

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Rozvoj elektromobility v rámci hromadné dopravy  
města Plzně**

**Ondřej Pechman**

**Plzeň 2016**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2015/2016**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej PECHMAN**  
Osobní číslo: **E14N0135P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Rozvoj elektromobility v rámci hromadné dopravy města Plzně**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

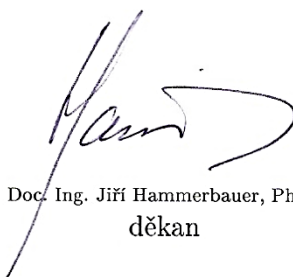
1. Analyzujte současný stav na poli elektromobility v PMDP, a.s.
2. Vypracujte přehled současných technických řešení používaných u nekolejových vozidel.
3. Navrhněte z dopravního hlediska rozšíření stávajících linek elektrické trakce.
4. Zhodnoťte technické specifikace daného řešení.
5. Vypracujte ekonomické zhodnocení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. DANZER, J.: Elektrická trakce I. Plzeň: Tiskové středisko ZČU, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
2. LOSOS, L.: Městská doprava v Plzni: Pevná trakční zařízení. Praha: Nakladatelství dopravy a turistiky, 2004, ISBN 80-7270-021-9.
3. Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Řeřicha, Ph.D.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na rozvoj elektromobility v plzeňské hromadné dopravě. Práce je rozdělena do tří kapitol.

V první kapitole jsou popsány zdroje energie použitelné pro pohon dopravních prostředků a koncepce uspořádání pohonných řetězců. Rozsáhlý blok je věnován způsobům nabíjení elektrických vozidel. Druhá část mapuje současný stav veřejné dopravy města Plzně a zaměřuje se především na elektrickou trakci. Poslední část obsahuje návrh na rozvoj elektromobility. Znalosti získané v první kapitole jsou aplikovány v teoretickém a ekonomickém popisu. Je provedena finanční analýza navržených rozšíření.

## **Klíčová slova**

alternativní paliva, bateriobus, bezdrátové nabíjení, bioplyn, CNG, elektrická trakce, elektrobuses, elektromobilita, hybrid, LPG, parciální trolejbus, průběžné nabíjení, rychlonabíjení, tramvaj, trolejbus, veřejná doprava, vodík

## **Abstract**

The present diploma thesis is focused on the development of electric mobility in Pilsen public transport. The work is divided into three parts.

In the first part of this thesis, there is the description of energy sources usable for the propulsion of vehicles and layouts of powertrain chains. Large section is devoted to ways of charging electric vehicles. The second part describes the current state of public transport in the city of Pilsen and focuses primarily on electric traction. The last section contains a proposal for the development of electric mobility. Knowledge gained in the first part are applied in theoretical and economic description. The financial analysis of the proposed expansion is calculated.

## **Key words**

alternative fuels, bateriobus, wireless charging, biogas, CNG, electric traction, electric bus, electric mobility, hybrid, LPG, partial trolleybus, continuous charging, fast charging, tram, trolleybus, public transport, hydrogen

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 15.5.2016

Ondřej Pechman

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Řeřichovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Poděkování patří společnosti *Plzeňské městské dopravní podniky, a.s.*, především však zaměstnanci Ing. Jiřímu Kohoutovi, Ph.D. za poskytnutí důležitých informací z provozu, naměřených hodnot a dalších cenných rad a faktů.

Také bych rád poděkoval svým blízkým, kteří mě ve studiu podporovali a pomáhali.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ALTERNATIVNÍ DRUHY POHONU</b> .....	<b>11</b>
1.1 BIOPLYN .....	11
1.2 LPG .....	11
1.3 CNG (LNG) .....	12
1.4 VODÍK .....	14
1.4.1 Vodík ve spalovacím motoru .....	15
1.4.2 Vodík a palivový článěk .....	17
1.5 ELEKTRINA .....	18
1.5.1 Akumulátor .....	20
1.5.2 Superkapacitory .....	23
1.6 DOBÍJECÍ INFRASTRUKTURA .....	25
1.6.1 Způsoby nabíjení .....	28
1.6.2 Palivový článěk .....	40
1.6.3 Diesel zdroj .....	41
1.7 HYBRIDY .....	41
1.7.1 Sériový hybrid .....	41
1.7.2 Paralelní hybrid .....	43
1.7.3 Palivové články .....	44
<b>2 SOUČASNÁ VEŘEJNÁ DOPRAVA MĚSTA PLZNĚ</b> .....	<b>46</b>
2.1 TRAMVAJE .....	46
2.1.1 Energetická posilovací stanice - EPOS .....	46
2.2 AUTOBUSY .....	47
2.2.1 Škoda HI2 .....	47
2.2.2 Škoda Perun 26BB HP .....	49
2.3 TROLEJBUSY .....	52
<b>3 ROZVOJ ELEKTROMOBILITY</b> .....	<b>54</b>
3.1 CENA ENERGIE .....	55
3.2 TRAMVAJE .....	56
3.3 TROLEJBUSY .....	62
3.3.1 Trolejbusová linka Plzeň – Štěnovice .....	63
3.4 ELEKTROBUSY, BATERIOBUSY .....	68
3.4.1 Elektrobussová linka Bory - Litice .....	70
3.4.2 Výhled do budoucnosti .....	74
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>77</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>79</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>85</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

