení celého autobusu i v případě velkých mrazů je 150 kW tepla dostačující, ale v případě elektrobusu se musí použít ještě dodatečné vytápění.

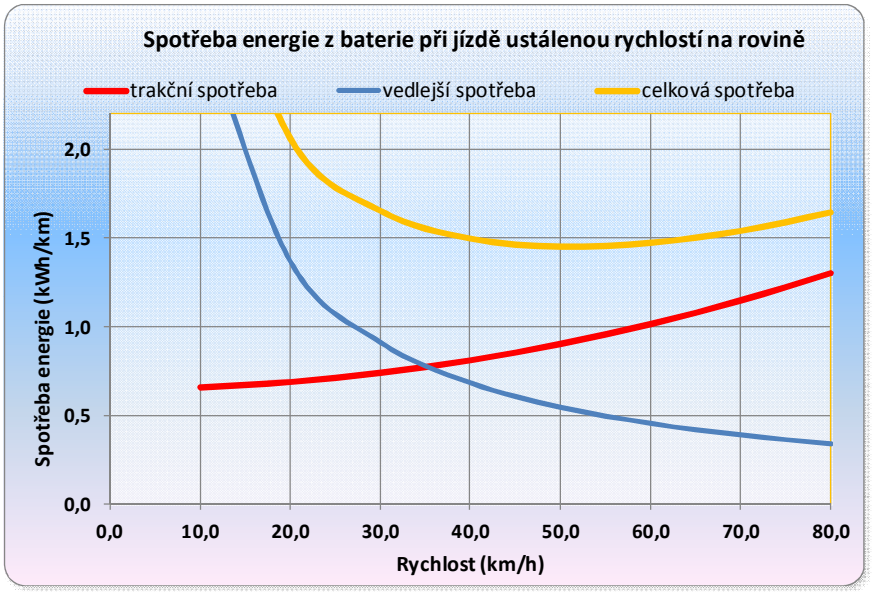
Výkon elektrického topení například v elektrobusu Perun HP od společnosti Škoda je 25 kW. Není to příliš mnoho, ale i tak dokáže topení 78 kWh baterii, kterou Perun HP má, při plném výkonu vybít za pouhé 3 hodiny. S energií se musí proto velice šetrně hospodařit. Ani v létě se situace moc nezlepší. V současnosti se stává standardem klimatizace, a to minimálně pro řidiče. Velikost vedlejší spotřeby tedy zásadně ovlivňuje dojezd. Snížit výkon topení můžeme například použitím izolačních materiálů ve stěnách a v podlaze nebo automatickým zavíráním jednotlivých dveří. Dále se může konstrukčně oddělit kabina řidiče, který má vyšší nároky na vytápění. Řidič celý den sedí na místě a potřebuje alespoň 22°C, zatímco cestující jsou oblečení dle venkovní teploty a stačí jim proto v zimně vnitřní teplota 15 °C.

Měrná vedlejší spotřeba [kWh/km] je nepřímo úměrná rychlosti. Vyplývá to z jednoduché úvahy. Pokud autobus stojí na zastávce, spotřebovává i nadále energii na vytápění či chlazení. V té chvíli můžeme na autobus pohlížet jako na vytápěnou čekárnu. Pokud bude autobus vybaven topením o výkonu P_{ved} = 25kW a bude stát hodinu na místě, spotřebuje 25 kWh. Stejně tak když pojede jednu hodinu rychlostí v = 10 km/h, spotřebuje také 25 kWh. Při přepočtu na dráhu s = 1 km je spotřeba elektrické energie 2,5 kWh/km. Pokud pojede rychlostí 20 km/h (běžná oběhová rychlost), vedlejší spotřeba bude stále 25 kWh, ale měrná vedlejší spotřeba vyjde poloviční, tedy 1,25 kWh/km (***2.10***).

$$E_{ved} = P_{ved}\, t = \frac{P_{ved}\, s}{v} = \frac{25 * 1}{20} = 1{,}25\ [\mathrm{kWh/km}] \tag{2.10}$$

Se zvyšující se rychlostí měrná vedlejší spotřeba klesá, ale na druhou stranu trakční spotřeba vlivem převážně aerodynamických sil stoupá. Zajímalo mne tedy, jaká je optimální rychlost, při které elektrobus dosáhne minimální spotřeby na kilometr, a tím i maximálního dojezdu.

Modelovým autobusem se mi stal autobus o hmotnosti 18 t s elektrickým vytápěním o výkonu 25 kW. Z grafu je dobře zřetelný možná překvapivý závěr (***obr. 2.2***). Vedlejší spotřeba do rychlosti cca 35 km/h převyšuje trakční spotřebu. Z tohoto důvodu stále někteří výrobci používají v elektrobusu naftové vytápění, i když takovýto autobus nemůže být označen jako bezemisní.



Obr. 2.2 Měrná spotřeba e-busu na kilometr

2.3. Cena elektrické energie odebírané ze zásobníku

Cena elektrické energie vyrobené v elektrárně je mnohem menší než koncová cena, kterou platíme za odebranou elektřinu doma ze zásuvky. Je to dáno i tím, že při přenosu elektřiny z elektrárny do domácnosti přes různá vedení a transformátory se ztratí velké množství energie. I když platíme dle elektroměru na konci vedení, musíme vlastně zaplatit původní množství vyrobené energie vstupující do vedení na začátku. Tyto ztráty v síti jsou započítány do koncové ceny. Síť vyžaduje pravidelnou údržbu a obměnu zařízení, což se také rozpočítá do výsledné ceny za jednu kilowatthodinu. Stejným způsobem můžeme pohlížet na energii odebíranou ze zásobníku energie na vozidle. Pokud chceme udělat ekonomickou rozvahu provozu elektrobusu a provést srovnání s naftovým autobusem, potřebujeme znát nejen elektrickou spotřebu na jeden kilometr, ale také cenu energie v místě odběru. V tomto případě je místo odběru na vozidle, hned za baterií. Je to analogie k naftové nádrži, kde je energie uskladněna v podobě uhlovodíkového paliva, přičemž známe její přesnou cenu. V případě elektrické energie ale známe cenu v místě dodávky od distribuční sítě. Dopravní podnik odebírá elektřinu přímo z napěťové hladiny 22 kV za cenu cca 2 Kč/kWh. Tuto elektřinu potřebujeme nejprve transformovat na nižší napětí, usměrnit a přenést do vozidla. Do této ceny musíme započítat nejen ztráty vzniklé přenosem a transformací, ale také cenu zásobníku. Stávající infrastruktura jako transformátor, usměrňovač a vedení má díky nižší spotřebě nových vozidel (tramvaje, metro) dostatečnou výkonovou rezervu i pro napájení elektrobusů, a tudíž není potřeba žádná další investice. Jejich cenu nebudu proto do výsledné ceny za kWh započítávat.

Dopravní podniky v ČR používají ve městech stejnosměrnou síť o hladině 600 V (tramvaje, trolejbusy) nebo 750 V (metro). Odebíraná elektřina z distribuční sítě je střídavá a na hladině 22 kV. Je potřeba ji nejprve transformovat na nízké napětí a pak usměrnit. Při každé transformaci se nějaké procento energie ztratí – vznikají výkonové ztráty. Poměr mezi výstupním a vstupním výkonem do zařízení označujeme jako účinnost η. V tomto případě počítáme s účinností transformátoru η_{trans}, která se pohybuje okolo 97 % a účinností

usměrňovače η_{usm}, cca 99 %. Upravené elektrické energie bude z důvodu ztrát méně, což nám následovně navýší cenu elektřiny:

$$c_{trans} = c_{síť} * \frac{1}{\eta_{trans}} * \frac{1}{\eta_{usm}} = c_{síť} \frac{1}{(0{,}97*0{,}99)} = c_{síť} \frac{1}{0{,}96} \cong 1{,}04\ c_{síť}. \quad (2.11)$$

Cena upravené energie je přibližně o 4 % vyšší. Dále musíme počítat s přenosem pomocí vedení o účinnosti η_{ved} = 0,97, další úpravou parametrů před zásobníkem pomocí nabíjecího měniče (nabíječky) $\eta_{nabíječ}$ = 0,91 a také vlastní účinností zásobníku $\eta_{zás}$. Celková účinnost transformace a přenosu elektrické energie až k pohonu je přibližně 76 %.

$$c_{přen} = c_{síť} * \frac{1}{\eta_{trans}} * \frac{1}{\eta_{usm}} * \frac{1}{\eta_{ved}} * \frac{1}{\eta_{nabíječ}} * \frac{1}{\eta_{zás}} = c_{síť} \frac{1}{(0{,}97 * 0{,}99 * 0{,}97 * 0{,}91 * 0{,}9)} \quad (2.12)$$

$$= \quad c_{síť} \frac{1}{0{,}76} \cong 1{,}31\ c_{síť}$$

Ještě zbývá započítat cenu za obnovu zásobníku elektrické energie. Tu spočítáme vydělením kWh ceny zásobníku ($C_{zás}$) počtem nabíjecích cyklů (N). Ještě v roce 2014 byla tato cena v případě použití Li-Ion baterie cca 4 kč/kWh, což v praxi výslednou cenu za elektřinu více než zdvojnásobilo. Současný moderní akumulátor má životnost kolem 3000 cyklů a cena zásobníku přepočítaná na 1 kWh se může pohybovat okolo 7000 Kč. Upozorňuji, že tyto parametry se v současnosti mění doslova každý měsíc, a není proto jednoduché určit přesné hodnoty. Tyto parametry mají přitom na výslednou cenu podstatný vliv, jak je vidět v následujících výpočtech. Je to zároveň důvod proč výrobci elektromobilů přesné hodnoty tají, neboť jim to dává konkurenční výhodu. Výslednou cenu odebírané energie ze zásobníku spočítáme dle vzorce:

$$C = c_{síť} \frac{1}{\eta_{trans}} * \frac{1}{\eta_{usm}} * \frac{1}{\eta_{ved}} * \frac{1}{\eta_{nabíječ}} * \frac{1}{\eta_{zás}} + \frac{C_{zás}}{N} =$$

$$2 \frac{1}{0{,}97} * \frac{1}{0{,}99} * \frac{1}{0{,}97} * \frac{1}{0{,}91} * \frac{1}{0{,}9} + \frac{7\,000}{3000} = 2 * \frac{1}{0{,}76} + 2{,}33 = \quad (2.13)$$

$$2 * 1{,}31 + 2{,}33 \quad = \quad 2{,}6 + 2{,}33 \quad = \quad 5{,}0\ \text{Kč/kWh}.$$

V ***Tab. 2.1*** uvádím příklady výsledné ceny při použití i jiných typů zásobníků. Zjistíme například, že cena odebírané energie z olověného akumulátoru se více než ztrojnásobí oproti nakupované ceně! Cenově nejvýhodněji vychází energie odebraná ze superkapacitoru, který výslednou cenu zvýší jen nepatrně. Platí to ovšem jen při využití celého jeho životního cyklu, který je obrovský. Dle mého odhadu se tohoto celého životního cyklu opravdu může využít při modelu nabíjení na zastávkách.

Tab. 2.1 Výsledná cena energie čerpané ze zásobníku při nákupní ceně 2 Kč/kWh

typ	η (%)	cena (Kč/kWh)	N (počet cyklů)	c (Kč/kWh)
olověný akumulátor	70	6 000	1 500	3,4 + 4,0 = **7,4**
moderní akumulátor	90	7 000	3 000	2,6 + 2,3 = **5,0**
superkapacitor	95	300 000	1 000 000	2,5 + 0,3 = **2,8**

2.4. Parametry zásobníků elektrické energie

Zásobník energie svými parametry zásadně ovlivňuje výsledné provozní parametry elektromobilu. Nejdůležitějšími parametry jsou měrná energie a měrný výkon. Měrná energie [Wh/kg] udává množství energie, kterou je možno uložit v jednom kilogramu zásobníku. Hmotnost baterií pro autobusovou dopravu se pohybuje v řádu několika tun, a proto je praktičtější uvádět tyto parametry vztažené na jednu tunu [kWh/t]. Měrná energie ovlivňuje dojezd. Pro delší dojezd potřebujeme více energie, ale větší hmotnost nám naopak dojezd zkracuje. Měrný výkon [kW/t] udává, jaký maximální výkon můžeme odebírat ze zásobníku (nebo dodávat do zásobníku) při přepočtu na jednu tunu. Tato vlastnost omezuje zrychlení, maximální rychlost vozidla a především rychlost nabíjení. Při předjíždění sice potřebujeme ze zásobníku odebírat velký výkon, to ale trvá jen chvilku. Naproti tomu při nabíjení potřebujeme dodávat výkon po podstatně delší dobu. Zde jsme již velmi limitováni ztrátovým teplem, které se při dobíjení vytváří a musí se odvádět do okolí. Důležitým údajem je také prostor, který zásobník zabere, protože velká baterie zabírá místo pro cestující. Z toho důvodu se také měrná energie a měrný výkon uvádějí v přepočtu na jeden litr. Měrná energie ve Wh/l a měrný výkon ve W/l.

Ve vozidlech používáme vysokokapacitní kondenzátory, neboli superkondenzátory, a sekundární články, označované jako akumulátory či baterie. Superkondenzátory se dají velmi rychle dobíjet, ale na druhou stranu mají velmi malou měrnou kapacitu. Proto se hodí jen do autobusů využívajících princip zastávkového dobíjení, viz další kapitoly. Sekundárních článků existuje mnoho druhů. Například Olověné – Pb, Nikl-kadmiové – NiCd, Nikl-metalhydridové – NiMH, Lithiové – Li a další. Jak již název vypovídá, jejich rozdíl je v použití různých materiálů pro elektrody a různá chemická složení. Právě tyto pestré kombinace prvků udávají akumulátorům odlišné technické parametry. Například rozdílné jmenovité, vybíjecí nebo nabíjecí napětí. Závislost na teplotě, životnost, proudovou zatížitelnost a další. Všechny vyjmenované se používaly nebo stále používají v polozávislé trakci[4]. V současnosti jednoznačně převládají Lithiové akumulátory z důvodu nejvyšší měrné kapacity. I zde ovšem díky překotnému vývoji bylo vyvinuto mnoho poddruhů s různými technickými parametry a problematika jejich provozování není tak jednoduchá, jak se může zdát. Pokusím se v následujících kapitolách tuto problematiku alespoň částečně vysvětlit.

2.4.1. Lithium-iontová baterie (Li-Ion)

Primární lithiové články[5] byly vynalezené v polovině šedesátých let minulého století a již od počátku se vyznačovaly vysokou měrnou energií. Po mnohých pokusech se ukázalo, že jsou vyrobitelné i jako sekundární články. To znamená, že se dají opakovaně nabíjet. Z počátku měly tyto akumulátory velké technické problémy. Docházelo k degradaci hmoty nebo měly malou kapacitu. Velký pokrok přišel až v roce 1990, kdy zástupci firmy SONY představili novou technologii, která využívala jako aktivní materiál pro zápornou elektrodu směsi grafitu obohaceného lithiem. Název Li-Ion akumulátorů zavedl výkonný ředitel firmy SONY pan K. Tozawa, pro tento zdroj spojený s vysokým napětím, možností nabíjení a vybíjení, s dlouhou

[4] Vozidla s elektrickým pohonem, která musí být na nějakou část doby připojena k el. Infrastruktuře.
[5] Baterie na jedno použití.

životností, vysokou kapacitou a dobrou bezpečností. Název "Ion" je použit díky iontům Li^{+}, které putují pří nabíjení z kladné elektrody na zápornou a naopak. [14]

V současnosti dochází k překotnému vývoji a parametry se mohou i u stejného typu hodně lišit, v závislosti na konstrukčním provedení. Snad každá velká automobilka si vyvíjí nové akumulátory nebo spolupracuje s jejich výrobci. Poptávka se doslova každý měsíc rapidně zvětšuje a tlak na zlepšení parametrů je velký. Lze proto očekávat, že například měrná energie zde uváděná může být za pár let i dvojnásobná.

2.4.1.1. Typické parametry lithiové baterie

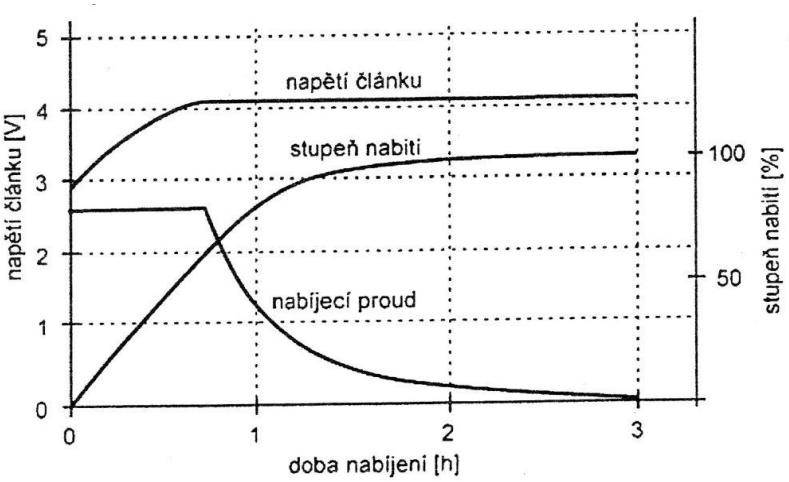
- Měrná energie 130 Wh/kg
- životnost 1500 cyklů
- vysoké jmenovité napětí 3,6 V (existují i jiné hodnoty: 3,2; 3,0; 1,5,…)
- nízké samovybíjení – okolo 8 % za měsíc při 20 °C (NiCd má samovybíjení 25 %)
- nemá tzv. paměťový efekt[6]
- dobrá bezpečnost
- nezávadné pro životní prostředí – neobsahuje rtuť, kadmium ani olovo.

2.4.1.2. Omezující parametry

- Velký vnitřní odpor – až 10x větší než u NiCd
- pracovní teplota je jen do -20 °C (NiCd do -40 °C)
- vysoká cena 200-300 $/kWh (která momentálně rychle klesá)
- maximální vybíjecí proud je do 2 C[7]
- maximální nabíjecí proud do 1,5 C (některé speciální typy i 4 C)
- náchylnost na přebíjení a podvybíjení (min. 2,8 V, max. 4,2 V).

Z těchto uvedených parametrů vyplývá způsob nabíjení. Během hodiny lze tuto baterii nabít až z 80 %, ale dobít tuto baterii o zbylých 20 % trvá další 2 hodiny. Je to způsobeno nestálým nabíjecím proudem, který musí postupně klesat. Limitujícím faktorem je totiž napětí na článku, které nesmí přesáhnout hodnotu 4,2 V, jinak dochází k degradaci aktivní hmoty. Z toho důvodu musí každá Li-Ion baterie obsahovat řídící elektronické obvody, které hlídají jak horní, tak spodní limitní napětí, a v případě překročení těchto hodnot baterii okamžitě odpojí, a tím zabrání jejímu zničení. Z grafu na ***obr. 2.3*** je patrné, že rychlost nabíjení se velmi mění v závislosti na stavu nabití baterie.

[6] Zdánlivé snížení kapacity, vlivem častého neúplného vybíjení.
[7] Násobek hodinové kapacity akumulátoru.



Obr. 2.3 Nabíjecí charakteristika Li-Ion baterie [26]

Li-ion baterií existuje obrovské množství a obvykle co výrobce, to jiný typ použité chemie. Například Nissan Leaf a Chevrolet Volt používají $LiMn_2O_4$, zatímco Tesla Roadster $LiCoO_2$ a Model S $LiNiCoAlO_2$. Další používané složení je $LiFePo_4$, $LiFeYPO_4$, $LiMn_2O_4$, $Li_4Ti_5O_{12}$. Z výčtu druhů Li-Ion baterií je vidět, jak překotným vývojem baterie prochází a že žádný z typů nijak výrazně nad ostatními nevyniká. Podrobněji uvedu jen pár technologií často používaných v elektrobusech.

2.4.2. Lithium-železo-fosfátový akumulátor ($LiFePO_4$)

Označuje se též jako LFP akumulátor. Konstrukčně je velice podobný Li-Ion akumulátorům. Kladná elektroda je vyrobena z $LiFePO_4$, uhlíku a polyvinylidenfloridu. Je schopen dodat poměrně vysoký výkon, má velkou kapacitu a zároveň je vyroben z netoxických materiálů. Rozsah provozních teplot je v rozsahu -20 °C až 70 °C. Zároveň u něj téměř nedochází k samovolnému vybíjení. Odolává vysokým teplotám (destrukce až nad 800 °C – tepelně odolá přímému zkratu). Dosahuje vysoké životnosti až deset let a vysokého počtu nabíjecích cyklů (2000-3000). Napětí se pohybuje mezi 2,8-3,6 při jmenovité hodnotě 3,2 V. Akumulátory by se neměly nabíjet ani vybíjet příliš velkými elektrickými proudy, protože u nich dochází ke snižování životnosti a předčasnému selhávání správné funkce.

2.4.3. $LiFeYPO_4$ (Lithium – Železo – Ytrium – Fosfid)

Alternativou $LiFePO_4$ článků jsou články typu $LiFeYPO_4$. Konstrukce je téměř shodná jako u akumulátorů $LiFePO_4$. Jejich rozdílem je, že mají kladnou elektrodu dopovánu yttriem, čímž je dosaženo větší stability elektrody. Směs yttria urychluje pohyb iontů při nízkých teplotách. Navíc jsou vybaveny speciální jednocestnou membránou, která umožňuje únik vznikajícího plynu. Jejich rozsah provozní teploty je v rozmezí -45 °C až 85 °C. Dalšími vlastnostmi těchto článků jsou: velmi plochá vybíjecí křivka (téměř konstantní napětí), vysoký počet dobíjecích cyklů, vysoká životnost (více než 10 let), vysoká dobíjecí účinnost (cca 95 %) a měrná energie

110 Wh/kg či 220 Wh/L. Minimální hodnota elektrického napětí článku je 2,5 V, jmenovité napětí je přibližně 3,2 V a maximální hodnota napětí je 4,25 V. Životnost je 2000 až 8000 cyklů. Tyto akumulátory je možné s výhodou použít jako zdroj elektrické energie pro elektromobily. Používá je například i český výrobce SOR Libchavy ve svých elektrobusech s baterií od firmy Winston Battery.

2.4.4. Lithium–titanate battery ($Li_4Ti_5O_{12}$)

Akumulátory s lithno-titanovou anodou mají v zásadě podobné vlastnosti jako ostatní články. Články z oxidu titaničitolithného jsou bezpečné, nabízí perfektní teplotní charakteristiky a velmi slušnou životnost. Oproti předchozím se liší hlavně vyšší maximální hodnotou nabíjecího proudu. Limitujícím prvkem pro vysoké nabíjecí proudy jsou zejména uhlíkové anody. Pro vybíjecí proudy sice nepředstavují výrazné omezení, ale při rychlém nabíjení je tomu jinak. Lithium neproniká do uhlíkové struktury a formuje dendritickou vrstvu na povrchu. Tomuto jevu zabraňuje vyšší potenciál $Li_4Ti_5O_{12}$ baterie. Její nanokrystalická struktura umožňuje dosáhnout mnohem větší plochy a tím také zvýšit nabíjecí proudy.

Touto baterií jsou vybaveny například nové parciální trolejbusy[8] pro město Zlín. První byl Zlínské veřejnosti představen 22. 9. 2016 v ceně cca 12 mil. Kč (bez DPH).

2.4.5. Vysokoenergetické kondenzátory

Vysokoenergetické kondenzátory, neboli superkondenzátory či ultrakondenzátory, jsou vlastně jen zvětšené kondenzátory, respektive mají zvětšenou plochu, kde se uchovává náboj. Můžeme se ovšem setkat i s počeštěnou verzí. Například firma ECOM s.r.o. ve svých katalogových listech [25] používá označení superkapacitory. U superkondenzátoru dosahuje měrná energie hodnoty až 10 Wh/kg. Srovnání parametrů akumulátoru, klasického kondenzátoru a superkapacitoru ukazuje následující tabulka ***Tab. 2.2.*** převzatá od firmy ECOM s.r.o. Parametry zde uvedené jsou ale spíše pro hrubé srovnání, akumulátory i superkondenzátory procházejí rychlým vývojem, a proto se mohou reálné hodnoty od této tabulky značně lišit.

Tab. 2.2 Srovnání parametrů akumulátoru a kondenzátoru [25]

Parametr	akumulátor	klasický kondenzátor	superkapacitor
hustota energie [Wh/kg]	100	0,2	10
měrný výkon [kW/kg]	1	500	10
doba nabíjení (vybíjení)	5 h	0,001 s	10 s
životnost	1000 cyklů	1 000 000 cyklů	500 000 cyklů

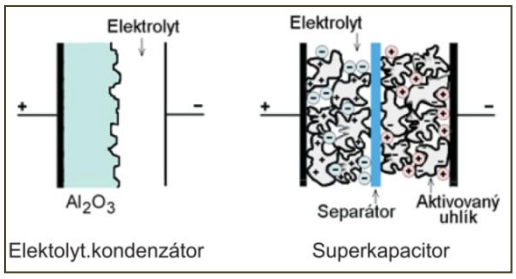
[8] Trolejbus s možností jízdy bez trolejí pouze na energii z baterie.

Abychom pochopili, co určuje kapacitu kondenzátoru, podíváme se blíže na vzorec pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l} \tag{2.14}$$

C = kapacita deskového kondenzátoru [F]
S = plocha elektrod [m²]
l = vzdálenost elektrod [m]
ε_0 = permitivita vakua [F/m] – konstanta
ε_r = poměrná permitivita dielektrika [-]

Ze vztahu je zřejmé, že kapacitu můžeme zvýšit buď zvětšením plochy elektrod, zmenšením vzdálenosti elektrod nebo použitím dielektrika s větším ε_r. Nejlepší cestou se ukázalo zvětšení plochy elektrod použitím velmi porézního materiálu. Superkapacitory MAXWELL používají práškový uhlík nanesený na hliníkové fólii. Tato zrna uhlíkového prášku mají plochu až 2000 m^2 na 1 gram prášku. Velká plocha a velmi malá vzdálenost uhlíkových zrnek uhlíku (řádu 10^{-10} m) vytváří kapacitu několik tisíc Faradů. Malá hodnota vnitřního odporu umožňuje rychlé vybití a nabití. Tento cyklus se může opakovat více než 500 000 krát. Doba života superkapacitoru je definována poklesem kapacity na 80 % jmenovité hodnoty nebo zvýšením sériového odporu na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Moderní superkapacitory mají životnost až 1 000 000 cyklů. Jako například superkapacitor MAXWELL Boostcap®BCAP 3000 s kapacitou 3000 F.

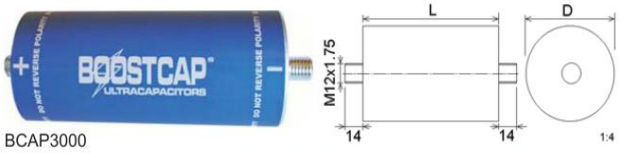


Obr. 2.4 vnitřní uspořádání superkapacitoru [25]

Tab. 2.3 technické parametry superkapacitoru MAXWELL [25]

BCAP **Superkapacitory 2.7V**

Jmenovité napětí Un	2.7 Vdc
Jmenovitá kapacita C	650F~ 3000F +20%
Doba života	1 000 000 cyklů
Pracovní teplota	-40 ~ +65 °C



BCAP3000

	obj.č.	obj.název	C	Un	Resr	Icc	Ip	Emax	P	Pd	Ic	L	D	hmotnost
			F	V	mΩ	A	A	Wh/kg	kW/kg	kW/kg	mA	mm	mm	g
		BCAP 0650 P270 K04	650	2.7	0.80	62	575	3.29	15.1	5.4	1.5	44.5	60.0	200
		BCAP 1200 P270 K04	1200	2.7	0.58	81	955	4.05	13.8	5.0	2.7	74.0	60.0	300
		BCAP 1500 P270 K04	1500	2.7	0.47	100	1185	4.75	16.2	5.8	3.0	85.0	60.0	320
	16431	BCAP 2000 P270 K04	2000	2.7	0.35	125	1585	5.06	17.5	6.2	4.2	102.0	60.0	400
■	16735	BCAP 3000 P270 K04	3000	2.7	0.29	150	2165	5.72	13.8	5.4	5.2	138.0	60.0	550

Jednou z výhod oproti akumulátoru je jednoznačné určení zbývající energie. Ta se spočítá z napětí na kondenzátoru podle vzorce:

$$E = \frac{1}{2} C\, U^2. \tag{2.15}$$

Oproti bateriím, kde napětí při vybíjení nejprve klesá pozvolna a až při téměř úplném vybití prudce spadne dolů, zde napětí postupně klesá až k nule. To je výhodné při určování aktuálního množství energie v kondenzátoru, ale na druhou stranu nám to znemožní využít všechnu uloženou energii. S ohledem na klesající účinnost přečerpávání energie při klesajícím napětí se jeví jako akceptovatelné vybíjení na 50 % jmenovitého napětí. Použitelná energie bude tedy:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C \left(U_0^2 - U_{\min}^2\right) = \frac{1}{2} C \left(U_0^2 - \frac{U_0^2}{4}\right) = \frac{3}{4} * \frac{1}{2} C\, U_0^2, \tag{2.16}$$

což znamená, že můžeme využít maximálně 75 % z celkového množství uložené energie.

2.5. Způsoby dobíjení e-busu v MHD

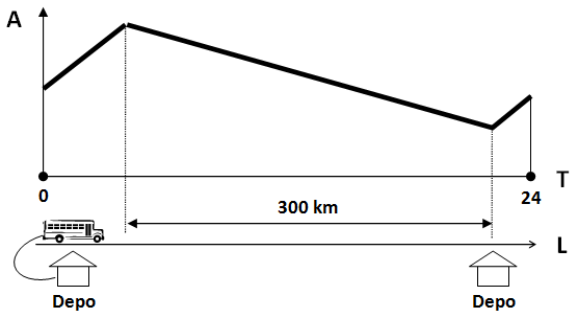
Průměrná oběhová rychlost autobusu v MHD je 15 km/h a doba provozu 20 hodin denně. Denní proběh[9] autobusu tedy činí cca 300 km. Tyto údaje jsem již ověřoval ve své bakalářské práci [15] na pražské autobusové lince č. 216, která jezdila na trase Poliklinika Petřiny – Bořislavka – Poliklinika Petřiny. Po zprovoznění nové trasy linky metra (V.A) ztratila autobusová linka č. 216 smysl a byla proto zrušena. Trasa měřila 9,6 km a zvládl jí obsloužit jediný autobus, který za den stihl odjezdit 33 oběhů. Autobus tedy za den urazil 317 kilometrů, plus cesta z garáží a do garáží, které jsou v Řepích, dohromady cca 327 km. Na trasu vyjížděl v 5:40 ráno ze zastávky Poliklinika Petřiny a poslední příjezd na tuto zastávku byl v 23:52. Autobus byl na trase 18 hodin a 24 minut. Oběhová rychlost v_O [km/h] této autobusové linky byla o něco vyšší, tedy:

$$v_O = \frac{316{,}8}{18{,}4} = 17{,}2 \text{ km/h}. \tag{2.17}$$

Pro názorné výpočty budu ale používat oběhovou rychlost 15 km/h a denní proběh 300 km.

2.5.1. Noční nabíjení

První možností nabíjení je používat elektrobus stejným způsobem jako klasický naftový autobus. Tedy večer ho zaparkovat do garáže, natankovat (v našem případě připojit do elektrické zásuvky) a ráno vyjet s plnou nádrží (baterií) na celodenní službu. Tedy dobíjení přes noc, kdy se autobus nepoužívá a postupné čerpání této energie během dne. Viz názorné schéma na ***obr. 2.5***.



Obr. 2.5 Noční nabíjení [15]

[9] Celková ujetá vzdálenost za jeden den.

Aby e-bus dokázal na jedno nabití ujet 300 km, bude potřebovat baterii s dostatečně velkou kapacitou. Elektrickou spotřebu bude mít e-bus podobnou jako trolejbus. Můžeme proto při výpočtu vyjít z dvouosého trolejbusu délky 12 m. Ten má spotřebu bez rekuperace brzdové energie a s elektrickým vytápěním okolo 2 kWh/km. Potřebujeme zásobník energie schopný dodat energii:

$$\mathrm{A_p} = \mathrm{e\ L} = 2 * 300 = 600\ kWh/den. \tag{2.18}$$

Při současné měrné energii akumulátorů 100 kWh/t a 30 % rezervy na stárnutí a provozní vlivy potřebujeme akumulátor o hmotnosti:

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{A_p}}{\mathrm{c\ k_A}} = \frac{600}{0{,}7*100} = 8{,}6\ t. \tag{2.19}$$

To opravdu není reálné, aby 10t autobus vezl akumulátor o hmotnosti 8,6 t. Zkusme snížit spotřebu pomocí rekuperace brzdné energie a počítejme se spotřebou 1,5 kWh/km:

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{e\ L}}{\mathrm{c\ k_A}} = \frac{1{,}5*300}{0{,}7*100} = 6{,}4\ t. \tag{2.20}$$

Tato hmotnost je stále příliš velká. Můžeme se ještě pokusit použít naftové vytápění a tím ušetřit energii. Bohužel pak elektrobus už nebude bezemisní. Elektrická spotřeba v tomto případě dle zkušeností z provozu [16] může být 1,0 kWh/km. Hmotnost akumulátoru pak vyjde:

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{e\ L}}{\mathrm{c\ k_A}} = \frac{1{,}0 * 300}{0{,}7 * 100} = 4{,}3\ t. \tag{2.21}$$

Bohužel i 40 % z hmotnosti prázdného autobusu je příliš mnoho a toto řešení není reálné. Navíc nejde pouze o hmotnost, ale i o prostor, který veliká baterie zabírá.

Je tedy zřejmé, že potřebujeme akumulátory s větší měrnou energií. Než budou k dispozici, nelze elektrobus jen s nočním nabíjením použít pro celodenní provoz. Takovéto zvýšení hmotnosti je možné pouze na železnici, kde to bylo již dříve realizováno. Například motorový vůz typ ETA 515 ***(Obr. 2.6)*** vyráběný v letech 1954-1965 pro Deutsche Bundesahn (DB). Dojezd 300 km, kapacita cca 500 kWh, poměrná hmotnost 40 %. Ovšem v dnešní době jsou i na železnici trendem lehká vozidla s nízkou spotřebou a takováto hmotnost zásobníku není žádoucí.

Obr. 2.6 ETA 515 [1]

Přesto můžeme v Praze vidět v pravidelném provozu dva elektrobusy s nočním dobíjením, které jezdí na lince BB1 a BB2, která spojuje zastávku Budějovická s business centrem BB Centrum. Linka je pro cestující zdarma, protože jí financuje právě zmíněné BB Centrum a provozovatelem je velká nadnárodní společnost ARRIVA [17].

Jedná se o krátký autobus společnosti SOR Libchavy s.r.o. typového označení ENB 9,5, což znamená délku 9,5 m se spotřebou kolem 0,8 kWh/km. Této nízké spotřeby bylo dosaženo použitím dodatečného naftového vytápění. Autobus tedy není bezemisní. Dle jízdního řádu je jasné, že ani denní nájezd kilometrů nebude velký.

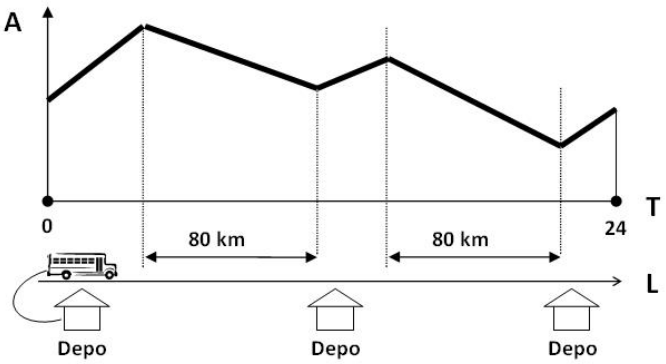
Obr. 2.7 SOR EBN 9,5 [17]

Linky mají pouhé 3, respektive 4, zastávky a délku přibližně 1,2 km. Autobusy navíc často stojí na semaforech nebo na konečné. Denní proběh je jen něco málo přes 100 km. Hmotnost zde dle výpočtů vychází:

$$m = \frac{e\,L}{c\;k_A} = \frac{0{,}8 * 100}{0{,}7 * 100} = 1{,}1\ t. \tag{2.22}$$

2.5.2. Noční a polední nabíjení

Dojezd také můžeme zvýšit, pokud využijeme období dopravního sedla[10] a baterii v průběhu dne dobijeme.



Obr. 2.8 Noční a polední nabíjení [15]

Pokud se podíváme do jízdního řádku, některé hodně vytížené autobusové linky, tak hned na první pohled uvidíme, že přepravní tok během dne znatelně kolísá. Nejčastější důvod pro použití MHD je přeprava do práce a z práce. Tvoří se tedy zvýšená poptávka po přepravě ráno a odpoledne. Ranní špička je mezi 6. až 7. hodinou a odpolední špička v čase od 15. do 16. hodiny. V této době jsou na trase všechny autobusy (mimo nutných záloh). Přes poledne stojí mnoho autobusů v depu a čeká na odpolední špičku.

[10] Období v jízdním řádu s minimálním provozem.

Obr. 2.9 SOR EBN 10,5 [27]

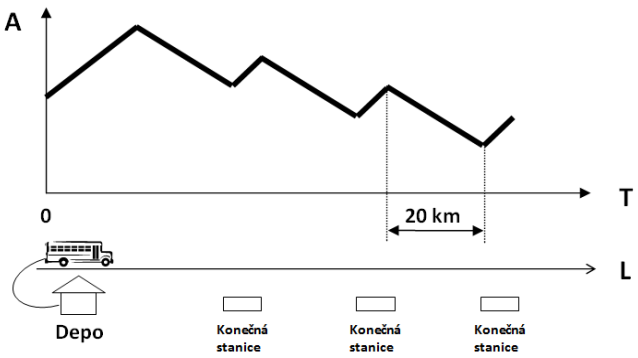
Této přestávky se dá využít právě k dobíjení elektrobusu. Při dopoledním provozu nenajezdí autobusy více než 80 km. Pokud během sedla elektrobusy dobijeme, tak zvládnou obsloužit i odpolední špičku. Odhadovaná nutná hmotnost baterie je v tomto případě:

$$m = \frac{e\ L}{c\ k_A} = \frac{1{,}5 * 80}{0{,}7 * 100} = 1{,}7\ t. \tag{2.23}$$

Hmotnost baterie 1,7 tun v autobuse o celkové hmotnosti 10 tun už akceptovatelná je. Tento model nočního a poledního nabíjení je technicky realizovatelný a opravdu již v České republice poledního dobíjení využíváme. Konkrétně ve městě Ostrava, která patří mezi města s nejvíce znečištěným ovzduším. Doprava se zde ze 79 % podílí na znečištění ovzduší. Není proto překvapením, že právě zde se dopravní podnik snaží co nejvíce zavádět nízkoemisní či úplně bezemisní způsob dopravy. Krom tramvají a trolejbusů proto DP Ostrava zavedl také elektrobusy. V září 2013 byl zde podíl elektrobusů na hromadné dopravě 0,6 % [27]. Od srpna 2010 jezdí na pravidelné lince e-bus od české firmy SOR Libchavy spol. s.r.o. typu SOR EBN 10,5 ***(Obr. 2.9).*** Zdrojem elektrické energie je 180 kusů Lithium-iontových článků ($LiFeYPO_4$) s parametry 2,5-4,5 V / 300 Ah (cca 200 kWh). Nabíjet lze pomalu (32 A) po dobu 8 hodin nebo pomocí rychlonabíječky proudem až 250 A, kdy se doba zkracuje až na jednu hodinu. Spotřebu udává výrobce 0,8-1 kWh/km. Toho bylo dosaženo využitím brzdné energie a především použitím nezávislého naftového topení o výkonu 24 kW, což rozhodně není zanedbatelná energie. Význam vedlejší spotřeby jsem podrobněji probral v kapitole ***2.2***.

2.5.3. Nabíjení na konečných stanicích

Provoz elektrobusů je zvláště kvůli vysoké ceně baterií zatím ekonomicky nerentabilní. Z tohoto důvodu Evropská unie poskytuje v různých formách dotace, které jsou ale momentálně nastavené tak, že z možnosti čerpat dotace jsou vyjmuta hlavní města. Pražský dopravní podnik se proto musí spoléhat na vlastní zdroje a je pro něj důležitější maximální využití výhod nízkých provozních nákladů elektrobusu než pro ostatní dopravní podniky.



Obr. 2.10 Nabíjení na konečných [15]

Zjednodušeně řečeno, autobus musí jezdit a ne stát připojen k nabíječce. Jak to tedy udělat, když v předchozích kapitolách jsem vysvětlil, že kapacita baterií není dostatečná pro celodenní provoz? Dobíjení během noci, kdy autobus stojí v garáži, není dostatečné. Odstavovat ho v době, kdy může přepravovat cestující jen kvůli dobíjení, není ekonomické. Existuje ještě nějaké období, kdy autobus stojí, a tohoto času můžeme využít k dobíjení? Ano, existuje. Jsou to například krátké pauzy na konečné zastávce, kde autobusy čekají přibližně 10-15 minut, než vyjedou na další jízdu.

Tyto pauzy jsou nutné z důvodu dorovnání případného předchozího zpoždění a také jsou potřeba pro řidiče, aby si mohli udělat pracovní pauzu. Deset minut na dobití baterie do plného stavu rozhodně nestačí, ale mohlo by stačit na doplnění energie potřebné k ujetí jednoho oběhu. Záleží na tom, kolik kilometrů musí autobus ujet, respektive kolik energie potřebuje, než bude stát znovu na konečné. I kdyby potřebná energie na dojetí k další konečné stanici byla větší, než energie zde doplněná, nemusí to vadit. Elektrobus vyjíždí ráno z garáže plně nabit a může touto energií hradit rozdíly mezi doplněnou a spotřebovanou energií.

Nyní budu na kontrolní výpočet trochu přísnější. Spotřeba 1,5 kWh/km je sice reálná, ale má na ni vliv například celkový počet zastavení (nejenom na zastávkách), výškový profil trati a hlavně vytápění autobusu. Pokud autobus uvízne v dopravní zácpě, trakční motory sice nespotřebovávají žádnou energii, ale topení (případně chlazení) je v provozu neustále. To má vliv na průměrnou spotřebu. Uvažujme trochu extrémnější provozní stavy a počítejme se spotřebu 2 kWh/km pro 12 metrový elektrobus a vzdálenost z konečné na konečnou 30 km. Hmotnost nám potom vyjde:

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{e\ L}}{\mathrm{c\ k_A}} = \frac{2 * 30}{0{,}7 * 100} = 0{,}9\ t. \tag{2.24}$$

I jednotunová baterie je z energetického hlediska dostatečná pro tento model nabíjení na konečných zastávkách. Existují ale i jiné limitní parametry, které mají vliv na dimenzování baterie, jako je například potřebný výkon baterie a jiné. Podrobněji v kapitole 2.8 (Dimenzování).

Výhodou tohoto modelu je vysoký dojezd. Pokud se v přestávce mezi jednotlivými oběhy dokáže baterie dobít o stejné množství energie, která je potřeba na další oběh, tak je dojezd neomezený. Některé přestávky jsou ale kratší než 10 minut a baterie se tak vždy nemusí stihnout dobít o potřebnou energii, která pak během dne postupně klesá a bude znovu doplněna v noci. Noční dobíjení ale neslouží pouze pro doplnění kapacity do 100 %, ale také k tzv. vybalancování článků. Každá takováto velká baterie se skládá z desítek až stovek jednotlivých článků zapojených v sério-paralelní kombinaci. Při častém vybíjení a nabíjení dochází vlivem různého vnitřního odporu článků k rozdílné úrovni vybití. Li-Ion články jsou velice citlivé jak na vybití, tak i přebíjení. Noční dobíjení pomocí pomalého

Obr. 2.11 SOR EBN 11 na zastávce želivského [18]

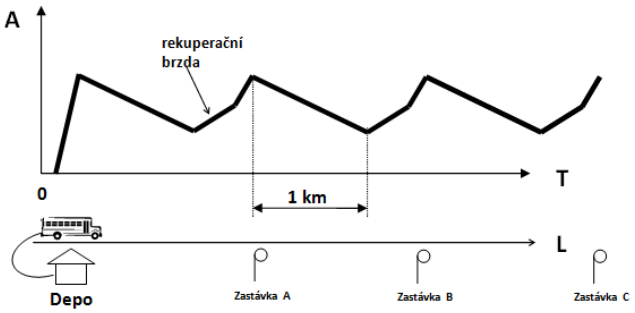
nabíjení je proto nutné pro vyrovnání těchto rozdílů.

Autobusová doprava ve městech slouží hlavně v místech, kde je menší poptávka po přepravním výkonu a nevyplatí se tam budovat metro, tramvaje či trolejbusy. Tyto linky mají většinou jednu konečnou stanici poblíž metra nebo tramvaje z důvodu návaznosti dopravy. Zároveň je v tomto místě již vybudována elektrická infrastruktura, na kterou se může připojit nabíjecí stanice pro elektrobus. Vzhledem k technickému pokroku v polovodičové technice došlo k poklesu spotřeby elektricky poháněných dopravních prostředků. Kvůli tomu mají již dříve vybudované trafostanice dostatek rezervního výkonu i pro nabíjení elektrobusů. Není tedy nutné vynakládat další investice na zřizování silnější přípojky. Nabíjení na konečných zastávkách je velice elegantní způsob, jak provozovat technologicky zatím nedokonalé elektrobusy a přitom příliš nezasahovat do zavedeného způsobu provozu MHD.

V Praze jezdí již druhým rokem ve zkušebním provozu elektrobus českého výrobce SOR Libchavy s.r.o. typového označení EBN 11. Tato testovací verze pro DPP má klimatizaci i vytápění na elektřinu. Je tedy 100 % bezemisní. Autobus je v provozu od 1. září 2015 a za rok svého provozu najezdil přes 70 000 km v každodenním provozu s cestujícími. Dojezd při průběžném dobíjení se pohybuje v rozmezí 265 až 350 km. [18] V červnu byl autobus doplněn o tepelné čerpadlo, které mělo pozitivní vliv na spotřebu elektřiny při používání klimatizace. Nadcházející zima ukáže, jaký vliv bude mít tato úprava na spotřebu elektřiny při vytápění. Dosavadní provoz ukázal, že je elektrobus z technického hlediska plně použitelný v plném provozu a má své místo v MHD.

2.5.4. Nabíjení na zastávkách

Pokud použijeme vhodný zásobník energie, který je schopen do sebe energii rychle akumulovat, můžeme využít i čas strávený v jednotlivých zastávkách, kdy cestující vystupují a nastupují. Váha zásobníku není limitujícím faktorem, protože pro ujetí vzdálenosti z jedné zastávky do druhé potřebujeme jen cca 2 kWh.



Obr. 2.12 Nabíjení na zastávkách [15]

Zásobník energie může být malý, ale na druhou stranu musí být velice výkonný. Pokud budeme počítat s tím, že autobus stráví na zastávce přibližně 15 vteřin a současně do něho musíme přenést 2 kWh, tak potřebný nabíjecí výkon bude roven:

$$\mathrm{P_n} = \frac{1{,}5 * 3600}{15} = 360\ kW. \tag{2.25}$$

Potřebujeme tedy zásobník energie, který nabíjení tímto výkonem zvládne. Výborně se pro tuto aplikaci hodí superkapacitory, jejichž předností je právě velký měrný výkon a mají dostatečnou kapacitu pro toto použití. Potíž nastává s výkonem nabíječky. 360 kW výkonu je hodně. Pro přenos takto velkého výkonu je vhodné použít vysoké napětí, ale vzhledem k nutným izolačním vzdálenostem a ochraně osob (cestujících), musíme zůstat na hladině nízkého napětí. Jako ideální hladina napětí se jeví 600 V (případně 750 V), na kterou máme již dobře zavedenou techniku z trolejbusů a tramvají. Nabíjecí proud I_N při použití napěťové hladiny 750 V bude:

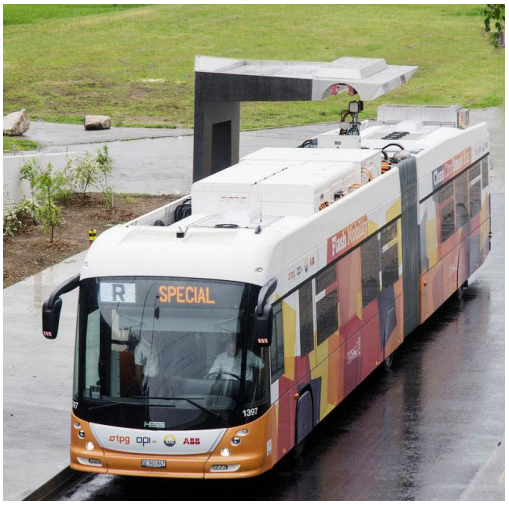
$$\mathrm{I_n} = \frac{360\ 000}{750} = 480\ A. \tag{2.26}$$

Je to opravdu velká hodnota proudu, i když technicky realizovatelná. Pokud si v jízdním řádu vyhradíme na nabíjení 30 vteřin, jako má elektrobus v Šanghaji, tak nabíjecí proud klesne na již v celku rozumných 240 A. Zmiňovaný elektrobus jezdí na Šanghajské lince v pravidelném provozu od roku 2006. Jedná se o 12 metrový Ultracap Bus firmy Sinautec, jehož 5,9 kWh superkapacitory umožňují nezávislý dojezd cca 6 km s klimatizací nebo 10 km bez klimatizace. Superkapacitory se dobíjejí po dobu 30 sekund v zastávkách a 5 minut na konečných stanicích pomocí střešního sběrače z 600 V / 200 A nabíjecích stanic. Elektrická spotřeba je 1,5 kWh na míli [28]. Z uvedených technický parametrů se dá celkem jednoduše spočítat, kolik tento Ultracap Bus může ujet na energii doplněnou na jedné zastávce.

$$\mathrm{L} = \frac{\mathrm{I} * \mathrm{U} * \mathrm{t}}{3600 * \mathrm{e}} = \frac{200 * 600 * 30}{3600 * 1000 * 1{,}5} * 1{,}6 = 1{,}1\ km \tag{2.27}$$

Autobusové zastávky jsou ovšem ve městě obvykle od sebe vzdáleny 1 až 2 km. Nabíjení na konečné po dobu 5 minut bude tedy nutné k doplnění energie do 100% stavu.