PHM	Pohonné hmoty
IMC	angl.: In motion charging, průběžné nabíjení
LPG	angl.: Liquefied petroleum gas, zkapalněný ropný plyn
CNG	angl.: Compressed natural gas, stlačený zemní plyn
LNG	angl.: Liquefied natural gas, zkapalněný zemní plyn
IAD	Individuální automobilová doprava
Bar	jednotka tlaku, 1 bar = 100 kPa
kW	jednotka výkonu
p.o.	příspěvková organizace
a.s.	akciová společnost
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
EURO	měna Eurozóny
$W_{kin}$	kinetická, pohybová energie
$W_{rek}$	rekuperační energie (množství energie převedené na elektrickou)
PMDP	Plzeňské městské dopravní podniky

## Úvod

Doprava je nezbytnou součástí běžného života každého z nás. Bez jakékoliv pomoci je člověk schopen se chůzí přemísťovat rychlostí zhruba 5 km/h. Pro moderní svět je tato rychlost nedostačující a tak je třeba využívat jiných způsobů dopravy. Mohou to být ty, které jsou poháněny lidskou silou, ale využívají ji efektivněji, např. jízdní kolo. Pro překonání větších vzdáleností za kratší čas se více hodí dopravní prostředky vybavené motorem. Ten slouží k přeměně zdroje energie z jedné formy do pohybové a tím umožňuje vyšší jízdní rychlost a dosah.

Tyto požadavky jsou splněny jen díky využívání velkého množství energie. Ta je částečně čerpána z obnovitelných zdrojů, ale v mnohem větší míře z těch neobnovitelných, především z ropy. Spalovací motor je nejvyužívanějším pohonem, nedosahuje ale tak vysoké účinnosti přeměny forem energie jako elektromotor. Elektromobil je v individuální automobilové dopravě stále spíše okrajovou záležitostí. V hromadné dopravě naopak hraje elektřina velkou roli, tak jako v té plzeňské. Páteří sítě je v ní tvořena třemi tramvajovými linkami, které jsou vhodně doplněny trolejbusovou sítí. Celkem vozy elektrické trakce ročně najedou téměř 10 mil. km. Pro doplňovou dopravu mimo elektrickou infrastrukturu jsou využívány autobusy. Jejich vozový park je průběžně modernizován a obsahuje hybridní vozidlo i 2 bateriobusy.

Autobusy jsou stále oblíbená vozidla vzhledem k provozním nákladům. Z hlediska ekologie a komfortu cestování mají svá omezení. Svět zná v současnosti k ropě několik alternativ. Jejich výčet se nachází v první kapitole práce a obsahuje i současné aplikace použití s výhodami a nevýhodami. Přejít vozového parku k čistě elektrickému je reálný, muselo by ale nastat mnoho změn v infrastruktuře, vozovém parku, dopravním grafikonu i řízení vozidel.

Diplomovou práci s tímto zaměřením jsem si zvolil proto, aby navazovala na předešlou bakalářskou práci na téma: *Energeticko - ekonomická bilance trolejbusové dopravy* a rozvíjela ji moderními směry za použití současných technologií.

# 1 Alternativní druhy pohonu

V dřívějších dobách se používal svítiplyn, zemní plyn, důlní plyn, dřevoplyn a acetylén jako pohonná látka do spalovacích motorů. Do dnešní doby se z výše zmíněných hořlavých plynů úspěšně využívá pouze zemního plynu, dále propanbutanu a bioplynu. Velké naděje jsou s výhledem do budoucnosti vkládány do vodíku. Rozvoj techniky přináší do běžných dní i pojem „elektromobilita.“ [1], [2], [3]

## 1.1 Bioplyn

Plyn metan je získáván z biomasy zplynováním nebo metanolovým kvašením a nazývá se bioplyn. Bezprostředně po výrobě se skládá z 55 – 75 % metanu, 25 – 40 % oxidu uhličitého a dalších plynů v objemu 1 – 3 %. Chceme-li bioplyn použít jako palivo pro spalovací motor, je nutné zvýšit podíl metanu nad 95 %.

Spalováním bioplynu dochází k uzavření řetězce CO<sub>2</sub>. Výfukovou soustavou automobilů uvolněný oxid uhličitý je při fotosyntéze opět vázán a následně použit pro výrobu nového bioplynu.

V porovnání se spalováním benzínu vykazuje bioplyn nižší vyprodukované emise skleníkových plynů a schopnost koloběhu. Nevýhodou je jeho omezené množství, jenž se nejlépe vyrábí při teplotě 40 °C. Této teploty se dosahuje částečným spalováním již vyrobeného plynu. Čím nižší okolní teplota, tím je spotřeba plynu vyšší. Dále je nedostatkem jeho lokální výroba s nutností transportu do místa spotřeby a nákladné odstraňování nežádoucích příměsí.