Tento model vyžaduje velké investiční náklady. Musíme totiž ke každé zastávce přivést elektrický přívod o výkonu v řádu stovek kilowattů a přitom čerpání energie bude jen pár sekund. Cena za 1 kWh bude v tomto případě podstatně navýšena o cenu za instalovaný výkon. Pro zmírnění těchto odběrových špiček je možné použít další superkapacitor i v nabíjecí stanici. Tento systém se nazývá "flash charging" (bleskové dobíjení). V době mezi jednotlivými zastaveními autobusů se superkapacitory pomalu nabíjí ze sítě menším příkonem. Po připojení elektrobusu se tato naakumulovaná energie během pár vteřin přesune



Obr. 2.13 Nabíjecí systém TOSA od ABB [29]

do zásobníku v autobusu. Tyto nabíjecí stanice vyrábí například firma ABB pod obchodním označením TOSA Charging System. Nabíječky toho typu ***(Obr. 2.13)*** jsou schopny dodávat výkon 400 kW po dobu 15 vteřin [29]. Tento model nabíjení je náročný na sladění technických parametrů jednotlivých zařízení podílejících se na přenosu energie z distribuční sítě do autobusu. Znamená to také výrazné zvýšení počtu superkapacitorů, a tím i vysoké náklady na vybudování infrastruktury. Budování tohoto systému v již husté zástavbě znamená další vícenáklady, a proto se nabíjení na zastávkách hodí spíše pro nově budovaná sídliště či města.

2.5.5. Kinematické nabíjení – parciální trolejbus

Kinematické nabíjení (neboli nabíjení za jízdy) znamená, že elektrobus je po určitou část jízdní doby připojen k trolejím a čerpá energii nejen pro jízdu, ale také pro dobíjení baterie. Není to tedy elektrobus v plném slova smyslu, jedná se vlastně o hybrid mezi elektrobusem a trolejbusem. Nebo chcete-li, trolejbus s bateriemi. První hybridní trolejbus vznikl ve spolupráci firem Solaris a Cegelec pro německého zákazníka v Eberswalde. Právě v Německu se začalo takto řešeným vozidlům říkat parciální trolejbusy. Tato terminologie byla posléze převzata do češtiny. [20] V závislosti na velikosti baterie můžeme na parciální trolejbus pohlížet jako na trolejbus, který díky baterii může překonávat kratší vzdálenosti bez troleje, nebo také jako na e-bus, který určitou část trati jede pod trolejí, aby dobil baterie a prodloužil tak dojezd. První zmíněný případ je v současnosti četnější. Je vhodný do měst, kde jsou trolejbusy již zavedené a město chce na určitých místech zrušit komplikované a poněkud nevzhledné zadrátování, například na složitých křižovatkách (typicky v centru města). Také je vhodné použít tyto parciální autobusy v případě prodloužení již stávající trolejbusové linky do nově vznikajících obytných zón. Vybudování nové trolejové sítě je finančně nákladné a vyplatí se až od určitého přepravního výkonu. V případě použití parciálního trolejbusu může takový trolejbus pokračovat dále i bez trolejí, cestující nemusí přestupovat, a tím se zvyšuje komfort a zkracuje cestovní doba.

Obr. 2.14 Trolejbus pro Eberswalde v ostravské trolejbusové vozovně [19]

První takovéto parciální trolejbusy v České republice budou provozovány ve Zlíně. Smlouva byla podepsána v lednu roku 2016. Konkrétně se bude jednat o dva trolejbusy vybavené bateriemi pro autonomní pojezd typu Škoda 26 Tr-Solaris. Jak již název napovídá, trolejbus byl vyroben ve spolupráci firem Škoda Electric a Solaris. Další dva parciální trolejbusy dodá Škodovka do Českých Budějovic a v červnu 2016 podepsala smlouvu na dodávku sedmi vozidel pro Plzeňské městské dopravní podniky a.s. s možností rozšíření kontraktu až na 33 vozidel. Toto řešení bylo v letošním roce pro dopravní podniky se zavedenými trolejbusy docela populární. Ve světě se o tomto modelu uvažuje také z důvodu, že většina dotačních programů nepodporuje trolejbusy, ale elektrobusy ano. Čím se ale výrobci moc nechlubí, je dojezd trolejbusu čistě na baterii. Vzhledem k absenci tohoto údaje v odborných článcích

a vzhledem k možnému dojezdu elektrobusů (viz předchozí kapitoly) se bude jednat jen o pár desítek kilometrů.

Druhý způsob pohledu na parciální trolejbusy budou mít města, ve kterých trolejbusy doposud nejezdí. Tímto směrem hledí i hlavní město Praha, které v současnosti testuje provoz jednoho elektrobusu. Výsledky z provozu ukazují, že elektrobus je použitelný v ostrém provozu, ale je potřeba velmi pečlivě volit trasu, na které bude jezdit. I z osobní elektromobility se totiž ukazuje, že stoupání má na dojezd velice negativní vliv. Dopravní podnik Praha proto uvažuje použít na určité části tratě trolejbusové vedení pro zvýšení dojezdu. Velké převýšení by po cestě do kopce ukrojilo velkou část z kapacity baterie. Použití trolejového vedení v kopci by výrazně prodloužilo dojezd. Jednak by veškerá elektrická spotřeba byla v té chvíli hrazena pouze z trolejí, ale současně by se dobíjela baterie. V Praze by takové řešení bylo vhodné například na trase od Palmovky nahoru do Letňan. Trolejové vedení by bylo umístěno pouze v kopci, a to ještě jenom směrem nahoru. Při jízdě z kopce nejsou troleje potřeba, protože rekuperovaná energie se může ukládat do baterie. Je tu ale jedno technické omezení. Stávající trolejové sběrače nejsou dimenzovány na příliš velké výkony. Při dimenzování je potřeba kontrolovat maximální přípustný proud sběračem, zvláště v případě, kdy autobus stojí na místě. Z měření v Polské Gdyni, kde parciální trolejbusy testují, vychází pro stojící trolejbus maximální proud 200 A. Při jízdě je situace mnohem lepší, protože sběrač je chlazen proudem okolního vzduchu a také může odvádět teplo do studené troleje.

2.5.6. Automatizovaná výměna baterie

Stejně jako řemeslník vyměňuje vybitou baterii v elektrickém nářadí za nabitou, může stejného principu využívat i elektromobilita. Zatímco se jedna baterie používá, druhá se průběžně nabíjí. Po vybití první stačí baterie pouze vyměnit a řemeslník může pracovat vesele dál. Aplikovat tuto myšlenku také na provoz elektrických aut napadlo jistě již mnoho lidí. Z provozního hlediska je to velmi inteligentní metoda, jak zajistit téměř nepřerušený provoz elektromobilů a zároveň nezpůsobovat v síti výkonové špičky. Spíše naopak. V případě použití více baterií, je možné vyrovnávat spotřebu v síti tím, že baterie budou nabíjeny v období nízké poptávky po elektřině a případně i dodávat energii zpátky do sítě v době velké poptávky. Velká nevýhoda tohoto řešení je, že se jedná o velmi velkou investici s malou či spíše nulovou návratností, jak ukázal projekt společnosti Better Place v Izraeli. V roce 2011 její zakladatel a CEO Shai Agassi prohlásil: "*V roce 2016 plus mínus rok bude v Izraeli prodáno více elektrických než spalovacích aut.*" Realita je ale bohužel taková, že společnost v roce 2013 zbankrotovala s proinvestovanými 850 miliony dolarů. Jedním z důvodů krachu projektu byla nejspíš nutnost vlastnit speciálně upravené auto s konkrétní velikostí (tvarem) baterie, což v té době znamenalo koupit jediný model auta - Renault Fluence ZE původem z Turecka. [21][24] Nutit lidi kupovat si pouze jeden typ auta není řešením. Stejně tak ani nutit výrobce automobilů používat jen jeden tvar, a tím i velikost baterie. V případě budování výměnné stanice pro elektrobusy je situace lepší. Jednalo by se o řešení na míru pro konkrétní dopravní podnik, kde

je dopředu odhadnutelná využitelnost. Nicméně by to vyžadovalo velké počáteční investice nejen do vybudování samotných výměnných stanic, ale také investici do náhradních baterií. Těchto baterií by muselo být přibližně stejné množství, jako počet baterií v autobusech, které jsou aktuálně v provozu. Vzhledem k ceně baterií, kde se jedna kWh pohybuje v rozmezí 6000-8000 Kč/kWh, by jedna 160 kWh náhradní baterie pro elektrobus stála 960 000 až 1 280 000 Kč. Velký cenový rozptyl je způsoben skutečností, že výrobci z důvodu konkurenční výhody ceny samostatných baterií neuvádějí, nýbrž uvádějí pouze konečné ceny s vozidlem. Pro dopravní podniky, které chtějí otestovat provoz elektrobusů, je proto mnohem jednodušší (a také ekonomicky výhodnější) použít nabíjení na konečných stanicích. Přesto tato myšlenka není mrtvá a v budoucnu svoje uplatnění určitě nalezne. Kromě rychlého doplnění energie pro další dojezd má tento koncept ještě další velké výhody. Baterie se mohou dobíjet ideálním (pomalejším) proudem, který nebude příliš zkracovat životnost. Také se mohou dobíjet v době nižší poptávky po elektrické energii, což znamená nižší cenu za elektřinu a také vyrovnávání odběru v síti. Myšlenka zpětného dodávání energie do sítě je v budoucnu také reálná, ale jen v případě velkého množství rezervních baterií, což bude možné jen v případě výrazného snížení jejich cen.

Systémy pro výměnu baterií sice existují a dnes se již používají, jde však často jen o ruční výměnu pomocí například paletového vozíku nebo jiného podobného systému vyžadujícího ruční manipulaci. Plně automatizované systémy jsou náročné na koordinaci jak řídícího, tak i mechanického systému ve vozidle a na stacionárním zařízení. Po zkrachovalém projektu Better Place se o podobnou věc pokoušel i Elon Musk, CEO společnosti Tesla Motors, který v roce 2013 přestavil technologii na výměnu baterií za 90 vteřin. Jednu takovou stanici nechal postavit ve státě Kalifornie. Poté, co z pozvaných 200 majitelů automobilu Tesla v okolí stanici využilo pouze 5 lidí, a to pouze jednou, byl projekt zrušen. Stejný model chování se dá očekávat i v širším měřítku. Dle jeho slov jsou rychlonabíjecí stanice dostatečně rychlé a řidiči, kterým nestačí dojezd plně nabitého auta, si chtějí po dlouhé cestě odpočinout a raději využijí nabíjení zdarma. Provoz elektrobusu v MHD po celý den je již také možný, pokud se baterie průběžně během dne dobíjí. Sice je potřeba částečně upravit jízdní řád a vybrat vhodnou linku (vhodný profil trati), ale toto omezení se ukazuje jako přijatelnější než vysoké náklady v případě vybudování systému na automatickou výměnu baterií.

2.6. Způsoby připojení k nabíjecí infrastruktuře

U osobních automobilů se nejčastěji používá připojení pomocí kabelu. Ale kabely pro rychlonabíjení jsou dosti velké, těžké a špatně se s nimi manipuluje. V případě rychlého nabíjení elektrobusu je potřeba přenést ještě mnohem větší výkon, což by znamenalo tak velký a těžký kabel, že manipulovat s ním na každé konečné zastávce není příliš rozumné řešení. Pro velké výkony je potřeba nějaké automatizované připojení k napájecí síti nebo případně bezkontaktní neboli indukční nabíjení.

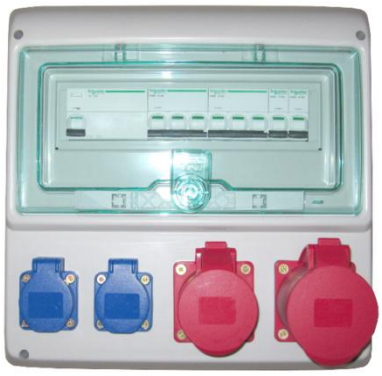
2.6.1. Kabelem

Připojení pomocí kabelu je vhodné pro nabíjení elektrobusu během noci, kdy je potřeba nejen dobít baterii do 100 %, ale také tzv. vybalancovat jednotlivé články pomocí pomalého nabíjení. Podrobněji o balancování v kapitole ***2.8.4 BMS – Battery management system***. Následující tabulka ukazuje parametry používaných kabelových připojení a jejich nabíjecí výkony.

Tab. 2.4 Používané kabelové připojení

poč. f.	napětí	proud	výkon
	V	*A*	*kW*
1	230	10	2,3
1	**230**	**16**	**3,7**
1	230	32	7,4
3	**400**	**16**	**11,1**
3	**400**	**32**	**22,2**

V případě, že požadujeme dobít baterii o kapacitě 180 kWh během noci (8 hodin) z téměř vybitého stavu do 100 %, potřebujeme výkon alespoň 22 kW. Tomuto výkonu vyhovuje pouze 3 fázové připojení k síti o napětí 400 V a proudu 32 A. Použít se může běžně dostupná standardizovaná 3f zásuvka. Na ***Obr. 2.16*** větší červená zásuvka vpravo. Ostatní zásuvky s menším napětím či proudem jsou použitelné pouze pro osobní elektromobily. Zleva dvě modré na 230 V / 16 A a uprostřed červená 3 fázová zásuvka na max. proud 16 A. Jednofázové zásuvky na větší proudy až 32 A sice také existují (***Obr. 2.18***), ale používají se minimálně, a to hlavně k připojení výkonných jednofázových svářeček. Automobil k nim nelze přímo připojit. Dle normy ČSN EN 62196-1 lze elektromobil připojit 1f (32 A) pouze pomocí Wallboxu[11]. Toto zařízení slouží jako jistící prvek dimenzovaný na trvalý odběr velkého proudu a je zároveň vybaven kabelem s konektorem typu Mennekes ***(Obr. 2.17)***, který je kompatibilní s většinou elektromobilů. Zároveň tento konektor slouží pro připojení k 3f síti 400 V a dále má extra piny pro kontrolu uzemnění vozidla a pro komunikaci a řízení nabíjení.



Obr. 2.16 Zásuvkový rozvaděč

Obr. 2.18 Jedno fázová zásuvka pro proudy až 32 A

Obr. 2.17 Konektor Typ 2 od firmy Mennekes

[11] Jedná se o zařízení sloužící k připojení elektrického vozidla dimenzované na trvalý odběr velkého proudu a jako jistící prvek. Může být součástí nabíjecího kabelu, nebo jak název napovídá, připevněn na stěnu, a je zároveň osazen kompatibilním konektorem.

Někteří výrobci osazují své elektrobusy opravdu velkými bateriemi, jako například firma SOR Libchavy, která v listopadu 2016 představila na veletrhu CZECHBUS svůj nový model s kapacitou baterie 225 kWh. Nabít tuto baterii výkonem 22 kW trvá 10 hodin. Pokud autobus má jezdit na běžné lince, tak nemá pro nabíjení k dispozici 10 nebo 8 hodin, ale spíše jen 6. Pro nabití 225 kWh baterie během 6 hodin potřebujeme přenášet výkon skoro 40 kW. Pro tyto výkony se již používá přenos pomocí stejnosměrného proudu s nabíjecím měničem mimo vozidlo, na rozdíl od připojení střídavým proudem, kde je nabíjecí měnič umístěn přímo ve vozidle a zabírá nejen místo, ale i zvyšuje hmotnost. V případě stejnosměrného připojení je nabíječka umístěna mimo vozidlo, komunikuje s ním a do vozidla již posílá upravenou elektřinu putující přímo do baterie o napětí a proudech, které v té dané chvíli baterie potřebuje. Napětí se pohybuje v řádech stovek voltů. Tomuto nabíjení se alespoň v oblasti osobních elektromobilů říká rychlodobíjení. V Evropě jsou dnes oficiálně dva uznávané standardy pro rychlodobíjení. Tím je CCS-Combo 2 a asijská verze CHAdeMO, která byla v Evropě uznána teprve nedávno (***Obr. 2.19***). Pro rychlodobíjení elektrobusů, například na konečné, je výkon tohoto systému také nedostatečný. Navíc jakákoli manuální manipulace je nežádoucí. Autobus, který na pár minut zastaví ve stanici, se musí rychle a hlavně automaticky připojit k nabíječce a během chvíle načerpat opravdu velké množství energie. Zde se používá tzv. sběračový systém.

Obr. 2.19 konektory CHAdeMO (vlevo) a CCS-Combo 2 (vpravo)

2.6.2. Sběračem

Systémů pro automatické připojení nabíječky k vozidlu je mnoho. Není mým cílem zde uvádět výčet všech dostupných systémů, ale spíše popsat základní principy. Systém musí splňovat nejen výkonové požadavky, ale také musí být rychlý, spolehlivý a v neposlední řadě bezpečný. Je třeba si uvědomit, že pro nabíjení se obvykle používá 600 V nebo 750 V. Zároveň ale přepravujeme cestující a je nezbytně nutné zajistit jejich bezpečnost. Kombinace napětí v řádech stovek voltů a vozidla jedoucího na pneumatikách, tedy neuzemněného, je dosti nebezpečná a vyžaduje speciální přístup. Pro přenos energie nám stačí dvoupólové připojení, to ale musí být právě z důvodu bezpečnosti galvanicky odděleno od napájecí soustavy, nebo můžeme použít více pólové připojení s uzemněním.

2.6.2.1. Dvoupólové připojení

Aby ekologické elektrobusy byly zároveň ekonomické, je třeba využít maximálně jejich přednosti, a tou jsou nízké provozní náklady ve srovnání s klasickým autobusem. Nízká cena elektrické energie je proto dosti důležitá. Velké dopravní podniky používající elektrická vozidla jako jsou tramvaje, metro či trolejbusy, nakupují elektřinu z vysokého napětí za výhodné ceny. Je proto logické připojit elektrobusy právě do této své elektrické sítě. Používaná napěťová hladina v ČR pro MHD je 600 V, respektive 750 V u metra. Každá transformace napětí je spojena se ztrátami. Díky možnosti poskládat články v baterii na libovolné napětí, mají baterie v elektrobusech právě takové napětí, které odpovídá napájecí sítí. Tramvaje používají pro napájení jeden trolejový drát a kolejnice. V případě autobusu je potřeba tento druhý pól také umístit nahoru a použít trolejové dráty dva. Na rozdíl od trolejbusu, elektrobus se nepotřebuje pod těmito trolejemi pohybovat, ale na druhou stranu se potřebuje k nim často a automaticky připojovat. Je proto vhodnější použít pantograf podobný tomu na tramvaji, který je upravený pro dvě troleje. Zjednodušeně řečeno stačí na konečné stanici natáhnout pár metrů dvojité troleje a na elektrobus umístit sběrač. Z důvodu bezpečnosti je ještě nutné napájení trolejí galvanicky oddělit od tramvajové sítě, která je uzemněná. Řešení je to relativně jednoduché, a nevyžaduje velké stavební úpravy. Nevýhodou je potřeba vozit na každém vozidle relativně mechanicky složité, a tím i drahé zařízení. Toto řešení je vhodné pro testovací provozy o malém počtu elektrobusů.

Pokud elektrobus vybavíme trolejbusovými sběrači, nebo chcete-li, trolejbus vybavíme bateriemi, tak se může dobíjet i za jízdy. O takovém elektrobusu mluvíme spíše jako o parciálním trolejbusu. Velkou výhodou je doba, za kterou se může baterie nabíjet. Z provozních testů parciálních trolejbusů v Polské Gdyni je plně dostatečné 50% zatrolejování[12]. Od 33-50 % je potřeba mít možnost nouzového dobíjení na konečných a je potřeba navíc prověřit i čas strávený pod trolejí. Mohlo by se stát, že část trati bez trolejí by byla v místech častých dopravních zácp nebo v prudkém kopci. Vlivem těchto faktů by docházelo k výrazně většímu vybíjení baterie. Při zatrolejování menším než 33 % je dobíjení na konečné nutností [23]. Nevýhodou jsou omezené možnosti přenosu výkonu. Při jízdě je trolejový sběrač schopen přenášet 500-600 A, ale současně napájíme i spotřebu trakčních motorů. Když trolejbus stojí, tak sice máme téměř všechnu energii k dispozici pro dobíjení akumulátoru, ale z důvodu přehřívání trolejového sběrače musí být proud omezen na max. 200 A.

2.6.2.2. Více pólové s uzemněním

Snaha co nejvíce odlehčit a zlevnit elektrobus vede k systému více pólového připojení s uzemněním a s inverzním sběračem. Pokud zajistíme dostatečné uzemnění autobusu, není již třeba používat galvanické oddělení, a tím se šetří náklady. Potřebujeme k tomu 3. pól, který je zemnící, a 4. pól, který slouží pro ověření správného uzemnění vozidla. Existuje ještě i více pólové připojení, ale tyto 4 póly jsou minimem a přitom dostatečné. Zároveň je nutná bezdrátová komunikace. Nabíjecí stanice potřebuje informaci, že je přítomen autobus a stojí na správném místě, teprve poté může spustit pantograf. Současným trendem je připojení pomocí 4 pólového inversního pantografu, což znamená, že pantograf je umístěn na sloupu

[12] Úseky trati s trolejovým vedením.

a spouští se dolů na autobus. Jeho životnost a spolehlivost bude mnohem větší, než kdyby byl umístěn na střeše autobusu, kde na něj prší, padají nečistoty a stále je vystaven otřesům. Na střeše autobusu jsou pouze 4 ližiny, které jsou navíc proti námraze vyhřívané. Pokud bude linka obsluhována pouze elektrobusy, tak jejich počet bude mnohem větší než počet nabíjecích stanic. To znamená snížení počtu pantografů, a tím i nákladů. Takovéto řešení používá společnost Volvo, výrobce autobusů ve spolupráci s elektrotechnickou firmou ABB, která dodává nabíjecí infrastrukturu. Je to nejspíš nejvýhodnější varianta v případě autobusové linky plně obsluhované elektrobusy.

Obr. 2.20 Elektrobus Volvo a inverzní pantograf ABB

2.6.3. Bezkontaktní (indukční)

Systém je založen na elektromagnetické indukci mezi dvěma cívkami. Jedna cívka je umístěna na spodku vozidla a druhá je zabudovaná do vozovky. Stacionární část je připojena k napájení a vytváří proměnné magnetické pole, které v druhé cívce na vozidle indukuje opět střídavý elektrický proud. Nabíječka musí být proto umístěna na vozidle. Pokud umístíme do vozovky za sebou hodně cívek, autobus je schopen přijímat energii i za jízdy. Pro lepší účinnost, je potřeba umístit cívky co nejblíže k sobě, což na druhou stranu snižuje světlou výšku vozidla. Proto některé systémy spouští sekundární cívku po zastavení dolů blíže vozovce. Účinnost takového indukčního přenosu energie je cca 95 %. Výhodou bezkontaktního nabíjení je absence mechanických prvků v dobíjecí infrastruktuře, které jsou jinak vystaveny vlivu počasí či vandalismu, a jistě také kladný estetický vliv. Existují jisté obavy ohledně zdravotního rizika, například vliv na kardiostimulátory. Indukční systémy se v zahraniční již delší dobu testují a žádný negativní zdravotní dopad nebyl zjištěn. Energetické ztráty 5 % jsou při výkonech 200 kW výrazné a vyvolávají nutnost dalšího chlazení, což vede k další spotřebě energie a k rizikům poruch. Asi největší nevýhodou je nutnost instalovat rozměrné cívky pod povrch vozovky, což přináší značné stavební náklady (výkopové práce, vlastnictví pozemků aj.). Použití v českých podmínkách není vyloučené, ale jeví se jako poměrně málo pravděpodobné.

2.7. Prodlužovač dojezdu (Range Extender)

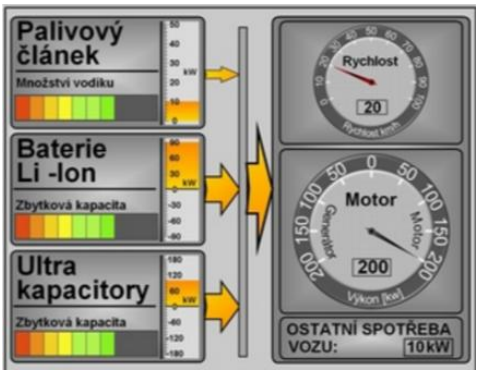
Slabinou vozidel na baterii je jejich dojezd. Na městských linkách se tento nedostatek řeší průběžným dobíjením. Na příměstských nebo dálkových linkách toto řešení použít nelze. Přesto několik řešení, jak prodloužit dojezd, existuje. Jednak to je možnost hybridního pohonu, a jednak použití prodlužovače dojezdu. V případě hybridních autobusů se jedná vlastně o dva systémy v jediném autobusu. Takový autobus má všechny součásti jako naftový autobus a také jako elektrobus. Znamená to velice složité a drahé zařízení. Baterie je přitom malá a slouží převážně pro využití kinetické energie, která by jinak byla ztracena.

Range extender, neboli prodlužovač dojezdu, má sice také naftový pohon, ale k situaci přistupuje hodně odlišně. Zde je primárním pohonem elektromotor a naftový motor pohání

pouze generátor, který vyrábí elektrickou energii a v případě jejího přebytku dobíjí baterii. Generátor nemusí pohánět pouze vznětový motor, ale třeba také mikro turbína spalující CNG. Pro generátor nepotřebujeme regulovat otáčky v takovém rozsahu jako pro přímý pohon vozidla, a proto lze využít i technologie, které se jinak v běžných vozidlech neobjevují. Systém se dá navrhnout tak, aby generátor i jeho pohon pracovaly v optimálních otáčkách s největší účinností. Jedná se ale stále jenom o prodloužení dojezdu. Systém sám o sobě není výkonově natolik silný, aby dokázal plnohodnotně pohánět autobus i při vybité baterii.

2.7.1. Palivový článek

Elektromobil sice může být teoreticky poháněn čistě palivovým článkem jako alternativa k bateriím či superkapacitoru, ale jeho dynamické vlastnosti jsou velmi omezené. Proto se většinou kombinuje s baterií, superkapacitorem či s oběma zároveň. Na takové spojení technologií se dá pohlížet i jako na elektromobil s prodlužovačem dojezdu, který má místo kombinace spalovacího motoru s generátorem palivový článek. V ČR máme jeden takový projekt pod názvem TriHyBus, což je zkratka z celého názvu Tripl Hybrid Hydrogen Bus. Jedná se o 12m autobus s motorem o výkonu 120 kW. Zdrojem energie je palivový článek o maximálním výkonu 50 kW od výrobce Proto Motor Fuel Cell GmbH. Tlakové nádrže na vodík pojmou 20 kg vodíku. Pro rychlé dodání či uložení elektrické energie slouží 4 ultrakapacitory o využitelné energii 1 kWh schopné dodat krátkodobě až 200 kW při rozjezdu a absorbovat až 300 kW při brzdění. Pro uložení většího množství energie slouží lithium-iontová baterie o maximálním výkonu 120 kW a celkové kapacitě 26 kWh. Průměrný dojezd této kombinace technologií je 275 km. Vozidlo je prototypem k demonstračním účelům vodíkové technologie. Provozuje ho ÚJV Řež a projekt spolufinancovala ze 75 % EU. Celkové náklady projektu se vyšplhaly na 83,6 mil. Kč. [34]



Obr. 2.21 Vizualizace toků energie v prostoru pro cestující [35]

Velkou nevýhodou palivových článků je samotný vodík. Jeho doprava a skladování je velmi komplikované a jeho výroba je energeticky náročná, a tím i drahá. Slibnou alternativou se stávají palivové články na etanol. Takovýto palivový článek v konečné fázi také funguje na vodík, ale ten si sám získává z jiného uhlovodíkového paliva, čímž může být právě etanol nebo i metan, který je z více než 90 % obsažen v zemním plynu. Velkou výhodou je technologicky dobře zvládnuté skladování a doprava zemního plynu i jeho cena. Etanolový palivový článek kromě elektřiny produkuje také CO_2, ale v případě použití bioetanolu vyrobeného z cukrové třtiny nebo syntetického metanu[13] dosahuje neutrální bilance[14] CO_2. Syntetický metan může být vyráběn z přebytků energie z obnovitelných zdrojů, a tím se stane provoz 100% ekologickým. Automobilka Nisan představila v srpnu 2016 v Brazílii první prototyp osobního automobilu poháněného právě tímto palivovým článkem s dojezdem přes 600 km. Prototyp jezdí na 100% etanol nebo směs etanolu a vody, kterým se nabíjí baterie o kapacitě 24 kWh.

[13] Uměle vyrobený plyn metanizací vodíku.
[14] Produkce CO2 při provozu palivového článku je rovna spotřebě CO2 při výrobě paliva.

Díky snadné dostupnosti a nízké hořlavosti etanolu nebo jeho směsi s vodou není systém závislý pouze na stávající infrastruktuře dobíjecích stanic. V budoucnu by lidé například mohli zastavit v obchodě a koupit si palivo přímo na pultu.

2.8. Dimenzování zásobníku energie

Na základě současného stavu techniky se mi jako nejpoužitelnější způsob dobíjení elektrobusu pro provoz v MHD jeví dobíjení na konečných stanicích. Dimenzovat zásobník energie je potřeba na více technických parametrů, než jen pouze na dojezd. Sice je to hodně podstatný údaj, který napadne asi každého jako první, ale zdaleka není jediný, na který musíme při dimenzování brát ohled.

2.8.1. Kapacita zásobníku

Energie potřebná pro požadovaný dojezd (neboli kapacita) se značí "A" (případně "E") a základní jednotkou je [Ws], případně rovnocenný ekvivalent [J]. Jednotka wattsekunda je ale velmi malá v porovnání s celkovou potřebnou energií pro dojezd, a proto v našem případě používáme [kWh]. Potřebnou kapacitu spočítáme jednoduše dle vzorce:

$$\mathrm{A\ [kWh]} = \mathrm{L} * \mathrm{e}, \tag{2.28}$$

kde *L [km]* je potřebná vzdálenost, kterou musí autobus ujet k další nabíjecí stanici, a *e* [kWh/km] je elektrická spotřeba autobusu na jeden ujetý kilometr. V případě nabíjecích míst vzdálených 20 km, průměrné elektrické spotřebě 1,5 kWh/km a 30 % rezervy na stárnutí baterie a nenadálé provozní události, vychází potřebná energie zásobníku:

$$\mathrm{A_{zas}} = \frac{\mathrm{e\ L}}{\mathrm{c}} = \frac{1{,}5 * 20}{0{,}7} = 43\ kWh. \tag{2.29}$$

Takováto baterie se běžně montuje do současných osobních elektromobilů, a proto není dále potřeba kontrolovat rozměry či váhu baterie. Umístit takovouto baterii do autobusu bude určitě možné.

2.8.2. Výkon

Pracovní režim autobusu je během provozu dosti proměnný, a tím se mění i požadavky kladené na výkon baterie. Extrémní požadavky na výkon nastávají při rozjezdu, rekuperaci či nabíjení.

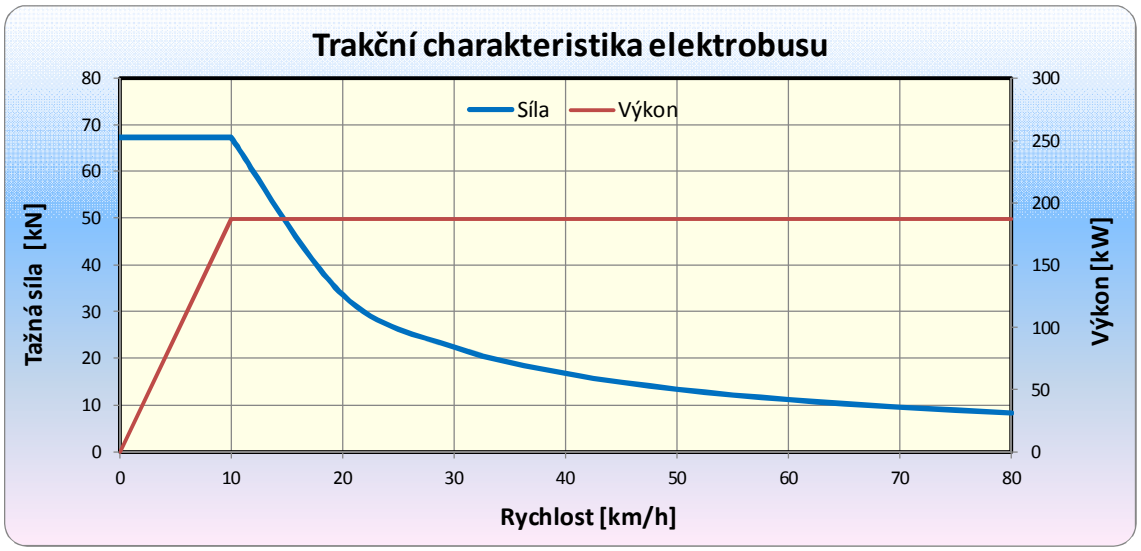
2.8.2.1. Rozjezd

Při rozjezdu potřebujeme z baterie odebírat výkon, který se rovná součtu výkonů trakčního pohonu (navýšeného o ztráty v motoru a měniči) a vedlejší spotřeby. Výkon motoru při rozjezdu lineárně roste až do jeho maximální hodnoty a dále je konstantní (za předpokladu stálého urychlování vozidla). Výkon na obvodu kol se spočítá jako násobek urychlující síly a rychlosti.

$$P\,[kW] = F\,[kN] * v\,[m/s]. \quad (2.30)$$

Naopak síla, která urychluje vozidlo, je zprvu konstantní a od dosažení maximálního výkonu nadále klesá tak, aby její součin s rychlostí nepřesáhl maximální výkon motoru. Viz graf na ***Obr. 2.22.*** Běžná hodnota jmenovitého výkonu pohonu u elektrobusu je 150-200 kW. Vedlejší spotřeba bude maximální v době zapnutého vytápění a všech ostatních spotřebičů na plný výkon.

Při vybíjení baterie dochází k vývinu ztrátového tepla, které je potřeba odvádět, jinak by mohlo dojít k poškození. Právě toto oteplení omezuje odebíraný výkon z baterie. Aby nedošlo k překročení limitní teploty, je baterie pod stálým dohledem systému BMS, který v případě zjištění vysoké teploty dá pokyn trakčnímu pohonu k omezení výkonu a v případě kritické teploty baterii přímo odpojí.



Obr. 2.22 Trakční charakteristika elektrobusu

2.8.2.2. Rekuperace

Existuje mnoho důvodů, proč využívat rekuperaci. Není to jen snížení provozních nákladů pomocí snížení trakční spotřeby a opotřebení brzd, ale také šetrnost vůči životnímu prostředí. Aby rekuperace fungovala, je třeba vyrobenou energii okamžitě spotřebovat nebo někam uložit. Vedlejší spotřeba P_{VED} nám v tomto případě pomáhá odebrat energii, ale dimenzovat musíme na nejnepříznivější situaci, a tou je zde nízká vedlejší spotřeba v období jara či podzimu, kdy není třeba topit ani klimatizovat. Výkon na obvodu kol se spočítá jako brzdná síla F_B násobená rychlostí. Tento výkon se musí dále vynásobit účinností pohonu a ponížit o výkon vedlejší spotřeby.

$$P_{rek} = F_B * v * \eta_{mot} * \eta_{přev} * \eta_{měnič} - P_{ved} \quad (2.31)$$

Vedlejší spotřeba nám sice výsledek bude snižovat, ale na druhou stranu musíme počítat s větší brzdnou silou. Autobus musí být schopen rychle reagovat na dopravní situaci před vozidlem a v případě potřeby rychle zpomalit či zastavit. V případě nouzového brzdění budou samozřejmě použity i mechanické brzdy. Z pohledu dimenzování baterie potřebujeme ukládat ještě větší výkon než při rozjezdu odebírat, ale na druhou stranu tato situace trvá kratší dobu. Ve výsledku nemusí být oteplení větší než při rozjezdu. Přesné hodnoty, jak velký výkon a po jak dlouhou dobu je baterie tento výkon schopna ukládat, dostaneme od výrobce. Rekuperační výkon se v praxi pohybuje kolem 300 kW.

2.8.2.3. Nabíjení

Nabíjecí výkon není zdaleka tak velký jako rekuperační či rozjezdový. Z pohledu oteplení je ale nejproblematičtější. Baterie se nabíjí desítky minut a teplo vyvíjené během nabíjení je potřeba z baterie odvádět. Chlazení baterie je proto klíčové.

Velikost potřebného nabíjecího výkonu spočítáme z potřebné energie na ujetí jednoho cyklu a z času, který máme k dispozici k nabíjení na konečné.

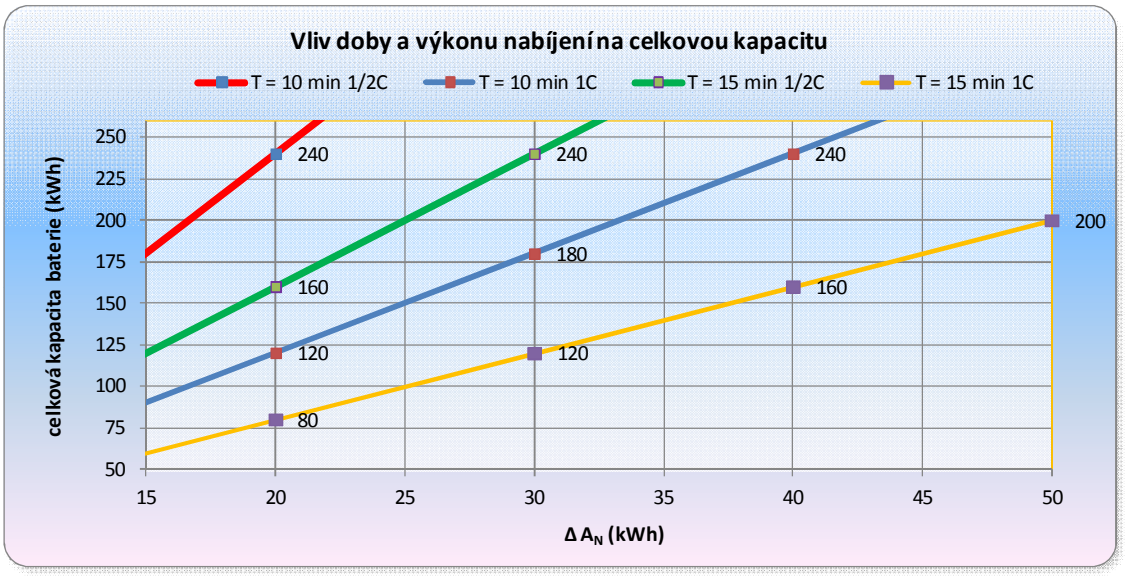
$$P_{nab} = \frac{\Delta A_n}{T_n} = \frac{e\,L}{T_n} = \frac{1{,}5 * 20}{0{,}25} = 120\ \text{kW} \tag{2.32}$$

Typická doba nabíjení zcela vybité baterie do plného stavu je 2 hodiny. To znamená, že v případě 100 kWh baterie bude nabíjecí výkon 50 kW. To se někdy označuje jako 0,5 C (nabíjecí výkon je polovinou deklarované jmenované kapacity). Snaha co nejrychleji nabít baterii tlačí na výrobce baterií, kteří proto vyrábějí i baterie vhodné pro rychlé nabíjení. Jejich dobrá vlastnost pojmout v krátkém čase velké nabíjecí výkony je ale vykoupena sníženou měrnou kapacitou. Jak hodně toto rychlonabíjení ovlivňuje životnost baterie, je předmětem testování v reálných provozech po celém světě.

Lineární nabíjení se u nejpoužívanější li-Ion baterie nepoužívá. Zpočátku můžeme použít vysoké nabíjecí proudy, ale když napětí dosáhne stanoveného limitu, tak nabíjecí proud postupně snižujeme, abychom baterii nepoškodili. Průběhy proudů a napětí jsou vidět na ***Obr. 2.3***. V běžném provozu nikdy nebudeme mít v baterii méně energie než je 30 % z celkového množství (rezerva) a z důvodu velmi pomalého nabíjení v oblasti 90-100 % se zde také nebudeme často pohybovat. Nejčastější pracovní oblast je proto 50-90 %. Pro zjednodušení můžeme říci, že v této oblasti je nabíjení lineární.

Výslednou potřebnou kapacitu baterie lze odhadnout z grafu (***Obr. 2.23***) se 4 uvažovanými módy dobíjení na konečné zastávce. 10 nebo 15 minutové nabíjeni s normálním (0,5 C) nebo se zrychleným nabíjením (1 C). V mém modelovém případě potřebuji dobít 30 kWh energie. Pokud chci nabíjet šetrným způsobem 0,5 C a maximálně 15 minut, potřebuji baterii o kapacitě 240 kWh (zelená přímka). Graf jsem ukončil na hodnotě 260 kWh, protože o větší baterii z důvodu její velikosti a váhy ani nemá cenu uvažovat. Na tomto příkladu je vidět velký rozdíl mezi potřebnou kapacitou z pohledu dojezdu (30 kWh) a potřebnou kapacitou z pohledu rychlého dobíjení (240 kWh). Při nabíjení na konečných zastávkách není vůbec potřeba kontrolovat baterii z hlediska dojezdu, ale jen z hlediska nabíjecího výkonu. Není potřeba

mnoho množství energie pro ujetí jednoho oběhu, ale doplnit tuto energii zpátky do baterie šetrným způsobem během pouhých 15 minut (nebo dokonce 10 minut) vyžaduje velikou, těžkou a v neposlední řadě také drahou baterii. Rychlonabíjení o velikosti 2 C (nebo i více) je také možné řešení, ovšem na úkor životnosti baterie.



Obr. 2.23 Vliv doby nabíjení

V případě, že elektrobus vyjíždí ráno s takto velikou a plně nabitou baterií, není na druhou stranu nutné během 10-15 minutové pauzy doplnit celých 30 kWh. Můžeme si dovolit energii nechat postupně klesat a do plného stavu ji opět dobít až v noci. Viz schematický obrázek ***Obr. 2.10***. Když budeme dobíjet jen 20 kWh, tak celková kapacita baterie bude 160 kWh, což je o 33 % menší baterie. Správně dimenzovat baterii znamená zvolit tak malou baterii, která stačí ještě pojmout nabíjecí výkon a současně stačí během celého dne hradit toto nedostatečné částečné dobíjení. Je jasné, že k tomu je již zapotřebí znát konkrétní jízdní řád i výškový profil trati. Tímto se budu dále detailně zabývat v následujících kapitolách.

2.8.3. Provozní teplota baterie

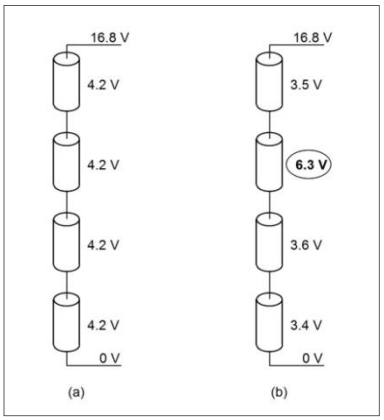
Rozmezí teplot, ve kterých se autobus (a tedy i baterie) pohybuje, je docela velké. Musíme počítat s extrémními mrazy až -20 °C a v létě s horky až 40 °C. Baterie se při provozu díky ztrátám zahřívají, někdy až extrémně (při rychlonabíjení). Proto by horní hranice teploty baterie byla mnohem vyšší, klidně i přes 100 °C. Takové baterie, které by v těchto teplotách dokázaly pracovat, ale neexistují. Je proto nutné jejich teplotu upravovat tak, aby se pohybovala co možná nejblíže jejich optimální provozní teplotě (cca 20-50 °C). V zimním období lze baterii v průběhu noci vyhřívat tak, aby ráno byla připravená pro provoz. Během provozu by tepelné ztráty v baterii měly být dostatečné pro udržení provozní teploty. Tato regulace nijak nesnižuje dojezd, protože během noci je elektrobus připojen k síti a čerpá energii odtud. Mnohem horší situace nastává v horkém létě, kdy pouhé ofukování venkovním vzduchem ke chlazení nestačí a je nutné baterii aktivně ochlazovat. V tomto případě je elektrobus již v provozu a není jiná možnost, než energii pro provoz klimatizace brát z baterie a tím bohužel snižovat dojezd. Udržovat optimální teplotu je důležité hlavně z důvodu životnosti baterie. Čím větší rozptyl pracovních teplot, tím rychlejší stárnutí. Konkrétní čísla zde není nutné uvádět jednak proto, že se dosti liší v závislosti na použité technologii, a jednak je to důležité převážně pro výrobce elektrických autobusů. Pro účely této práce stačí informace, že nejen cestující, ale i baterie, je potřeba udržovat v dobré tepelné pohodě.

2.8.4. BMS – Battery management system

Jako trakční baterie se používá Lithium iontová technologie z důvodu její největší kapacity na kilogram a objem. Bohužel má oproti Ni-Cd či Ni-MH jednu velkou nevýhodu. Li-Ion baterie jsou velice citlivé na dodržování bezpečné pracovní oblasti. V případě práce mimo tuto bezpečnou oblast dochází ke snížení životnosti, ale může také dojít k fyzickému poškození článku a někdy i k explozi. Bezpečná pracovní oblast je dána intervalem dovoleného napětí, proudu a teploty. V případě překročení pracovní oblasti dochází k následujícímu:

- vyšší napětí – poškození či hoření v případě přetlaku
- nižší napětí – poškození až vnitřní zkrat
- vyšší či nižší teplota – výrazné snížení životnosti
- vysoké proudy – snížení životnosti.

Konkrétní hodnoty jsou velmi závislé na použité chemii a konstrukci článku, stejně jako jeho jmenovité napětí, které se pohybuje u Li-Ion technologie okolo 3,7 V. Pro trakční aplikaci potřebujeme baterii o napětí v řádech stovek voltů. Jednotlivé články jsou proto spojovány do sérií a následně se tyto tzv. *Stringy* spojují paralelně pro dosažení potřebné kapacity. I přes veškerou snahu není možné vyrobit naprosto identické články, které pak mají v důsledku rozdílného vnitřního odporu při provozu odlišné napětí. Na obrázku ***Obr. 2.24.b*** je příklad nevybalancovaného napětí stringu. Pokud bychom měřili pouze celkové napětí, tak tato rozdílná napětí na článcích nelze poznat. Při nabíjení by pak docházelo



Obr. 2.24 Nevybalancované napětí stringu [13]

k poškozování článku s vyšším napětím a při vybíjení by docházelo k poškozování článku s nižším napětím. Aby se tak nestalo, je naprostá nezbytnost použít sytém, který kontroluje a upravuje napětí na jednotlivých článcích. Tomuto systému se říká BMS, neboli Battery management system. Primárním účelem tohoto systému je ochrana baterie, ale když už se musí instalovat toto poměrně složité zařízení kontrolující každý jednotlivý článek (kterých může jich být klidně i 200), tak se nabízí možnost využití BMS i k jiným funkcím. Jako například:

- monitoring baterie
- odhad stavu baterie
- maximalizace výkonu baterie
- komunikace s externím zařízením nebo s uživatelem
- ochrana baterie.

Úkolem tohoto systému je zajistit požadované parametry nabíjení a vybíjení. Mezi tyto parametry patří zejména elektrické napětí, elektrický proud a teplota akumulátorů. BMS může dát pokyn pro omezení nabíjení či snížení výkonu motorů nebo v nouzových situacích sériovou větev či celou baterii rovnou odpojit.

3. Dopravně energetická analýza provozu elektrobusu na malém městě

Městská hromadná doprava neznamená pouze dopravní podnik provozující desítky vozidel. I malé město může pro své občany zajišťovat hromadnou dopravu, byť to může znamenat provoz jediného autobusu. Využít v tomto případě nějaký menší naftový autobus je jistě nejjednodušší řešení. Nicméně i lidé v malém městečku mají nárok na čistou a tichou veřejnou dopravu. Proč nevyužít technického pokroku a použít rovnou nadčasovou dopravu? Vlastně vzhledem k cílům vytyčeným na Pařížské konferenci to už ani tak nadčasová doprava není, dokonce by se ve velmi brzké době měla stát standardem. V této kapitole se pokusím uplatnit znalosti získané a popsané v předchozích kapitolách a zjistit, co by znamenalo realizovat provoz elektrobusu na malém městě. Zaměřím se na technickou proveditelnost s přihlédnutím k ekonomickému aspektu.

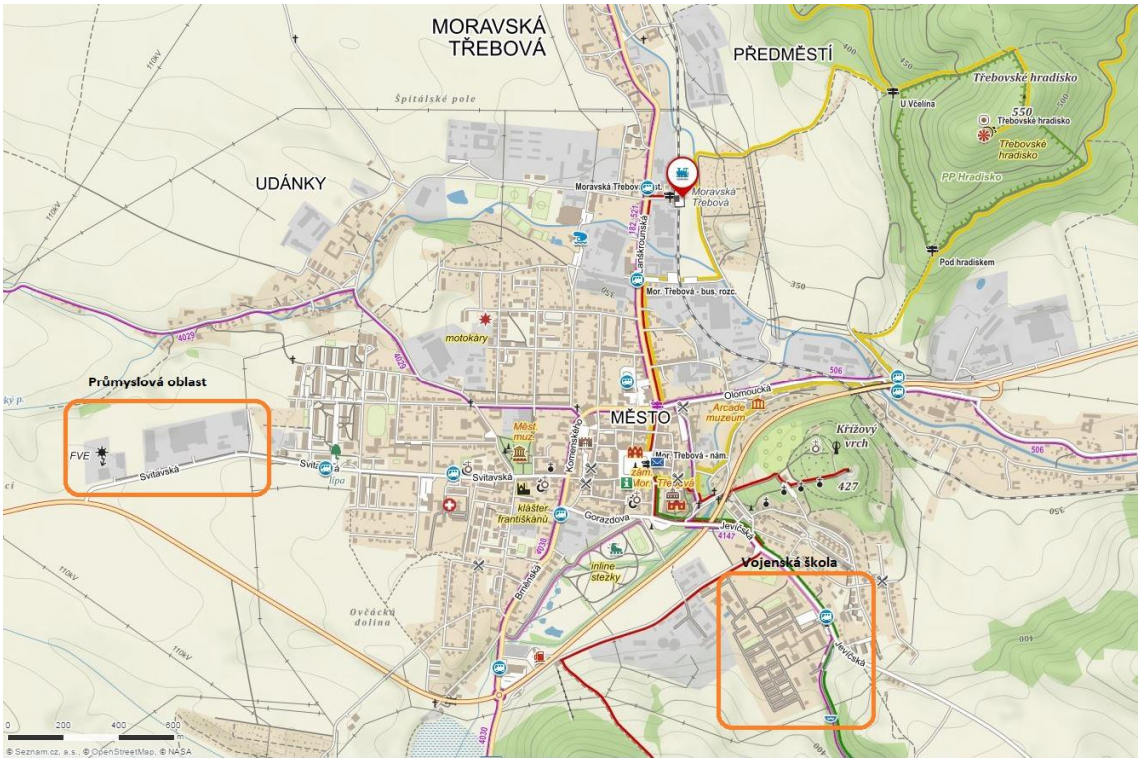
Jako vzorové město mi poslouží Moravská Třebová, které má sice dobré vlakové spojní, ale nádraží je situováno na okraji města a dojít pěšky od vlaku na druhý konec města trvá půl hodiny. Z tohoto důvodu město zvažuje zavedení pravidelné linky autobusu, který by občany odvážel a svážel k vlakovému nádraží.

3.1. Moravská Třebová

Město Moravská Třebová patří rozlohou a počtem obyvatel spíše mezi menší města. Leží na pomezí Čech a Moravy v nadmořské výšce 360 m. Počet obyvatel je něco málo přes 10 000. Městem prochází silniční komunikace z Olomouce do Hradce Králové a také je napojeno na železniční uzel v České Třebové (cca 20 km).

3.1.1. Přepravní poptávka

Městská doprava v Moravské Třebové má sloužit převážně k rozvozu obyvatel od vlakového nádraží po příjezdu vlaku a zároveň i pro svoz obyvatel z města k nádraží. Na mapě Moravské Třebové (***Obr. 3.1)*** jsem vyznačil oblasti s vyšší dopravní poptávkou. V západní oblasti se nachází nedávno vzniklá průmyslová zóna a na severovýchodním cípu je Vojenská střední škola a Vyšší odborná škola Ministerstva obrany. Obě dvě oblasti jsou poměrně hodně vzdáleny od vlakového nádraží, které je situováno na kraji města v severní části. Kromě zmíněných dvou oblastí je vhodné také dopravně obsloužit vzdálenější oblast, tudíž jižní část města. Provoz o víkendu nebudu uvažovat, protože očekávám minimální přepravní poptávku. Jak průmyslové centrum, tak i škola nejsou o víkendu v provozu, a také vlak slouží obyvatelům převážně pro cesty do zaměstnání.



Obr. 3.1 Mapa Moravské Třebové

3.1.2. Návrh vedení linky

Z dopravní poptávky vychází potřeba propojit čtyři oblasti. Sever, jih, jihovýchod a západ. Výchozí stanici jsem přirozeně umístil před vlakové nádraží, kde by se autobus mohl také dobíjet, případně i přes noc parkovat. V centru města se nachází autobusové nádraží a po městě několik stávajících autobusových zastávek, kde zastavují meziměstské autobusy přijíždějící do Moravské Třebové. Tyto zastávky by se přirozeně použily i pro městskou dopravu. Do další mapy jsem zakreslil trasu, která spojuje zmiňovaná místa a vyznačil existující stanice na navrhované trase. Směr jsem zvolil od nádraží nejprve k průmyslové zóně, pak po obchvatu k zastávce *Lidl* (G), odtud směrem zpět do centra ke stanici *Brněnská* (H) a konečně k vojenské škole. Zpátky by autobus nejel po stejné trase, ale u zastávky *Brněnská* by zatočil doprava hned směrem k centru a dále k vlakovému nádraží. Na trase jsem navrhl 3 nové zastávky, které doposud neexistují. První nová zastávka *Průmyslová* (F) by byla hned u nového průmyslového centra. Druhá u školy s navrhovaným názvem *Vojenská škola* (J). Mezi *Vojenskou školou* a *Brněnskou* by byl hodně dlouhý úsek bez zastávky, proto jsem asi v polovině cesty vytvořil ještě jednu zastávku. Nazval jsem jí *U Hřbitova* (I) vzhledem k nedalekému hřbitovu. Přehled trasy s vyznačením zastávek jsem pro lepší představu umístil na satelitní snímek města ***(Obr. 3.2).***

Obr. 3.2 Navrhovaná trasa elektrobusu v Moravské Třebové

Pro výpočet jízdní doby jsem potřeboval znát vzdálenost zastávek a průměrnou rychlost, kterou se autobus v městských podmínkách pohybuje. Vzdálenost jsem měřil pomocí nástroje na měření vzdálenosti, který je dostupný ve většině on-line map. Pro potřeby výpočtů rozeznáváme různé průměrné rychlosti. Jednak to je průměrná technická rychlost, což je průměrná rychlost pohybu autobusu jedoucího v klikatých uličkách města včetně zastavování

na semaforech či přechodech. Dále můžeme mluvit o cestovní rychlosti, což je vlastně technická rychlost, do které je ale ještě započítána doba strávená na zastávkách. Pro potřeby srovnání různých dopravních linek se ještě uvádí oběhová rychlost. Tu spočítáme jako celkový počet najetých kilometrů za den, děleno počtem hodin denního provozu. Je to dobrý ukazatel vytíženosti daného autobusu. Elektrobusy mají oběhovou rychlost často nižší, neboť z důvodu nabíjení baterií je volena taková linka, která má delší pauzy na konečné stanici, nebo je jízdní řád pro potřeby elektrobusů náležitě upraven. Cílem je dosáhnout takového stavu techniky, kdy elektrobus dosáhne na stejné hodnoty oběhové rychlosti, jako mají naftové autobusy.

Pro výpočet jízdní doby mi posloužila technická rychlost autobusů obvyklá v jiných městech. Rozšířenou oblast města rozdělujeme na intravilán a extravilán. Intravilánem se rozumí část území obce, která je z větší části zastavěna. Typická technická rychlost v intravilánu se pohybuje kolem hodnoty 16 km/h, kterou jsem také použil pro výpočty. Protože v mém návrhu trasy autobus jede také částečně mimo obec po obchvatu, tak jsem úsek mezi zastávkami *Průmyslová* a *Lidl* označil jako extravilán s průměrnou rychlostí 35 km/h. V tabulce ***Tab. 3.1*** to rozlišuji písmeny "I" a "E". Pro zpřehlednění výpočtů v programu Excel si buňky, kam zadávám vstupní data, označuji žlutě. Buňky s výpočty nechávám bílé. Celková doba jízdy od konečné ke konečné mi výpočtem vyšla 40 minut. To je již na první pohled dobré, protože při hodinovém taktu, který vlaky často mívají, zůstává dostatečný prostor pro nabíjení.

Tab. 3.1 Seznam zastávek

			Rychlost	Čas	Vzdálenost
	Název zastávky	E/I	*km/h*	*mm:ss*	*m*
A	Železniční stanice	I	16	00:00	-
B	Lanškrounská	I	16	01:55	378
C	Autobusové nádraží	I	16	03:24	773
D	Nemocnice	I	16	04:07	965
E	U Komína	I	16	02:14	464
F	*Průmyslová (nová)*	I	16	02:56	648
G	Lidl	E	35	04:16	2 200
H	Brněnská	I	16	02:46	606
I	*U Hřbitova (nová)*	I	16	03:20	756
J	*Vojenská škola (nová)*	I	16	02:12	455
I	*U Hřbitova (nová)*	I	16	02:12	455
H	Brněnská	I	16	03:20	756
C	Autobusové nádraží	I	16	03:07	700
B	Lanškrounská	I	16	03:01	670
A	Železniční stanice	I	16	01:55	378
	Suma			**40:47**	**10 204**

3.1.3. Návrh jízdního řádu

Navrhovaná trasa elektrobusu má sloužit především pro dopravní spojení obyvatel s vlakovým nádražím při cestě do práce a z práce. Při návrhu jízdního řádu jsem proto vycházel z časů příjezdu a odjezdu vlaků v pracovním dnu dle jízdního řádu platného pro rok 2015-2016 (příloha č. 1). Vlaky jezdí ráno a odpoledne v pravidelném hodinovém taktu, ale kolem poledne je vypravováno vlaků méně a není to vždy ve stejnou minutu. Pokud to jen bylo možné, volil jsem odjezd e-busu od nádraží deset minut po příjezdu vlaku z České Třebové. Protože se zde vlaky křižují, je odjezd vlaků směrem Česká Třebová většinou ve stejnou dobu jako příjezd. To je velmi výhodné, protože elektrobus dle mého výpočtu zvládne svou trasu ujet za 40 minut (spíše rychleji), takže se stihne vrátit zpět na nádraží v ideálním čase 10-15 minut před odjezdem dalšího vlaku, tak aby si cestující stihli koupit lístek a v klidu počkat na příjezd vlaku. První příjezd vlaku ve 4:19 a poslední odjezd v 22:58 jsou z mého pohledu tak okrajovou záležitostí, že jsem ani jejich návaznost na městkou dopravu neuvažoval. V dopoledních hodinách nejezdí vlaky bohužel v hodinovém taktu a také se na nádraží nekřižují, bylo proto obtížné k tomu přizpůsobit jízdní řád elektrobusu. Přišla mi důležitější návaznost na odjezdy vlaků, proto jsem tomu při návrhu jízdního řádu dal prioritu před návaznosti na příjezdy, kdy 8. spoj odjíždí 22 minut po příjezdu vlaku a 7. spoj dokonce 41 minut. Návaznost na odjezdy se kromě jednoho případu (6. spoj má na přestup 21 minut) podařilo navrhnout do 12 minut. Autobusový spoj odjíždějící od nádraží v 10:05 nemá vůbec žádnou návaznost, ani na příjezd ani na odjezd vlaku. Mohl by být proto zrušen v případě potřeby dodatečného nabíjení elektrobusu. Zatím ale budu při výpočtech s tímto spojem počítat. Výsledný navrhovaný jízdní řád je znázorněn v ***Tab. 3.2***.

Tab. 3.2 Jízdní řád

Příjezdy vlaků z České Třebové

	5:29		**6:29**	**7:29**			**11:05**		**13:05**	**14:05**	**15:05**	**16:05**	**17:05**	**18:05**	**19:05**		**21:05**
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*
0 **Železniční stanice**	5:39	6:29	7:10	7:51	9:05	10:05	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15	17:15	18:15	19:15	20:15	21:15
2 **Lanškrounská**	5:40	6:30	7:12	7:53	9:06	10:06	11:16	12:16	13:16	14:16	15:16	16:16	17:16	18:16	19:16	20:16	21:16
5 **Autobusové nádraží**	5:44	6:34	7:15	7:56	9:10	10:10	11:20	12:20	13:20	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20	21:20
9 **Nemocnice**	5:48	6:38	7:19	8:01	9:14	10:14	11:24	12:24	13:24	14:24	15:24	16:24	17:24	18:24	19:24	20:24	21:24
12 **U Komína**	5:50	6:40	7:21	8:03	9:16	10:16	11:26	12:26	13:26	14:26	15:26	16:26	17:26	18:26	19:26	20:26	21:26
15 **Průmyslová**	5:53	6:43	7:24	8:06	9:19	10:19	11:29	12:29	13:29	14:29	15:29	16:29	17:29	18:29	19:29	20:29	21:29
19 **Lidl**	5:57	6:47	7:29	8:10	9:23	10:23	11:33	12:33	13:33	14:33	15:33	16:33	17:33	18:33	19:33	20:33	21:33
22 **Brněnská**	6:00	6:50	7:31	8:13	9:26	10:26	11:36	12:36	13:36	14:36	15:36	16:36	17:36	18:36	19:36	20:36	21:36
25 **U Hřbitova**	6:03	6:53	7:35	8:16	9:29	10:29	11:39	12:39	13:39	14:39	15:39	16:39	17:39	18:39	19:39	20:39	21:39
27 **Vojenská škola**	6:06	6:56	7:37	8:18	9:32	10:32	11:42	12:42	13:42	14:42	15:42	16:42	17:42	18:42	19:42	20:42	21:42
29 **U Hřbitova**	6:08	6:58	7:39	8:20	9:34	10:34	11:44	12:44	13:44	14:44	15:44	16:44	17:44	18:44	19:44	20:44	21:44
33 **Brněnská**	6:11	7:01	7:43	8:24	9:37	10:37	11:47	12:47	13:47	14:47	15:47	16:47	17:47	18:47	19:47	20:47	21:47
36 **Autobusové nádraží**	6:14	7:04	7:46	8:27	9:40	10:40	11:50	12:50	13:50	14:50	15:50	16:50	17:50	18:50	19:50	20:50	21:50
39 **Lanškrounská**	6:17	7:07	7:49	8:30	9:43	10:43	11:53	12:53	13:53	14:53	15:53	16:53	17:53	18:53	19:53	20:53	21:53
41 **Železniční stanice**	6:19	7:09	7:51	8:32	9:45	10:45	11:55	12:55	13:55	14:55	15:55	16:55	17:55	18:55	19:55	20:55	21:55

Odjezdy vlaků do České třebové

6:31	**7:31**	**8:08**	**8:41**	**9:58**			**13:08**	**14:08**	**15:08**	**16:08**	**17:08**	**18:08**	**19:08**		**21:08**		

3.1.4. Parametry referenčního vozidla

Pro potřeby Moravské Třebové bude dostačující menší autobus. Pro výpočet spotřeby a průběhu nabíjení a vybíjení volím 8 metrový elektrobus o hmotnosti 10 tun a baterii o kapacitě 100 kWh. Elektrobus by měl být lokálně bezemisní, což znamená použití elektrického vytápění a zároveň má respektovat moderní trendy, což je použití klimatizace v horkých dnech. Dobíjení baterie je plánováno během provozu každou hodinu, což znamená, že je více než vhodné použít zautomatizované připojování k napájecí síti. Shrnutí parametrů a požadavků na referenční elektrobus:

- délka 8 m
- váha 10 t
- kapacita baterie 100 kWh
- elektrické vytápění
- klimatizace
- automatizované připojování k elektrické síti.

Pro výpočet odhadované spotřeby (jak trakční, tak vedlejší) vycházím z typických hodnot ověřených mnohaletým provozem trolejbusů využívající rekuperaci. Hodnoty jsou přepočtené na metr délky a váhu. Lze tak jednoduše odhadovat a porovnávat spotřebu elektrobusů různých délek a hmotností. Zadané a vypočtené hodnoty pro referenční autobus, který používám k dalším výpočtům, jsou v následující tabulce ***Tab. 3.3*** (vstupní hodnoty značím v tabulkách žlutě).

Tab. 3.3 Parametry referenčního elektrobusu

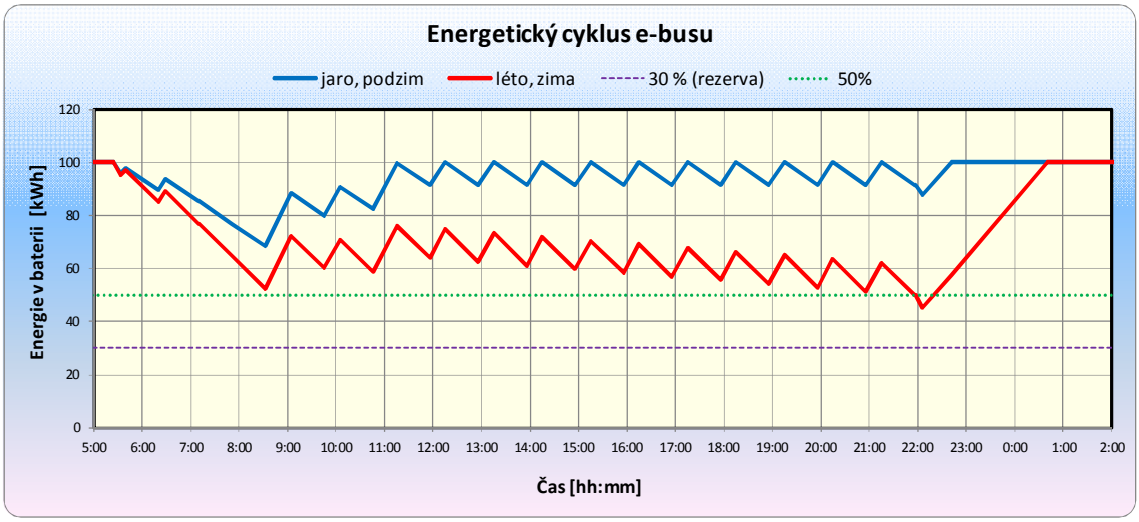
Obecné parametry		
vedlejší spotřeba jaro, podzim	kW/m	0,1
vedlejší spotřeba léto, zima	kW/m	0,8
trakční spotřeba (za baterií)	kWh/tkm	0,07

Referenční autobus		
délka	m	8,0
váha 50% obsazenost	t	11,0
energie akumulátoru	kWh	100
vedlejší spotřeba jaro, podzim	kW	0,80
vedlejší spotřeba léto, zima	kW	6,40
trakční spotřeba (za baterií) s rek.	kWh/km	**0,77**

3.1.5. Výpočet pracovního cyklu

Pro výpočet jsem uvažoval noční nabíjení elektrobusu v garáži vzdálené 5 km. Pokud by to ale bylo výhodné, může také zůstat přes noc u vlakového nádraží. Výhoda garážování je, že autobus nestojí celou noc v zimně na mrazu, má zde dobrou ochranu proti vandalům a také zde může být servisní zázemí (vhodné u více vozidel). Parkování přímo před nádražím má výhodu ve snížení nákladů na garáž. Temperování před odjezdem může být vyřešeno pomocí naprogramovaného automatického předtopení elektrobusu před první jízdou.

Elektrobus vyjíždí z garáže, případně od nádraží, plně nabitý. V prvních ranních jízdách nezbývá mnoho, respektive žádný čas pro nabíjení. Úroveň energie v baterii proto rychle klesá. Mezi 8 a 9 hodinou je první významnější pauza (skoro půl hodina) pro dobíjení. Dále je to už téměř pravidelné. 40 minut jízdy a 20 minut nabíjení. Ideální nabíjecí výkon je takový, který co nejméně poškozuje baterii a přitom je dostatečný pro doplnění energie za omezený čas. V zásadě se dá říct, že každé nabíjení snižuje životnost baterie, jen některé více, některé méně. Rychlé nabíjení například velikostí 2 C znamená, že 100 kWh baterie je nabíjená výkonem 200 kW, což ji teoreticky nabije z 0 na 100 % za 0,5 hodiny. Pro tak rychlé nabíjení se používají baterie s chemií, která relativně dobře snáší velké proudy. Všeobecně se dá za ideální nabíjecí výkon považovat výkon 0,5 C. V případě mnou navrhované baterie o velikosti 100 kWh je ideální nabíjecí výkon 50 kW. Když jsem sestrojil graf a zadal ideální nabíjecí výkon, tak jsem zjistil, že je v tomto modelovém případě zbytečně veliký, proto jsem ho snížil na výkon 40 kW, který je použit pro vykreslení následujícího grafu. Pro noční nabíjení (na konci grafu) je počítáno s výkonem 20 kW vhodným k vybalancování jednotlivých článků.



Obr. 3.3 Referenční elektrobus (100 kWh) – nabíjecí výkon 40 kW

Nabíjecí výkon je zvolen s ohledem k provozu v létě s klimatizací a zvláště v zimě, kdy elektrická spotřeba topení atakuje trakční spotřebu (viz červená křivka). V jarním a podzimním období je venkovní teplota přibližně stejná jako je zapotřebí k cestovní pohodě, proto zde uvažuji jen o minimální vedlejší spotřebě, například pro svícení. Úroveň nabití baterie se pohybuje téměř celý den mezi 90 a 100 %. V zimě ale může klesnout až k 40 %. Jako limitní stav jsem na grafu vyznačil 30 %, který by při návrhu systému neměl být překročen. Tato 30 % rezerva je potřeba z důvodu očekávaného poklesu kapacity baterie ke konci její životnosti a také jako rezerva pro

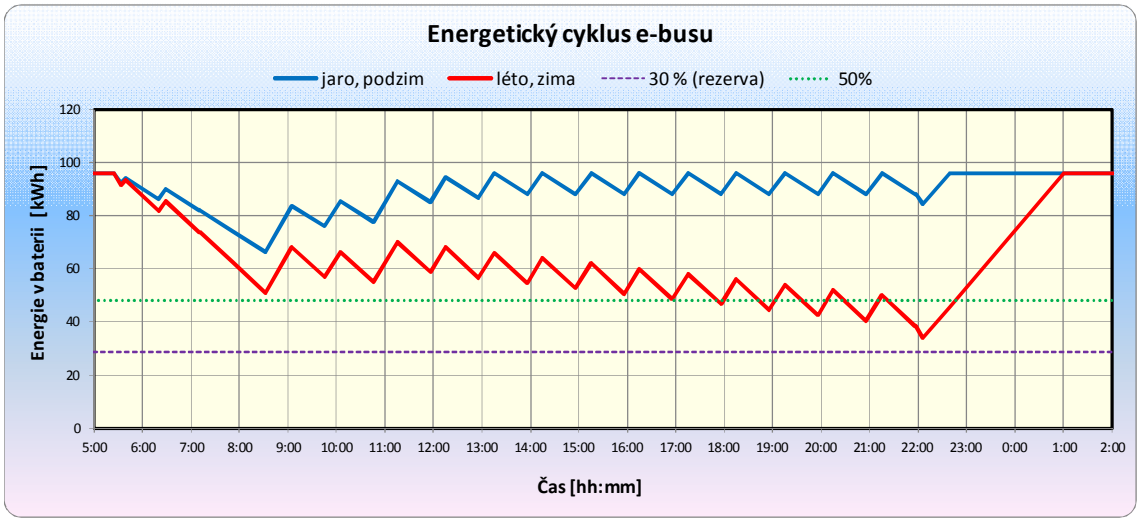
nenadálé události (objízdné trasy, uvíznutí v zácpě, …). Nižší nabíjecí výkon bude také výhodný z pohledu snížení poplatku za rezervovaný výkon distributorovi elektrické energie.

3.1.6. Návrh vozidla a napájení

Malé autobusy odpovídajících parametrů na našem trhu nabízí například firma SOR a jejich model EBN 8 nebo konsorcium firem Siemens a Rampini a jejich model jezdící na pravidelných linkách v centru Vídně. Oba používají k připojení k nabíjecí síti dvoupólový sběrač umístěný na střeše vozidla, který řidič ovládá z kabiny a nemusí proto kvůli každému nabíjení vystupovat z vozidla.

3.1.6.1. Siemens-Rampini

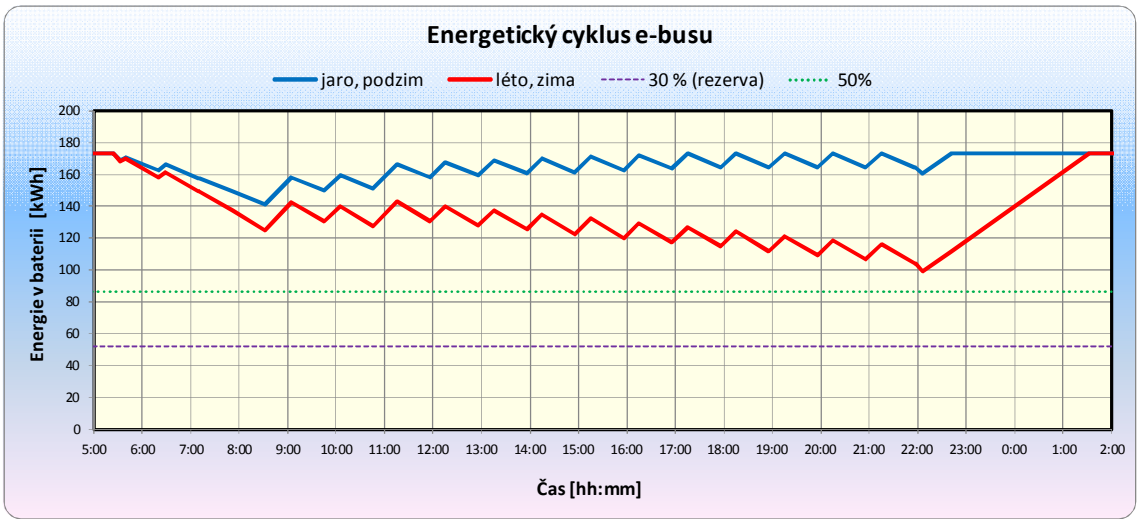
Elektrobus Siemens-Rampini má téměř shodné parametry jako referenční elektrobus použitý pro prvotní výpočty. Kapacita baterie je v tomto případě 96 kWh, délka 7,7 metrů a váha s 50% obsazeností (23 cestujících) 10,2 t. Graf vybíjení a nabíjení pak pochopitelně vypadal velice podobně jako na ***Obr. 3.3***. Při takto malých výkonech (40 kW) je možné použít nabíjení z nízkého napětí 3 x 400 V (71 A). Při kontrole velikosti jističe jsem zjistit, že při ještě nižším výkonu (35 kW) lze použít místo 80 A slabší jistič o hodnotě 63 A, a tím snížit měsíční poplatky. Jedná se ale pouze o úsporu cca 200 Kč/měsíc, což v celkových nákladech na provoz jen drobnost. Přesto jsem tento výkon při výpočtech použil, protože je dostatečný a je zde hezky vidět rozdíl mezi normálním provozem a energeticky náročným provozem v zimě. Úroveň nabití v zimě při příjezdu do garáže klesá až skoro k hranici 30 % (viz následující graf).



Obr. 3.4 Siemens-Rampini (96 kWh) – nabíjecí výkon 35 kW

3.1.6.2. Elektrobus SOR ENB

Elektrobus SOR ENB 8 má hodně podobné parametry (8 m, 10,9 t), ale v jednom se dost podstatně liší. Velikost baterie je zde na tak malý autobus opravdu obrovská. Kapacita baterie dosahuje hodnoty 173 kWh. Jaký mají tyto parametry vliv je vidět na následujícím grafu. Nabíjecí výkon jsem ponechal pro lepší srovnání také na 35 kw.



Obr. 3.5 SOR EBN 9 (173 kWh) – nabíjecí výkon 35 kW

Baterie je zde ale dosti nevyužita, protože ani v zimním období neklesne úroveň nabití pod 50 %, což je stále ještě více energie, než u plně nabité baterie ve vozidle Siemens-Rampini. Větší baterie je schopna nejen dodat větší výkon, ale také se větším výkonem nabíjet. Pokud budu uvažovat pouze šetrný nabíjecí výkon 0,5 C, tak tento elektrobus můžeme nabíjet výkonem až 87 kW. Další graf již zde uvádět nebudu, je ale celkem zřejmé, že by se pak hodnota nabití pohybovala stále kolem 90 %. Baterie je v elektromobilitě jedním z nejdražších součástek a i váha je nezanedbatelná. Vozit takto předimenzovanou baterii mně přijde zbytečné. Lepší variantou se mi proto jeví elektrobus Siemens-Rampini.

3.1.6.3. Elektrické rozhraní

Vzhledem k nízkému nabíjecímu výkonu je možné a ekonomicky výhodné použít běžnou síť nízkého napětí o hodnotě 3 x 400 V, protože zřídit přípojku vysokého napětí je mnohem komplikovanější. Protože se zde jedná pouze o jeden elektrobus, tak není smysluplné budovat drahou infrastrukturu, a proto se přikláním k nějakému stavebně a technicky jednoduchému řešení. Úplně nejjednodušší variantou by bylo postavení malé rychlonabíjecí stanice a připojovat e-bus pomocí kabelu s konektorem Combo 2, používané u osobních elektromobilů. Tyto rychlonabíječky umí dodávat výkon až 50 kW (v budoucnu i více), což je v tomto případě dostatečné. Protože se ale e-bus oproti osobnímu elektromobilu bude nabíjet 16x denně, není toto řešení příliš rozumné, i když je rozhodně použitelné. Navrhuji spíše připojení pomocí dvoupólového sběrače umístěného na střeše vozidla. Nad vozovku stačí umístit pár metrů trolejového vedení a vedle zastávky měnič z 3 x 400 V na stejnosměrných 600 V. Měnič zároveň zajišťuje galvanické oddělení z důvodu, aby elektrobus nemusel být vyroben v třídě ochrany II (trolejbusy tak vyrobeny být musí). I když jak jsem zjistil, tak elektrobus Siemens-Rampini jezdící ve Vídni přesto tuto zvýšenou třídu ochrany má, a to právě

proto, aby se mohl připojovat bez dalších opatření přímo k běžnému trolejbusovému vedení. Nabíjecí měnič (nabíječka) je umístěn na vozidle.

Obr. 3.6 E-bus Siemens-Rampini během testovacího provozu v Praze

Během noci je dostatek času pro nabíjení, není proto potřeba nabíjet baterii rychle. Dokonce je pomalé nabíjení vhodné pro vybalancování baterie. Během provozu dochází vlivem nestejného vnitřního odporu článků k postupnému rozdílu napětí na jednotlivých článcích, což by časem vedlo ke zničení článků s největším rozdílem. Systém BMS během nočního nabíjení tyto rozdíly vyrovnává. Jsou sice systémy, které toto umí i během provozu, ale pokud to není nezbytně nutné, je noční varianta vhodnější. Pro připojení elektrobusu k elektrické síti se používá připojovací skříňka (***Obr. 3.7***), která slouží pouze pro propojení e-busu se sítí. Nejedná se tedy o nabíječku. Skříňka se připojuje do sítě pomocí standardizovaného konektoru 3 x 400 V / 32 A (konektor zobrazený na obrázku) a slouží hlavně pro kontrolu bezpečného uzemnění e-busu před nabíjením a během něho. Může mít také další dodatečné funkce, jako je například měření prošlé energie, temperování e-busu či dálkový monitoring.

Obr. 3.7 Elektrická skříň pro noční nabíjení

4. Zhodnocení provozu e-busu v Moravské Třebové

Ve třetí kapitole jsem zkoumal provoz elektrického autobusu v Moravské Třebové jen z čistě technického hlediska. Kudy bude jezdit, jak dlouho bude jízda trvat a především jestli bude na takový provoz stačit kapacita baterie. Došel jsem k závěru, že technická vyspělost elektrobusů je již na dobré úrovni, a není proto žádný důvod k obavám z provozu e-busů v ostrém provozu. Technika ale není to jediné, co je potřeba před realizací takového projektu vzít v úvahu. Vliv na životní prostředí se stává stále významnějším kritériem při rozhodování, a v neposlední řadě je třeba posoudit také nákladnost celého projektu.

4.1. Ekologie provozu

O elektrické trakci se někdy mluví jako o bezemisní dopravě. Zastánci autobusů ale často argumentují tím, že elektrické vozidlo má výfuk v elektrárně. Naráží tak na fakt, že i při výrobě elektřiny se produkují zdraví škodlivé látky a skleníkové plyny. Správně bychom proto měli elektrická vozidla označovat jako místně bezemisní. Zde ale není jednoduché určit, kolik dané vozidlo produkuje CO_2, protože velmi záleží na způsobu výroby elektřiny. Pokud bude elektrické vozidlo nabíjeno z fotovoltaického panelu, tak jde opravdu o čistě bezemisní provoz. Na druhou stranu, pokud by elektřina byla vyráběna jen ve staré uhelné elektrárně, navíc vzdálené stovky kilometrů, výsledné celkové emise z provozu e-busu by byly skutečně větší než z provozu klasického autobusu. Ztráty přenosem elektřiny a celková účinnost uhelné elektrárny určují, kolik je potřeba spálit uhlí (vypustit emisí) na jednu kilowatthodinu uloženou do baterie vozidla. Kvalitní přenosová soustava a moderní elektrárny hrají proto významnou roli v celkovém hodnocení provozu elektrických vozidel z pohledu ekologie.

Při hodnocení emisí je potřeba problematiku rozdělit na dvě témata, která se ale často pletou dohromady:

1. emise zdravý škodlivých plynů a částic
2. emise CO_2.

4.1.1. Emise zdraví škodlivých plynů a částic

V důsledku nedokonalého spalování paliva v konvenčních motorech dochází k exhalaci zdravý škodlivých látek a velmi jemného prachu. Nové konstrukce motorů a filtry pevných částic tyto emise sice snižují, ale k úplnému odstranění dojít nelze. Elektromobilita tento problém řeší tím, že přesune exhalace z místa, kde nám vadí (obce a města), na místa, kde nám tolik nevadí (málo obydlená místa v okolí elektráren). Tyto exhalace jsou v elektrárnách pod přísnou kontrolou, a navíc se je zde daří stále účinněji eliminovat. Celkové množství škodlivých emisí a jemných částic vypuštěných do ovzduší v důsledku elektromobility z moderních elektráren bude jistě menší, než by byly celkové emise ze stejného množství spalovacích aut. Minimálně se tím řeší koncentrované znečištění v hustě zalidněných oblastech. Z tohoto pohledu má elektromobilita pro společnost jednoznačně pozitivní přínos.

4.1.2. Emise oxidu uhličitého (CO_2)

Druhou problematikou při spalování fosilních paliv je produkce oxidu uhličitého. Tento bezbarvý, nezapáchající plyn bez chuti, je zdraví naprosto neškodný. Vzniká reakcí (spalováním) uhlíku obsaženého ve fosilních palivech s kyslíkem nebo produkcí (dýcháním) většiny živých organismů. Používá se například jako ochranná atmosféra pro potravinářské účely, pro sycení nápojů, náplň hasicích přístrojů atd. V čem je tedy tak nebezpečný, že musíme jeho produkci omezit? CO_2 je skleníkový plyn a jeho nadměrná koncentrace může způsobit vážné změny klimatu po celém světě, a tím ve výsledku způsobit nedostatek potravin a neobyvatelnost nyní velmi zalidněných oblastí. To v konečném důsledku může vést až k válkám o potravu či území. Může elektromobilita zabránit tomuto možná až příliš černému scénáři, který se ale zakládá na reálných faktech a historických zkušenostech? Bohužel zde není odpověď ani jednoduchá, ani příliš pozitivní. Spalováním fosilních paliv se uhlík, ukládaný miliony až miliardy let do podzemí, dostává během velmi krátkého období do atmosféry. S tímto zákonem zachování energie (hmoty) nic nezmůže ani ta nejmodernější technologie v elektrárnách nebo jiná konstrukce motorů. Uhlík obsažený v palivu se sloučí s kyslíkem a ve formě CO_2 odejde do atmosféry. Je naprosto jedno, kde tento plyn vypustíme do ovzduší, jestli ve městě z výfuků automobilů nebo z komína vzdálené elektrárny. Výsledek je stejný. Podstatné je ovšem celkové množství spálených fosilních paliv pro zajištění dopravy. Zde již může být rozdíl. Co tedy vychází lépe?

Pokud bychom porovnávali množství vyprodukovaného CO_2 z klasického automobilu potažmo autobusu s množstvím vyprodukovaného CO_2 v uhelné elektrárně při výrobě elektřiny pro ekvivalentní elektromobil potažmo elektrobus, tak bohužel musím potvrdit názor kritiků elektromobility. V tomto ohledu je elektromobil (elektrobus) opravdu horší. Sice elektromotor využívá vstupní energii mnohem účinněji než motor spalovací, ale výroba elektřiny a následný její přenos již tak účinný není. V celkovém součtu se vyprodukuje oxidu uhličitého více. Mluvím zde ale pouze o případu výroby veškeré elektrické energie v uhelné elektrárně! V České republice bylo v roce 2015 vyrobeno 13,3 % elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (OZE) a dokonce 32 % v elektrárnách jaderných, které jsou z hlediska CO_2 také bezemisní. [42] To znamená, že v České republice je téměř polovina veškeré elektřiny vyrobena bez emisí CO_2. To už zní lépe. Jaký vliv má tento náš energetický mix na výsledné emise CO_2? Dochází v České republice při provozu elektrického vozidla ke snížení emisí tohoto plynu? Jak jsem zjistil z výpočtů, tak ke snížení skutečně dochází. Více v následující kapitole.

4.1.3. Emise CO_2 z provozu e-busu v Moravské Třebové

Pro konkrétní výpočet spotřeby elektřiny a potažmo CO_2 jsem si vybral 7,7m autobus od konsorcia Siemens-Rampini s trakční spotřebou 0,71 kWh/km. Podrobné provozní hodnoty, které jsem potřeboval pro další výpočty, uvádím v následující tabulce.

Tab. 4.1 Provozní hodnoty

Provozní hodnoty		
počet oběhů	-	17
denní ujetá vzdálenost	**km/den**	**183**
pracovní dny v roce	den/rok	252
ujetá vzdálenost za rok	km/rok	46 234
bus v provozu	hh:mm/den	16:40
suma denního nabíjení	hh:mm/den	4:03
průměrná denní rychlost	km/h	11,0
cestovní rychlost	km/h	15,0
spotřeba - oběh (pouze jízda)		
trakční spotřeba	kWh	7,3
vedlejší spotřeba jaro, podzim	kWh	0,5
vedlejší spotřeba léto, zima	kWh	4,2
spotřeba celkem J, P	kWh	7,8
spotřeba celkem L, Z	kWh	11,5
spotřeba - den		
trakční spotřeba	kWh	130,6
vedlejší spotřeba jaro, podzim	kWh	12,8
vedlejší spotřeba jaro, podzim	kWh/km	0,07
vedlejší spotřeba léto, zima	kWh	102,8
vedlejší spotřeba léto, zima	kWh/km	0,56
denní spotřeba celkem J, P	**kWh**	**143,5**
průměrná spotřeba celkem J, P	kWh/km	0,78
denní spotřeba celkem L, Z	**kWh**	**233,4**
průměrná spotřeba celkem L, Z	kWh/km	1,27

K trakční spotřebě se přidává vedlejší spotřeba, která během roku dosti kolísá z důvodu energeticky náročné klimatizace a především elektrického topení. Některé elektrobusy používají naftové topení z důvodu prodloužení dojezdu. Toto řešení jsem již v úvodu zavrhl, protože to je dle mého názoru pouze poloviční řešení. Pokud se bude investovat do čisté dopravy, tak ať je čistá, jak jen to je v danou chvíli technicky možné. V modelové studii pro Moravskou Třebovou je použití elektrického vytápění rozhodně možné. V jarním či podzimním období je teplota ve vozidle příznivá a není ji potřeba nijak upravovat. Hodnota této nízké vedlejší spotřeby je 0,07 kWh/km. Maximální vedlejší spotřeba bude v prosinci a v lednu, kdy je maximálně využíváno elektrické vytápění. Hodnota max. vedlejší spotřeby je 0,56 kWh/km. V horkých letních dnech se bude používat klimatizace o chladícím výkonu 15 kW, což znamená 3,8 kW výkonu kompresoru plus 1,1 kW pomocných pohonů (ventilátory) [43]. U elektrobusu je vše napájeno elektricky, ale v případě naftového autobusu je kompresor klimatizace poháněn mechanicky a elektřina pro ostatní vedlejší spotřebu (včetně pomocných pohonů klimatizace) je vyráběna v alternátoru. Alternátor ve vozidlech je poháněn motorem s velmi

proměnnými otáčkami a jeho konstrukce musí toto respektovat. Účinnost takového alternátoru pak ale není příliš velká (cca 75 %).

Vedlejší spotřeba během roku značně kolísá. Ve výpočtech počítám se základní vedlejší spotřebou (jarní a podzimní měsíce) a se zvýšenou spotřebou v zimě (vytápění – pouze elektrobus) a také v létě (klimatizace). Pro výpočet průměrné roční vedlejší spotřeby jsem sestrojil tabulku (***Tab. 4.2***) s odhadem zastoupení zvýšené spotřeby v jednotlivých měsících. Číslo "1" ve sloupci pro e-bus znamená 100 % vedlejší spotřeby s elektrickým topením (0,56 kWh/km), zatímco ve sloupci pro autobus znamená hodnota "1" sice také 100 % vysoké vedlejší spotřeby, ale zde se jedná o hodnotu s klimatizací (0,51 kWh/km). Hodnoty v letních měsících jsou pro bus a e-bus rozdílné, ale po vynásobení 100% hodnotou se tyto vedlejší spotřeby rovnají, abych mohl autobusy vzájemně porovnávat. V zimě je situace ale odlišná. Autobus využívá k vytápění interiéru ztrátové teplo z motoru, a proto v zimě počítám se základní spotřebou.

Tab. 4.2 Období zvýšené spotřeby

Období zvýšené spotřeby	e-bus	bus
100% vedl. spotř.[kWh/km]	0,56	0,51
leden	1	0
únor	0,8	0
březen	0,3	0
duben	0	0
květen	0	0
červen	0,2	0,2
červenec	0,7	0,8
srpen	0,7	0,8
září	0,2	0,2
říjen	0	0
listopad	0,5	0
prosinec	1	0
suma	**5,4**	**2,0**

Po stanovení trakční spotřeby, nízké a vysoké vedlejší spotřeby včetně jejich poměrů v roce, lze spočítat výslednou spotřebu a přepočítat jí na produkci CO_2. Pro určení přesné odebírané energie ze sítě je potřeba nejprve jednotlivé spotřeby přepočítat přes účinnosti baterie, nabíječky a dobíjecí budky (měnič 3 x 400 V / 600 V). Při výpočtu jsem si ale uvědomil, že ne veškerá energie projde přes baterii. Když elektrobus bude stát na konečné stanici a bude připojen k napájecí troleji, energie pro vedlejší spotřebu bude proudit přímo z nabíjecího měniče, a tudíž nebude ovlivněna účinností baterie. Chyba by při tomto zanedbání byla relativně velká, neboť e-bus je k troleji připojen 4 hodiny denně a ztráty v baterii jsou celých 10 %. Výpočty a vstupní data (žlutě označené buňky) jsou uvedeny v ***Tab. 4.3***. Po zohlednění energie tekoucí skrz baterii nebo přímo z nabíječky a po zohlednění provozu s klimatizací nebo

vytápěním či bez obojího jsem došel k výsledné průměrné celkové roční spotřebě odebírané ze sítě **1,23 kWh/km**.

Životnost elektrobusu uvažuji 10 let, během kterých ujede téměř půl milionu kilometrů. Uhlíkovou stopu proto počítám z provozu od roku 2017 do roku 2026 včetně. Uhlíková stopa elektrické energie odebírané ze zásuvky (rozvaděče) má být pro rok 2017 v České republice 0,59 kg(CO_2)/kWh. Postupným zaváděním dalších obnovitelných zdrojů má tato hodnota klesat až na přibližně 0,49 kg/kWh v roce 2026. Po zprůměrování a přepočtení na jeden kilometr vychází uhlíková stopa elektrobusu za 10 let provozu na **0,66 kg(CO_2)/km**.

Lokálně bezemisní elektrobus za 10 let provozu nepřímo vyprodukuje 306,5 t CO_2.

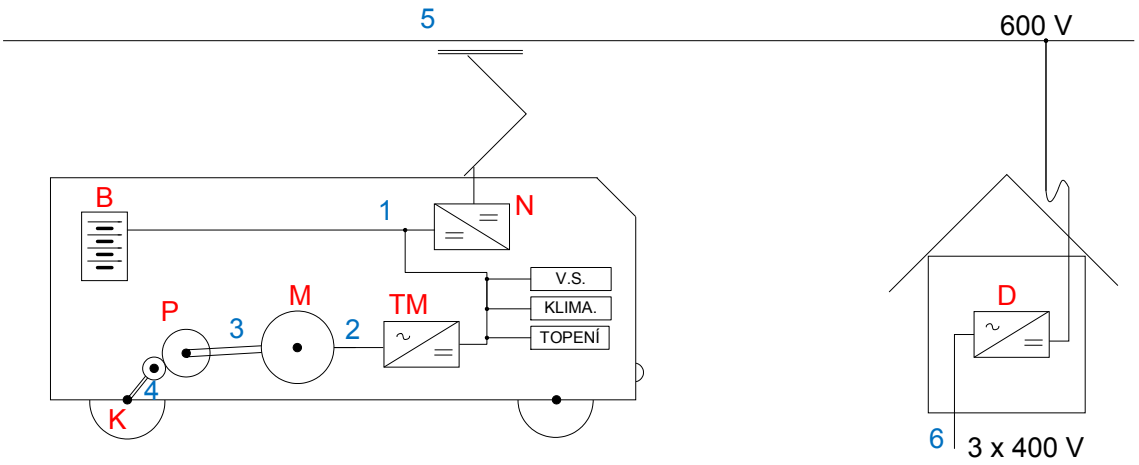
Tab. 4.3 Uhlíková stopa elektrobusu

E-BUS (CO_2)			
trakční spotřeba z baterie	kWh/km	0,71	**1**
bus v provozu	hh:mm/den	16:40	
suma denního nabíjení	hh:mm/den	4:03	
denní ujetá vzdálenost	km/den	183,5	
vedlejší spotřeba J, P	kWh/den	12,85	**1**
vedlejší spotřeba L, Z	kWh/den	102,76	**1**
vedlejší spotřeba z baterie J, P	kWh/den	9,72	**1**
vedlejší spotřeba z baterie L, Z	kWh/den	77,77	**1**
vedlejší spotřeba z nabíječky J, P	kWh/den	3,12	**1**
vedlejší spotřeba z nabíječky L, Z	kWh/den	24,99	**1**
účinnost baterie	%	90%	**B**
účinnost nabíječky	%	96%	**N**
účinnnost dobíjecí budky (dobudky)	%	94%	**D**
trakční spotřeba ze sítě	**kWh/km**	**0,88**	**6**
vedlejší spotřeba ze sítě J, P	kWh/km	0,08	**6**
vedlejší spotřeba ze sítě L, Z	kWh/km	0,67	**6**
období vysoké spotřeby (léto, zima)	měsíce	5,44	
roční průměrná vedlejší spotřeba ze sítě	kWh/km	0,35	**6**
roční průměrná spotřeba ze sítě	**kWh/km**	**1,23**	**6**
uhlíková stopa el. 2017	kg (CO_2)/kWh	0,59	
uhlíková stopa el. 2026	kg (CO_2)/kWh	0,49	
uhlíková stopa el. 2017	kg (CO_2)/km	0,72	
uhlíková stopa el. 2026	kg (CO_2)/km	0,60	
uhlíková stopa - průměr 2017-2026	**kg (CO_2)/km**	**0,66**	
množství CO_2 za 10 let provozu	**t**	**306,5**	

4.1.4. Parametry ekvivalentního naftového autobusu

Abych mohl vyjádřit ekologický přínos zavedením elektrického autobusu místo autobusu klasického, potřebuji spočítat, kolik tun CO_2 by za stejnou dobu a podmínek vyprodukoval ekvivalentní naftový autobus. Ekvivalentní autobus znamená, že má stejnou vedlejší spotřebu (osvětlení a klimatizaci) a v místě styku kolo-vozovka vykonává stejnou práci. Toto místo jsem na schematických obrázcích (***Obr. 4.1*** a ***Obr. 4.2***) označil číslem 4. Protože by porovnávaný naftový autobus jezdil naprosto ve stejných časech a podmínkách, tak ve výpočtech přepočítávám přímo spotřebu energie v kWh/km.

V prvním kroku se musí přepočíst trakční spotřeba elektrobusu, která je udávaná v bodě 1, přes účinnost trakčního měniče (TM), motoru (M) a jednostupňové převodovky (P) do bodu 4. Naftový autobus ale nemá možnost rekuperace, a proto potřebuji do výpočtů zadat trakční spotřebu v hodnotě, jaká by byla bez rekuperace. Rekuperace v podmínkách městského provozu se pohybuje kolem 40 %.



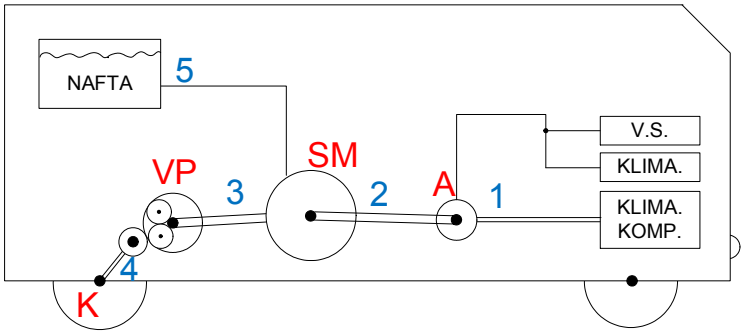
Obr. 4.1 E-BUS – schéma pohonu

Tab. 4.4 Přepočet spotřeby na místo styku s vozovkou

E-BUS			
vedlejší spotřeba J, P	kWh/km	0,07	**1**
trakční spotřeba za baterii	kWh/km	0,71	**1**
rekuperace	%	40%	
ekvivalent bez rekuperace	kWh/km	1,187	**1**
účinnost trakčního měniče	%	97%	**TM**
učinnost elektromotoru	%	93%	**M**
účinnost převodovky v e-busu	%	96%	**P**
ekvivalent na pneumatice	**kWh/km**	**1,03**	**4**

Ve druhém kroku u autobusu přepočítávám trakční spotřebu v opačném směru (od kola k motoru), přes účinnost vícestupňové převodovky (VP) a účinnost spalovacího motoru (SM) do bodu 5. Vedlejší spotřeba a spotřeba ventilátorů klimatizace jsou napájeny z alternátoru (A), který je spolu s kompresorem klimatizace poháněn spalovacím motorem. Protože se klimatizace používá pouze v letních měsících, potřeboval jsem tuto skutečnost zohlednit

a vyjádřit jako průměrnou roční spotřebu. Posloužila mi k tomu již výše zmiňovaná tabulka ***Tab. 4.2.*** Vytápění u naftového autobusu neuvažuji, protože to je realizováno z odpadního tepla motoru. Výslednou spotřebu na vstupu do motoru v kWh/km (bod 5) jsem přepočítal přes výhřevnost nafty (kWh/kg) a její měrnou hmotnost (kg/l) na výslednou spotřebu v l/km. Ekvivalentní autobus by dle mých výpočtů měl spotřebu **36,8 l/100 km.** Pro kontrolu jsem se podíval do statistické ročenky pražského dopravního podniku, kde je uvedena průměrná spotřeba všech autobusů 0,45 l/vozkm (vozový km) [12]. Vypočtená hodnota 36,8 l/100 km pro malý autobus je reálná.



Obr. 4.2 BUS – schéma pohonu

Tab. 4.5 Výpočet spotřeby ekvivalentního autobusu

BUS			
vedlejší spotřeba	kWh/km	0,07	**1**
ekvivalent na pneumatice	kWh/km	1,03	**4**
účinnost vícestupň. převodovky v autobusu	%	94%	**VP**
ekvivalent mezi mot. a přev.	kWh/km	1,09	**3**
chladící výkon klimatizace	kW	15,0	
poměr chladícího výkonu a v. kompresoru	-	4,0	
kompresor klimatizace	kW	3,8	**2**
kompresor klimatizace	kWh/km	0,34	**2**
pohony klimatizace (ventilátory)	kW	1,1	**1**
pohony klimatizace (ventilátory)	kWh/km	0,10	**1**
účinnost alternátoru	%	75%	**A**
vedlejší spotřeba	kWh/km	0,09	**2**
vedlejší spotřeba + klima. (pohony)	kWh/km	0,23	**2**
vedlejší spotřeba + klima. (pohony+kom.)	kWh/km	0,57	**2**
období s klimatizací	měsíce	2,0	
průměrná vedlejší spotřeba	kWh/km	0,17	**2**
učinnost spalovacího motoru	%	35%	**SM**
celková spotřeba	kWh/km	3,62	**5**
výhřevnost nafty	kWh/kg	11,86	
měrná hmotnost nafty	kg/l	0,83	
ekvivalent spotřeby nafty	**l/km**	**0,368**	**5**

4.1.5. Emise CO_2 z provozu naftového autobusu

Uhlíková stopa čisté nafty je 2,65 kg(CO_2)/litr. Nafta, kterou ale tankujeme u čerpacích stanic, obsahuje 6 % bio-nafty, která má neutrální cyklus CO_2. Oxid uhličitý se sice při spalování bio-nafty do ovzduší také uvolňuje, ale jeho množství se rovná množství spotřebovaného CO_2 rostlinami použitými k výrobě bio-nafty. Znamená to, že se v tomto případě CO_2 pouze přesouvá z ovzduší do rostlin a pak při spálení zpět do ovzduší. Bio-naftu proto nemohu započítávat do celkových emisí oxidu uhličitého. Podíl bio-nafty v palivu by se měl ještě dále zvyšovat. Do roku 2026 je odhadováno zvýšení až na hodnotu 8 %. Průměrná uhlíková stopa provozu naftového autobusu dle ***Tab. 4.6*** vychází 0,91 kg(CO_2)/km. Dle těchto výpočtů by naftový autobus ekvivalentní k uvažovanému elektrobusu za stejných podmínek vyprodukoval **418 t CO_2**.

Tab. 4.6 Výpočet CO_2 naftového autobusu

BUS (CO_2)		
uhlíková stopa nafty	kg (CO_2)/kg	3,19
měrná hmotnost nafty	kg/l	0,83
uhlíková stopa nafty	kg (CO_2)/litr	2,65
podíl bionafty 2017	%	6%
podíl bionafty 2026	%	8%
uhlíková stopa nafty 2017	kg (CO_2)/litr	2,49
uhlíková stopa nafty 2026	kg (CO_2)/litr	2,44
spotřeba nafty	l/km	0,37
uhlíková stopa nafty 2017	kg (CO_2)/km	0,91
uhlíková stopa nafty 2026	kg (CO_2)/km	0,90
uhlíková stopa průměr	**kg (CO_2)/km**	**0,91**
množství CO_2 za 10 let provozu	**t**	**418,4**

4.1.6. Ekologické srovnání provozu elektrobusu s autobusem

Při porovnání množství CO_2, které by nepřímo vyprodukoval elektrobus, s množstvím CO_2 vypuštěným naftovým autobusem jsem zjistil, že rozdíl není tak výrazný, jak jsem očekával. Elektrobus sice **ušetří 112 tun** skleníkového plynu, ale i tak nepřímo vyprodukuje 306,5 tun, což je **snížení emisí o 27 %**.

Tab. 4.7 Srovnání BUS – E-BUS

Srovnání E-BUS vs. BUS		
BUS - CO_2 za 10 let provozu	t	418,4
E-BUS - CO_2 za 10 let provozu	t	306,5
uhlíková stopa průměr	kg (CO_2)/km	-0,24
snížení CO_2	%	-27%
úspora CO_2 za 10 let provozu	**t**	**- 112,0**

Zkusil jsem také zjistit, jaký vliv mají různé vstupní parametry na výsledné snížení emisí. Když jsem uvažoval velmi horké léto, a tedy větší příkon klimatizace, tak byl výsledek prakticky stejný. Vliv zvýšeného vytápění byl už samozřejmě v neprospěch elektrobusu, protože naftový autobus topí odpadním teplem. Když jsem uvažoval tuhou zimu (o měsíc delší topné období), tak ušetřených emisí bylo o 3 % méně. Dobrá tepelná izolace elektrobusu, a tím menší topný výkon, má vliv nejen na dojezd, ale také i na ekologii.

Při výpočtech uvažuji rekuperaci 40 %. Pokud ale do výpočtů zadám 30 %, tak výsledné snížení emisí bude už jen o pouhých 16 %. Bez rekuperace vychází výsledné emise elektrobusu dokonce o 14 % vyšší. Z toho plyne zajímavá úvaha. Elektrobus, který často zastavuje, bude mít větší procento rekuperované energie, protože vracet do baterie lze pouze kinetickou energii, a tím bude více snižovat emise. Ekologický přínos elektrobusu bude mít proto vždy větší efekt v městské dopravě než v dálkové.

Nejzajímavější bylo ale sledovat, jaký vliv má způsob výroby elektrické energie na výsledné snížení emisí. Do tabulky jsem zadával různé hodnoty emisí CO_2 na vyrobenou kWh, při kterých jsem si ověřil hypotézu, že elektromobilita poháněná elektřinou z uhelné elektrárny je z pohledu emisí CO_2 opravdu horší než klasická vozidla se spalovacím motorem. Výsledky se tak významně lišily, že jsem se rozhodl sestavit přehlednou tabulku (***Tab. 4.8***) vlivu výroby elektřiny na emise z provozu elektrobusu v Moravské Třebové, potažmo platnou v přibližných hodnotách kdekoliv jinde v České republice.

Stará uhelná elektrárna vypouští při výrobě každé kWh až 1,4 kg oxidu uhličitého. Pokud bychom touto elektřinou napájeli elektrobus, bude jeho bilance emisí dokonce o 84 % vyšší! Bohužel je to případ například Polska, kde je 90 % elektřiny vyráběno v uhelných elektrárnách. Za těchto podmínek ztrácí elektrické autobusy smysl. V ČR máme naštěstí situaci mnohem příznivější. Uhelné elektrárny máme také, ale i ty se postupně modernizují, a tím se zvyšuje jejich účinnost. Dokonce se v Ledvické elektrárně postavil nový supermoderní blok, který již běží v testovacím provozu. Odhadované emise z tohoto bloku by měly klesnout až na 0,75 kg(CO_2)/kWh. Bohužel ale ani tato nejmodernější technologie neposune emise z provozu e-busu do zelených čísel. Díky obnovitelným zdrojům energie a především jaderným elektrárnám je ale celkový mix výroby elektřiny v ČR na hodnotě 0,59 kg(CO_2)/kWh, což ve výsledku znamená snížení emisí o 20 %.

Tab. 4.8 Vliv způsobu výroby el. na snížení CO_2

Snížení emisí oxidu uhličitého v závislosti na způsobu výroby el. energie		
	kg (CO2)/kWh	Δ BUS - E-BUS
starý blok v uhelné elektrárně Ledvice	1,36	84%
	1,00	36%
	0,90	22%
	0,80	8%
nový moderní blok v Ledvicích	0,75	2%
vyrovnaná bilance	0,74	0%
	0,70	-5%
	0,65	-12%
mix zdrojů v ČR 2016	**0,59**	**-20%**
průměr 2016 - 2026	0,54	-27%
mix zdrojů v ČR 2026	0,49	-34%
mix zdrojů v ČR 2030	0,45	-39%
	0,40	-46%
	0,30	-59%
	0,20	-73%
	0,10	-86%
jaderné elektrárny a OZE	0,00	-100%

4.2. Ekonomie provozu

Tato práce je zaměřená spíše na technickou proveditelnost provozu elektrobusu v MHD, ale provozovatele této dopravy také zajímá, o kolik je v celkovém součtu levnější nebo dražší provoz e-busu ve srovnání s klasickým autobusem. Nedávám si za cíl spočítat přesné náklady, což ani vzhledem k neznalosti vývoje cen v příštích letech není možné, ale hrubý odhad pro představu zde uvedu. Všechny níže uvedené ceny jsou bez DPH.

4.2.1. Cena za elektrickou energii

Měsíční náklady za energii lze spočítat relativně přesně. Ovšem náklady za celé období lze spočítat přesně jen za podmínky, že ceny za elektřinu a naftu budou v příštích deseti letech téměř neměnné. Odhadovat budoucí vývoj cen je velice obtížné, a proto a ve výpočtech použiji současnou cenu energií na trhu pro celé období.

Elektrobus bude nabíjen z distribuční sítě 3 x 400 V. Z aktuálního ceníku produktů skupiny ČEZ pro rok 2017 jsem vybral 3 nejvhodnější distribuční sazby (dále DS) a provedl jejich srovnání. Jednou z uvedených DS je nová sazba určená přímo pro elektromobilitu (C27d). Dle ceníku jsem zjistil, že ceny a podmínky jsou totožné jako u DS C25d (akumulace 8), to znamená účtování v nízkém a vysokém tarifu, přičemž nízký tarif je aktivní po dobu 8 hodin denně (cca v čase 1-6 h, 13-16 h). Druhé dvě DS (C02d a C03d) jsou jedno-tarifové a liší se pevnou měsíční sazbou a distribuční cenou za kWh.

Při výpočtech jsem také zohlednil časy nabíjení. Protože se elektrobus průběžně nabíjí během celého dne, tak odebíraná energie je u DS C27d ze 2/3 účtována dle vysokého tarifu.

Tab. 4.9 Srovnání tarifů od skupiny ČEZ

Cena za elektrickou energii		**C27d**	**C02d**	**C03d**
obchod s elektřinou	Kč/měs.	55 Kč	55 Kč	55 Kč
OTE	Kč/měs.	4,9 Kč	4,9 Kč	4,9 Kč
distribuční sazba	Kč/měs.	635 Kč	282 Kč	2 748 Kč
OZE	Kč/kWh	0,50 Kč	0,50 Kč	0,50 Kč
systémové služby	Kč/kWh	0,09 Kč	0,09 Kč	0,09 Kč
vysoký tarif	Kč/kWh	1,71 Kč	2,04 Kč	0,97 Kč
vysoký tarif - obchod s el.	Kč/kWh	1,65 Kč	1,46 Kč	1,46 Kč
celkem VT	Kč/kWh	3,36 Kč	3,50 Kč	2,43 Kč
nízký tarif	Kč/kWh	0,06 Kč	2,04 Kč	0,97 Kč
nízký tarif - obchod s el.	Kč/kWh	1,05 Kč	1,46 Kč	1,46 Kč
celkem NT	Kč/kWh	1,12 Kč	3,50 Kč	2,43 Kč
provoz při VT	h	12	12	12
provoz při NT	h	5	5	5
průměr za NT a VT	Kč/kWh	2,70 Kč	3,50 Kč	2,43 Kč
celkem pravidelné platby	**Kč/měs.**	**695 Kč**	**342 Kč**	**2 808 Kč**
celkem za energii	**Kč/kWh**	**3,29 Kč**	**4,09 Kč**	**3,02 Kč**

Ze srovnání vychází nejlépe distribuční sazba určená přímo pro elektromobilitu (C27d) s měsíční pevnou platbou 695 Kč a cenou za odebranou kWh 3,29 Kč. Do kalkulace bylo započítáno i noční dobíjení v garáži, ovšem bez dalšího navýšení ceny o měsíční platbu. Počítám totiž pouze s výdaji, které jsou u elektrického a naftového autobusu rozdílné. Elektrická přípojka je u garáže samozřejmostí i v případě využívání pro garážování a servisování naftového autobusu. Měsíční náklady na spotřebovanou elektrickou energii jsou **16 234 Kč**.

Tab. 4.10 Cena za spotřebovanou elektrickou energii

E-BUS cena za energii		**C27d**	**C02d**	**C03d**
spotřeba el. ze stítě	kWh/km	1,23	1,23	1,23
denní nájezd	km	183	183	183
dny provozu za rok	dní	252	252	252
roční nájezd	km	46 234	46 234	46 234
měsíční nájezd	km	3 853	3 853	3 853
měsíční spotřeba	kWh	4 729	4 729	4 729
cena za kWh el. energie	Kč/kWh	3,29 Kč	4,09 Kč	3,02 Kč
cena za odebranou energii	Kč/měs.	15 539 Kč	19 350 Kč	14 291 Kč
pravidelné platby	Kč/měs.	695 Kč	342 Kč	2 808 Kč
celkem	**Kč/měs.**	**16 234 Kč**	**19 692 Kč**	**17 099 Kč**

4.2.2. Cena za naftu

Oproti elektrické energii je zde výpočet mnohem jednodušší. Aktuální cena nafty se na benzínových pumpách pohybuje okolo částky 24,5 Kč/l. Při uvažovaném nájezdu 3 843 km za měsíc vychází měsíční náklady za spotřebovanou naftu **34 659 Kč**.

Tab. 4.11 Cena za spotřebovanou naftu

BUS cena za energii		
spotřeba nafty	l/km	0,37
měsíční nájezd	km	3 853
měsíční spotřeba	l	1 416
cena za litr nafty	Kč/l	24,5 Kč
celkem	**Kč/měs.**	**34 695 Kč**

4.2.3. Srovnání nákladů na pořízení a provoz

Náklady za provoz z pohledu spotřeby energií jsou dle očekávání výrazně nižší v případě e-busu. Měsíční úspora je 18,5 tisíc Kč, což je za uvažované období (10 let) **2,2 mil Kč**.

Tab. 4.12 Rozdíl cen energií za celé provozní období

Cena za energii Δ BUS-E-BUS		
E-BUS - elektřina	Kč/měs.	16 234 Kč
E-BUS - elektřina	Kč/10 let	1 948 099 Kč
BUS - nafta	Kč/měs.	34 695 Kč
BUS - nafta	Kč/10 let	4 163 352 Kč
úspora E-BUS	Kč/měs.	-18 460 Kč
úspora E-BUS	**Kč/10 let**	**-2 215 253 Kč**

Do provozních nákladů započítávám nejen pravidelný servis, ale také obnovu baterie. Životnost baterie se udává v počtech nabíjecích a vybíjecích cyklů, přičemž tato životnost bývá kratší než životnost e-busu. V průběhu životního cyklu elektrobusu se baterie proto musí měnit, a to někdy i několikrát. Baterie se často dodávají jako již hotové sady akumulátorových článků umístěných ve vhodně tvarovaném nosiči včetně zařízení BMS. Po dosažení životnosti baterie není nutné vyměňovat celý set, ale stačí vyměnit pouze samotné články. Cena této obnovy je asi o 40 % nižší než cena nové baterie.

Abych zjistil, kolikrát se v mé modelové situaci musí baterie vyměňovat (obnovovat), musel jsem nejprve spočítat celkovou odebranou energii z baterie za uvažovanou dobu provozu. Množství celkové spotřebované energie ze sítě je jiné, než je skutečné množství energie odebrané z baterie. V době nabíjení je veškerá spotřeba odebíraná přímo ze sítě a nesnižuje životnost baterie. Na druhou stranu trakční spotřeba je vždy odebírána z baterie a navíc se musí ve výpočtech navýšit o rekuperovanou energii (40 %), která se téměř celá (cca 36 %) ukládá do baterie. Zbylou energii z této rekuperované energie odebere přímo vedlejší spotřeba.

Životnost baterie (počet nabíjecích cyklů) je ovlivněna také hloubkou vybíjení. Hlubší vybíjení znamená kratší životnost. V navrhovaném provozním režimu se baterie často vybíjí pouze do 80 % a jen výjimečně úroveň nabití klesne pod 50 %. Z tohoto důvodu jsem původní počet cyklů (3000) navýšil na hodnotu 3300, se kterou dále počítám ve výpočtech.

Tab. 4.13 Výpočet odebrané energie z baterie

Spotřeba z baterie		
průměrná trakční spotřeba z baterie	kWh/km	0,71
rekuperace	%	40%
skutečná rekuperace do baterie	%	36%
skutečná trakční spotřeba z baterie	kWh/km	1,14
roční nájezd	km/rok	46 234
roční trakční spotřeba	**kWh/rok**	**52 662**
vedlejší spotřeba z baterie J, P	kWh/den	9,72
vedlejší spotřeba z baterie L, Z	kWh/den	77,77
období vysoké spotřeby (léto, zima)	měsíce	5,44
průměrná vedlejší spotřeba z baterie	kWh/den	40,56
dny provozu za rok	dní	252
roční vedlejší spotřeba z baterie	**kWh/rok**	**10 220**
celková roční spotřeba z baterie	kWh/rok	62 883
celková spotřeba z baterie za 10 let	**kWh/10 let**	**628 828**
kapacita baterie	kWh	96
počet cyklů	-	3300
teoretická energie z bat. za životnost	**kWh**	**316 800**
počet baterií (teoreticky)	kus/10 let	1,98
počet obnovy baterie	**kus/10 let**	**1**

Náklady na servis jsou u elektrobusu nižší z důvodu menšího počtu pohyblivých součástek. Elektromotor je oproti spalovacímu mnohem konstrukčně jednodušší a levnější. Chybí zde také mnoho jiných zařízení jako například spojka, alternátor, vícestupňová převodovka a v případě elektromotoru v náboji kola odpadá také diferenciál. Na druhou stranu přibývá baterie, nabíjecí měnič, trakční měnič a pantograf. Cena za údržbu se dle firmy SOR u autobusu pohybuje mezi 4,8-4,9 Kč/km a u elektrobusu 4,0-4,1 Kč/km [31]. Ve výpočtech jsem počítal s rozdílem 0,8 Kč/km v neprospěch autobusu.

Po zahrnutí ceny za obnovu baterie do provozních nákladů jsou tyto náklady u elektrobusu za uvažované období o **300 tis. Kč** vyšší.

Tab. 4.14 Rozdíl nákladů za servis a obnovu baterie

Cena za provoz Δ BUS-E-BUS		
vícenáklady BUSu (servis)	Kč/km	0,8 Kč
roční nájezd	km	46 234
vícenáklady BUSu (servis)	Kč/rok	36 987 Kč
vícenáklady E-BUSu (nová baterie)	Kč/kWh	7 000 Kč
kapacita baterie	kWh	96
vícenáklady E-BUSu (obnova baterie)	Kč	672 000 Kč
provozní vícenáklady E-BUSu celkem	**Kč/10 let**	**302 129 Kč**

V neposlední řadě do celkové bilance nákladů musíme zahrnout i vyšší pořizovací cenu elektrobusu. Sice výrobní cenu snižuje absence spalovacího motoru, spojky a dalšího zařízení spojeného s provozem spalovacího motoru, ale přibývá baterie, BMS, měniče a pantograf. Výsledná cena elektrobusu se z těchto důvodů pohybuje kolem **5 mil. Kč** nad cenou naftového autobusu.

Po sečtení všech nákladů na energii, servis a pořízení vychází celkové náklady za provoz elektrobusu v desetiletém období o **3 mil. Kč** více, než by byly náklady v případě provozování naftového autobusu.

Tab. 4.15 Výsledná bilance celkových nákladů

Rozdíl cen E-BUSu oproti BUSu		
náklady za energii	Kč	-2 215 253 Kč
provozní náklady	Kč	302 129 Kč
pořizovací cena (hrubý odhad)	Kč	5 000 000 Kč
SUMA celkových nákladů	**Kč**	**3 086 875 Kč**

Závěr

V této práci se zaměřuji nejen na technickou stránku použití elektrobusu, ale také na jeho přínos pro společnost. Při studiu problematiky globálního oteplování jsem si naplno uvědomil vážnost situace a zároveň pochopil, že bychom se zaváděním elektrických autobusů neměli dlouho otálet.

Z predikce následků oteplování planety je zřejmé, že situace je více než vážná. Oteplování je způsobeno převážně nadměrným spalováním fosilních paliv. Doprava je zodpovědná za více než 20 % emisí skleníkových plynů ze spalovacích procesů a výroba elektřiny je zodpovědná dokonce za 40 % těchto emisí. Postupné zavádění elektrických vozidel do všech oblastí dopravy ruku v ruce s výrobou elektřiny z obnovitelných zdrojů je v průběhu následujících let nezbyté.

Náhrada osobního automobilu elektromobilem nemá takový výsledný efekt jako nahrazení autobusu, který je celý den v provozu a přepraví mnohonásobně více cestujících. Kapacita baterií není zatím dostatečná, aby mohlo dojít k nahrazení dálkového autobusu, proto jsem se zaměřil pouze na provoz e-busu v městské hromadné dopravě. Pro studii proveditelnosti a výsledného ekonomicko-ekologického srovnání jsem si vybral město Moravská Třebová, kde jsem postupně navrhl trasu, zastávky, jízdní řád a zvolil elektrobus s vhodnými parametry.

Ekologický přínos provozu elektrobusu je třeba rozdělit na dvě oblasti. První je snížení emisí zdraví škodlivých látek a druhá je snížení emisí oxidu uhličitého. V případě emisí zdraví škodlivých látek je třeba ještě rozlišovat lokální emise a emise celkové. Navrhovaný provoz v České Třebové je lokálně plně bezemisní, protože elektrobus používá elektrické vytápění. Emise vyprodukované v elektrárně při výrobě elektřiny jsem sice podrobněji nepočítal, ale z logické úvahy vychází jednoznačný závěr. Pokud soustředíme emise do jednoho místa, můžeme je zde mnohem účinněji eliminovat, a tím celkové emise snižovat.

V druhé oblasti přesun emisí oxidu uhličitého ze silnic do elektráren problém nijak neřeší. Spalováním fosilních paliv dochází k přesunu uhlíku z podzemí do atmosféry ve formě CO_2. Tento proces se nedá jinak eliminovat. Při výpočtech jsem zjistil, že pokud by byla elektřina vyráběna pouze ve starých uhelných elektrárnách, tak použití elektrobusu by produkci CO_2 dokonce zvýšilo až o 80 %. I při použití nejmodernější technologie výroby elektřiny z uhlí by byl provoz elektrobusu z hlediska CO_2 stále horší než provoz naftového autobusu (cca o 2 %). Nicméně v podmínkách České republiky opravdu dochází k redukci CO_2 provozem elektrických vozidel. Na výrobě elektrické energie se totiž podílejí i obnovitelné zdroje a jaderné elektrárny, které žádné skleníkové plyny neprodukují. Vzhledem k tomuto energetickému mixu provoz elektrobusu v Moravské Třebové ušetří za deset let provozu 112 t CO_2, což je snížení o 27 % oproti provozu autobusu se spalovacím motorem.

Ekonomické srovnání, které jsem v závěru práce provedl, slouží především pro hrubou představu, v jakých částkách se pohybují náklady na provoz e-busu. Údržba a provoz je levnější než v případě naftového autobusu, ale pořizovací cena a potřebná výměna baterie v průběhu uvažovaného desetiletého období výslednou cenu navýší. Po celkovém součtu všech položek jsem došel k následujícímu závěru. Pořízení a následný provoz e-busu v Moravské Třebové by

byl o 3 miliony dražší ve srovnání s klasickým autobusem. Za deset let provozu to ale není tak velká částka. Věřím, že tento projekt má šanci získat státní dotace. Není totiž o mnoho dražší a přitom má jednoznačně ekologický přínos. Zdraví neškodná a udržitelná doprava se do výsledného hodnocení také započítává.

Zjištěné poznatky ze studie provozu elektrobusu v Moravské Třebové se dají aplikovat všeobecně na jakoukoliv elektromobilitu. Elektromobilita jednoznačně zlepšuje ovzduší, a tím zdraví obyvatel, a z pohledu globálního oteplování má za předpokladu čisté výroby elektřiny také velmi pozitivní přínos pro společnost. Z ekonomického hlediska je provoz zatím sice nákladnější, ale díky rychle se snižující ceně za baterie se tyto rozdíly budou postupně snižovat.

Použitá literatura

[1] POHL, Jiří. Trendy v železniční nákladní dopravě. Systém Logistiky. [online]. 5.10.2016 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: http://www.systemylogistiky.cz/2016/10/05/trendy-v-zeleznicni-nakladni-doprave.

[2] POHL, Jiří: Použití zásobníků energie v městské hromadné dopravě. Prezentace k přednášce. Most 26.4.2012.

[3] POHL, Jiří: Průběžně dobíjené elektrobusy. Prezentace k přednášce. Brno 8.10.2013.

[4] Evropská komise: Bílá kniha. Plán jednotného evropského dopravního prostoru –vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje. KOM(2011)144 v konečném znění („Bílá kniha o dopravě“).

[5] Národní akční plán čisté mobility (NAP CM), Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/cista_mobilita_seminar.

[6] https://www.strukturalni-fondy.cz.

[7] redakce Proelektrotechniky.cz. ZeEUS: evropský projekt pro rozvoj elektrických autobusů zahájen. Proelektrotechniky.cz. [online]. 27.1.2014 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: http://www.proelektrotechniky.cz/zajimave-projekty/24.php.

[8] David Binar. JAK KLIMATOLOGOVÉ PŘICHÁZEJÍ O ILUZE. NEOVLIVNI.CZ. [online]. 8.7.2016 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: http://neovlivni.cz/jak-klimatologove-prichazeji-o-iluze/.

[9] Mgr. Jan Mertl. Je skleníkový efekt atmosféry hrozbou? . CENIA. [online]. [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: http://web.archive.org/web/20070111105223/http://www.cenia.cz/www/webapp.nsf/webfiles/files-TT-sklen.%20efekt.pdf/$FILE/sklen.%20efekt.pdf.

[10] Globální oteplování. Wikipedie. [online]. 27.9.2016 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Glob%C3%A1ln%C3%AD_oteplov%C3%A1n%C3%AD.

[11] Pařížská dohoda. Wikipedie. [online]. 14.10.2016 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pa%C5%99%C3%AD%C5%BEsk%C3%A1_dohoda#cite_note-historic-4.

[12] Statistická ročenka. Praha: Dopravní podnik hl. města Prahy, akciová společnost, 2015.

[13] RICHTER, Michal. Návrh systému pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru. Praha 2015. Diplomová práce. ČVUT – FEL.

[14] MAREK, Jiří a Luděk Stehlík. Abeceda baterií a akumulátorů. BattEx. [online]. 15.10.2016 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: http://www.battex.info/.

[15] SYCHRA, Šimon. Elektrobus v městské hromadné dopravě. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT – FEL.

[16] BARCHÁNEK, Jan. SOR/Cegelec EBN 11 elektrobus s nabíjením z tramvajové sítě: Elektrické autobusy pro město [online]. 2015, , 17 [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: http://docplayer.cz/9671571-Sor-cegelec-ebn-11-elektrobus-s-nabijenim-z-tramvajove-site-jan-barchanek-elektricke-autobusy-pro-mesto-czechbus-2015-praha-26-11.html.

[17] Roman Gazdík. První bezplatné linky s elektrobusy v Praze. SKUPINA ČEZ. [online]. 3.2.2016 [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/5381.html.

[18] Zkušební provoz elektrobusu SOR vstupuje do druhého roku. Dopravní podnik hlavního města Prahy. [online]. [cit. 2016-10-22]. Dostupné z: http://www.dpp.cz/elektrobus-sor-zamiril-do-bezneho-provozu-s-cestujicimi/.

[19] http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2016/1/18/dokonal-nmeck-elektrobus-trolejbus. ČESKOSLOVENKÝ DOPRAVÁK. [online]. 16.1.2016 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2016/1/18/dokonal-nmeck-elektrobus-trolejbus.

[20] PRVNÍ PARCIÁLNÍ TROLEJBUSY V ČESKÉ REPUBLICE ODEBERE ZLÍN. ČESKOSLOVENKÝ DOPRAVÁK. [online]. 13.1.2016 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2016/1/12/prvn-parciln-trolejbusy-v-esk-republice-odebere-zln.
[21] DITRICH, Jakub. Izrael ukazuje budoucnost (lehké) elektromobility. HYBRID.CZ. [online]. 25. 6. 2016 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: http://www.hybrid.cz/izrael-ukazuje-budoucnost-lehke-elektromobility.
[22] HORČÍK, Jan. CHAdeMO uznán jako evropský dobíjecí standard. HYBRID.CZ. [online]. 02.02.2015 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: http://www.hybrid.cz/chademo-uznan-jako-evropsky-dobijeci-standard.
[23] BARTLOMIEJCZYK, Mikolaj. Aplikace In Motion Charging v praxi – obsluha autobusových linek trolejbusy v Gdyni. Na konferenci *Elektrické autobusy pro město V* doprovodný program veletrhu CZECHBUS 2016. 24.11.2016.
[24] Promoter of electric cars sees global change. YnetNews.com. [online]. 29.01.2011 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: http://www.ynetnews.com/articles/0,7340,L-4020489,00.html.
[25] Superkapacitory [online]. [15.10. 2014]. Available at: <http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf.
[26] CETL, Tomáš.: Aplikace elektrochemických zdrojů. Vydavatelství ČVUT, 2004.
[27] KADLUČKA, Roman. Zelená a čistá Ostrava 2025. Top-expo. [online]. 09.2013 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z: http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/smart-city/ostrava/predenasky/kadlucka.pdf.
[28] A SUSTAINABLE SOLUTION FOR PUBLIC TRANSPORTATION. [online]. [Accessed 26 April 2014]. Available at: <http://www.sinautecus.com/files/transportation.pdf>.
[29] Large-capacity, flash-charging, battery-powered pilot bus takes to the street. [online]. [Accessed 26 April 2014]. Available at: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/eae3e161cc498140c1257b7b00552bcd.aspx>.
[30] E-mobilita v MHD, Studie, Ing. Jakub Slavík, MBA, Březen 2015.
[31] KAPLAN, Petr. Problematika začlenění elektrobusů do MHD,2013. Diplomová práce. VŠB-FS.
[32] ŠPAČEK, Kryštof. Model pohonu elektromobilu,2016. Diplomová práce. ČVUT-FEL.
[33] RICHTER, Michal. Návrh systému pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru, 2015. Diplomová práce. ČVUT-FEL.
[34] http://www.trihybus.cz/.
[35] Vizualizace provozních dat – návod na správnou interpretaci. TriHyBus. [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.trihybus.cz/index.php/cz/autobus/23-vizualizace-provoznich-dat-navod-na-spravnou-interpretaci.
[36] http://www.moravskatrebova.cz
[37] http://www.siemens.com/electriccar
[38] http://www.hybrid.cz
[39] http://www.elektromobily.org
[40] http://www.proelektrotechniky.cz
[41] Odborný odhad nebo informace od konzultanta.
[42] Roční zpráva o provozu ES ČR / 2015. Energetický regulační úřad, oddělení statistiky a sledování kvality, 2016.
[43] Klimatizace KONVEKTA. *GOSS.* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: *http://www.goss.cz/goss/xmidibus01.htm.*

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Koncentrace atmosférického CO_2 za posledních 650 tisíc let. [10] 16
Obr. 1.2 Volba dopravního systému dle přepravního proudu 19
Obr. 1.3 Energetický mix skupiny ČEZ, převzato z [31] 20
Obr. 2.1 Závislost složek jízdního odporu na rychlosti 23
Obr. 2.2 Měrná spotřeba e-busu na kilometr 26
Obr. 2.3 Nabíjecí charakteristika Li-Ion baterie [26] 30
Obr. 2.4 vnitřní uspořádání superkapacitoru [25] 32
Obr. 2.5 Noční nabíjení [15] 34
Obr. 2.6 ETA 515 [1] 35
Obr. 2.7 SOR EBN 9,5 [17] 36
Obr. 2.8 Noční a polední nabíjení [15] 36
Obr. 2.9 SOR EBN 10,5 [27] 37
Obr. 2.10 Nabíjení na konečných [15] 37
Obr. 2.11 SOR EBN 11 na zastávce želivského [18] 38
Obr. 2.12 Nabíjení na zastávkách [15] 39
Obr. 2.13 Nabíjecí systém TOSA od ABB [29] 40
Obr. 2.14 Trolejbus pro Eberswalde v ostravské trolejbusové vozovně [19] 41
Obr. 2.15 Parciální trolejbus Škoda 26 Tr-Solaris [20] 42
Obr. 2.16 Zásuvkový rozvaděč 44
Obr. 2.17 Konektor Typ 2 od firmy Mennekes 44
Obr. 2.18 Jedno fázová zásuvka pro proudy až 32 A 44
Obr. 2.19 konektory CHAdeMO (vlevo) a CCS-Combo 2 (vpravo) 45
Obr. 2.20 Elektrobus Volvo a inverzní pantograf ABB 47
Obr. 2.21 Vizualizace toků energie v prostoru pro cestující [35] 48
Obr. 2.22 Trakční charakteristika elektrobusu 50
Obr. 2.23 Vliv doby nabíjení 52
Obr. 2.24 Nevybalancované 53
Obr. 3.1 Mapa Moravské Třebové 56
Obr. 3.2 Navrhovaná trasa elektrobusu v Moravské Třebové 57
Obr. 3.3 Referenční elektrobus (100 kWh) – nabíjecí výkon 40 kW 61
Obr. 3.4 Siemens-Rampini (96 kWh) – nabíjecí výkon 35 kW 62
Obr. 3.5 SOR EBN 9 (173 kWh) – nabíjecí výkon 35 kW 63
Obr. 3.6 E-bus Siemens-Rampini během testovacího provozu v Praze 64
Obr. 3.7 Elektrická skříň pro noční nabíjení 64
Obr. 4.1 E-BUS – schéma pohonu 70
Obr. 4.2 BUS – schéma pohonu 71

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Výsledná cena energie čerpané ze zásobníku při nákupní ceně 2 Kč/kWh.....27
Tab. 2.2 Srovnání parametrů akumulátoru a kondenzátoru [25].....31
Tab. 2.3 technické parametry superkapacitoru MAXWELL [25].....32
Tab. 2.4 Používané kabelové připojení.....44
Tab. 3.1 Seznam zastávek.....58
Tab. 3.2 Jízdní řád.....59
Tab. 3.3 Parametry referenčního elektrobusu.....60
Tab. 4.1 Provozní hodnoty.....67
Tab. 4.2 Období zvýšené spotřeby.....68
Tab. 4.3 Uhlíková stopa elektrobusu.....69
Tab. 4.4 Přepočet spotřeby na místo styku s vozovkou.....70
Tab. 4.5 Výpočet spotřeby ekvivalentního autobusu.....71
Tab. 4.6 Výpočet CO_2 naftového autobusu.....72
Tab. 4.7 Srovnání BUS – E-BUS.....72
Tab. 4.8 Vliv způsobu výroby el. na snížení CO_2.....74
Tab. 4.9 Srovnání tarifů od skupiny ČEZ.....75
Tab. 4.10 Cena za spotřebovanou elektrickou energii.....76
Tab. 4.11 Cena za spotřebovanou naftu.....76
Tab. 4.12 Rozdíl cen energií za celé provozní období.....77
Tab. 4.13 Výpočet odebrané energie z baterie.....78
Tab. 4.14 Rozdíl nákladů za servis a obnovu baterie.....78
Tab. 4.15 Výsledná bilance celkových nákladů.....79

Seznam použitých zkratek

MHD	Městská hromadná doprava
BMS	Battery management system
IROP	Integrovaný regionální operační program
DS	Distribuční sazba
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility

SŽDC JÍZDNÍ ŘÁD 2015 – 2016 platí od 13. prosince 2015

017 Česká Třebová - Dzbel

⇔ IDS IREDO Česká Třebová - Šubířov

km	SŽDC, státní organizace / ČD, a.s.	Vlak	24771	24741	24743		24745	24773		24747		24749		24751		24753
				👁1	👁1		👁4 ♿ 🚲	👁				👁		♿ 🚲		☾
0	**Česká Třebová** 010.260 ⇔930	32		⚒ 4 54	27 5 54		6 54			21 8 33		10 30		12 30		18 13 30
6	**Třebovice v Čechách** ⇔935	○		5 00	6 00		7 00			8 39		10 36		12 36		13 36
	Třebovice v Čechách ⇔935	32		5 01	6 01		7 01			8 40		10 37		12 37		13 37
12	Anenská Studánka ⇔937			× 5 08	× 6 08		× 7 08			× 8 47		×10 44		×12 44		×13 44
14	Trpík ⇔937			× 5 11	× 6 11		× 7 11			× 8 50		×10 47		×12 47		×13 47
17	Mladějov na Moravě ⇔892			5 15	6 15		7 15			8 56		10 51		12 51		13 51
22	Kunčina ⇔882			× 5 23	27 × 6 23		× 7 23			× 9 03		×10 59		×12 59		×13 59
25	Moravská Třebová ⇔880		⚒ 4 32	5 32	⚒ 6 32		◇ 7 32			21 9 10		11 05		13 05		18 14 05
31	Linhartice ⇔880		× 4 39	× 5 39	× 6 39		× 7 39									
35	Rozstání ⇔876		× 4 46	× 5 46	× 6 46		× 7 46									
37	Městečko Trnávka ⇔870		4 50	5 50	6 50		7 50									
39	Mezihoří ⇔870		× 4 54	× 5 54	× 6 54		× 7 54									
42	Chornice ⇔865		5 10	6 00	7 00		7 59	25 8 43								
46	Nedteva ⇔867		× 5 15	× 6 05	× 7 05			× 8 48								
51	Šubířov ⇔797		× 5 21	× 6 11	× 7 11			× 8 54								
54	**Dzbel** 271	○	⚒ 5 27	⚒ 6 17	⚒ 7 17			25 9 00								
	Do stanice															

km	SŽDC, státní organizace / ČD, a.s.	Vlak	24755	24775		24757	24759	24777		24761	24763		24765	24767		24769
			♿ 🚲 ⊙	👁		⊙	♿ 🚲 ⊙	👁		⊙	♿ 🚲		👁5 ♿ 🚲	👁		👁
				10			10	10			10					
0	**Česká Třebová** 010.260 ⇔930	32	14 30			⚒ 15 30	16 30			18 17 30	18 30		28 20 30	33 21 30		31 22 30
6	**Třebovice v Čechách** ⇔935	○	14 36			15 36	16 36			17 36	18 36		20 36	21 36		22 36
	Třebovice v Čechách ⇔935	32	14 37			15 37	16 37			17 37	18 37		20 37	21 37		22 37
12	Anenská Studánka ⇔937		×14 44			×15 44	×16 44			×17 44	×18 44		×20 44	×21 44		×22 44
14	Trpík ⇔937		×14 47			×15 47	×16 47			×17 47	×18 47		×20 47	×21 47		×22 47
17	Mladějov na Moravě ⇔892		14 51			15 51	16 51			17 51	18 51		20 51	21 51		22 51
22	Kunčina ⇔882		×14 59			×15 59	×16 59			×17 59	×18 59		×20 59	×21 59		×22 59
25	Moravská Třebová ⇔880		15 05	15 10		⚒ 16 05	17 05	17 10		18 18 05	19 05		28 21 05	33 22 05		31 23 05
31	Linhartice ⇔880			×15 17				×17 17								
35	Rozstání ⇔876			×15 24				×17 24								
37	Městečko Trnávka ⇔870			15 28				17 28								
39	Mezihoří ⇔870			×15 32				×17 32								
42	Chornice ⇔865			15 39				17 39								
46	Nedteva ⇔867			×15 44				×17 44								
51	Šubířov ⇔797			×15 50				×17 50								
54	**Dzbel** 271	○		15 56				17 56								
	Do stanice															

10 nejede 24., 31.XI.
18 jede v ⚒ nejede 23. – 31.XII., 1.VII. – 31.VIII.
21 jede v ⑥ a 24.XII., 5.VII., 28.IX., 28.X., 17.XI., nejede 26.XII. – 2.I., 29.X.
25 jede v ⑥ a †
27 jede v ⚒, ⑥ a 24.XII., 5.VII., 28.IX., 28.X., 17.XI., nejede 26.XII., 2.I., 29.X.
28 jede v ⚒ a †, nejede 24. – 26., 31.XII., 1.I., 27.III., 5.V.I., 28.X.
31 jede v ⚒, nejede 31.XII., 27.IX., 16.XI.
33 jede v ⑥, † a 27.IX., 16.XI., nejede 24., 25.XII., 1.I., 26.III., 28.X.
32 viz tratě 019,270
👁1 Moravská Třebová – Dzbel
👁1 Česká Třebová – Moravská Třebová v ⑥ a 24., 25., 31.XII., 1.I., 27.III., 5.VII., 28.X.; Moravská Třebová – Chornice denně
👁5 v †
◇ v ⑥ a 24.XII., 5.VII., 28.IX., 28.X., 17.XI., kromě 26.XII. – 2.I., 29.X. nutno přestoupit

Vydala Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Komerční použití dat jízdního řádu pouze se svolením vydavatele.

JÍZDNÍ ŘÁD 2015 – 2016

platí od 13. prosince 2015

017 Dzbel - Česká Třebová

⇔ IDS IREDO Šubířov - Česká Třebová

017

46

km	SŽDC, stanční organizace / ČD, a.s.	Vlak	24740	24742	24744	24746	24748	24750		24752		24754	24756	24758	12726	24758
	Ze stanice														Lanškroun	
0	**Dzbel** 271				5 34	6 34	7 34			25 9 08						
3	Šubířov ⇔797				x 5 39	x 6 39	x 7 39			x 9 13						
8	Naclava ⇔867				x 5 46	x 6 46	x 7 46			25 x 9 20						
12	Chomice ⇔865			5 01	6 01	7 01	8 01			9 27						
15	Mezihoří ⇔870			x 5 06	x 6 06	x 7 06	x 8 06			x 9 32						
17	Městečko Trnávka ⇔870			5 11	6 11	7 11	8 11			9 37						
19	Rozstání ⇔876			x 5 13	x 6 13	x 7 13	x 8 13			x 9 39						
23	Linhartice ⇔880			x 5 20	x 6 20	x 7 20	x 8 20			x 9 46						
28	Moravská Třebová ⇔880		4 19	5 31	6 31	7 31	8 4*	21 9 13		9 58		13 00 18	14 06	15 00		
32	Kunčina ⇔862		x 4 25	x 5 37	x 6 37	x 7 37	x 8 47	x 9 18		x10 04		x13 14	x14 14	x15 14		
37	Mladějov na Moravě ⇔862		4 33	5 45	6 45	7 45	8 56	9 27		10 12		13 22	14 22	15 22		
40	Trpík ⇔937		x 4 37	x 5 49	x 6 49	x 7 49	x 9 00	x 9 31		x10 16		x13 26	x14 26	x15 26		
42	Anenská Studánka ⇔937		x 4 39	x 5 52	x 6 52	x 7 52	x 9 03	x 9 33		x10 18		x13 28	x14 28	x15 28		
48	**Třebovice v Čechách** ⇔935	82 o	4 47	6 00	7 00	8 00	9 1*	9 41		10 26		13 30	14 36	15 30	28 15 38	
	Třebovice v Čechách ⇔935		4 48	6 01	7 00	8 00	9 13	9 42		10 27		13 37	14 37	↳	⟩ 15 39 →	⊥
54	**Česká Třebová** 010,260 ⇔930 ⇔4	82 o	4 54	6 07	7 07	8 07	9 20	9 48		10 33		13 43	14 43		28 15 44	15 47
km	SŽDC, stanční organizace / ČD, a.s.	Vlak	24760		24770	24762	12730	24762		24764		24772	24760	12704	24766	24768
	Ze stanice						Lanškroun						Lanškroun			
0	**Dzbel** 271				16 08							18 08				
3	Šubířov ⇔797				x16 13							x18 13				
8	Naclava ⇔867				x16 20							x18 20				
12	Chomice ⇔865				16 27							18 27				
15	Mezihoří ⇔870				x16 32							x18 32				
17	Městečko Trnávka ⇔870				16 37							18 37				
19	Rozstání ⇔876				x16 39							x18 39				
23	Linhartice ⇔880				x16 46							x18 46				
28	Moravská Třebová ⇔880		16 08		16 53	17 08			18	18 08		18 53		19 08		28 21 08
32	Kunčina ⇔862		x16 14			x17 14				x18 14				x19 14		x21 14
37	Mladějov na Moravě ⇔862		16 22			17 22				18 22				19 22		21 22
40	Trpík ⇔937		x16 26			x17 26				x18 26				x19 26		x21 26
42	Anenská Studánka ⇔937		x16 28			x17 28				x18 28				x19 28		x21 28
48	**Třebovice v Čechách** ⇔935	82 o	16 30			17 30		17 38		18 30				19 30	28	21 30
	Třebovice v Čechách ⇔935		16 37			↳		17 39 →	⊥	18 37				↳	19 39 →	⊥ 21 37
64	**Česká Třebová** 010,260 ⇔930 ⇔4	82 o	16 43					17 44	18	18 43					28 19 44	19 47 28 21 43

10 nejede 24., 31.XII.
18 nejede 25., 26.XII., 1.I.
28 jede v ⚒ nejede 23. – 31.XII., 1.VII. – 31.VIII.
21 jede v Ⓑ a 24.XII., 5.VII., 28.IX., 28.X., 17.XI.
28 jede v ⚒ nejede 26.XII. – 2.I., 29.X.
28 jede v ⚒ nejede 31.XII.
28 jede v Ⓑ a †
28 jede v ⚒ a †, nejede 24. – 28., 31.XII., 1.I., 27.III., 5.VII., 28.X.
32 jede v ⚒ a Ⓑ a 24.XII., 5.VII., 28.X. nejede 26.XII., 2.I., 29.X.
32 v zvlášť 019,270
02 Chomice – Moravská Třebová
01 Dzbel – Moravská Třebová

Vydala Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Komerční použití dat jízdního řádu pouze se svolením vydavatele.