K početnému nasazení vozidel spalujících bioplyn došlo v Švédsku, Dánsku, Rakousku, Švýcarsku, Francii, Itálii, Brazílii, USA a Novém Zélandu, přičemž o autobusovém nasazení jsou zmínky z Švédska a Francie. [1], [2], [3], [4]

## 1.2 LPG

Kapalná směs propanu a butanu vzniká při těžbě ropy a zemního plynu a celý její název je Liquefied Petroleum Gas – LPG. Propan i butan jsou obsaženy v přibližně stejném poměru. V běžných podmínkách se vyskytuje ve formě plynu. Pro velký objem je to neefektivní, a proto se skladuje v kapalně formě, přičemž zaujímá méně než 0,4 % svého původního objemu. Pro převod z plynného do kapalného stavu je nutné plyn stlačit nebo ochladit.

Běžné auto je pro spalování LPG nutné dovybavit tlakovou nádrží, plynovým ventilem, rozvodným potrubím, regulátorem tlaku, směšovačem vzduchu s plynem a plynovou řídicí jednotkou.

Investice potřebná na přestavbu vozu se vzhledem k nižší ceně paliva (zhruba poloviční), i přes zvýšenou spotřebu přibližně o 15 %, vrátí a provoz automobilu na LPG se stává výhodnějším. Další výhodou je nemožnost zcizení kapalného plynu. LPG má vyšší oktanové číslo v porovnání s benzínem, tj. 101 – 111, a to se projevuje nižší hlučností a vyrovnanějším během motoru, jež je odolnější vůči „klepání“ (samozapálení směsi paliva se vzduchem).

Správně seřízený motor spalující LPG vykazuje 10x méně škodlivých výfukových emisí v porovnání s dieslovým motorem. Plyné palivo se dokáže lépe rozprostřít ve válcích a utvořit tak homogeničtější směs.

Propan butan vlastně není zcela nové palivo, ale jen produkt vznikající při těžbě a zpracování ropy. Proto na něj nelze pohlížet jako na „zelené“ palivo budoucnosti s ideálně neomezenou zásobou. [1], [5], [6], [7]

### 1.3 CNG (LNG)

Zemní plyn je používán stlačený, neboli Compressed Natural Gas - CNG. Obsahuje přes 90% metanu a oproti ostatním fosilním palivům dochází k nejmenšímu vypouštění CO<sub>2</sub> v přepočtu na jednotku uvolněné energie. Oprávněně tedy může být CNG nazýváno ekologickým palivem, i když ne obnovitelným. Spalování zemního plynu produkuje méně oxidů dusíku, oxidu uhelnatého, uhlíčitého, pevných částic i dalších karcinogenních látek. Kouřivost vznětových motorů je spalováním zemního plynu téměř odstraněna. Výfukové zplodiny při spalování zemního plynu neobsahují žádný oxid siřičitý. Při reakci se vzdušným kyslíkem a za přispění vody podporuje kyselý dešť. Lepší spalování plynu snižuje hlučnost motoru oproti vznětovému. Z hlediska ekologie bývá velmi významnou výhodou, když při nehodě a následném kontrolovaném úniku plynu nedojde ke kontaminaci půdy a spodních vod. Plyn je lehčí než atmosférický vzduch. Jeho hustota je 0,83 kg·m<sup>-3</sup>. Při úniku se nehromadí při zemi, rozptýluje se po okolí a tím se snižuje jeho koncentrace. Teplota zápalu je téměř dvojnásobná oproti benzínu. Z těchto důvodů je v některých garážích povoleno parkovat i vozidla spalující CNG, zatímco u LPG je to striktně zakázáno.

Plyn přepravovaný v plynovodech je používán pro výrobu tepelné a elektrické energie. Dojde-li k jeho 200x násobnému stlačení, zvýší se koncentrace energie a plyn může být přečerpán do tlakových nádrží, kde je tlak více než 200 bar a využit jako palivo do spalovacího motoru. Pohon na CNG je aktivně využíván u dodávek, nákladních vozidel i autobusů, na rozdíl od LPG, který je pro svou závislost na ropě využíván převážně jen pro osobní automobily.

Problémem pro běžné motoristy může být nedostatečná síť čerpacích stanic. Dle internetového zdroje [8] se v České republice ke konci února 2016 nacházelo 112 veřejných čerpacích a plnicích stanic CNG. Naproti tomu čerpacích stanic s benzinem a naftou bylo v červnu 2014 veřejně přístupných celkem 3 649 [9]. V této diplomové práci jsou právě udaná čísla spíše jen pro informaci. Nedostatek plnicích stanic negativně ovlivňuje především trh s osobními auty poháněnými zemním plynem. Předpokládám, že v případě nasazení CNG jako paliva pro hromadnou dopravu by došlo k vybudování vlastní plničky na území dopravního depa, stejně jako je v dnešní době vybaveno čerpací stanicí na naftu. Zavedení tohoto alternativního paliva by si však na počátku vyžádalo výraznou finanční investici.

Na druhou stranu cena  $1\text{m}^3$  CNG, jako ekvivalentu k litru benzínu, je nižší a to 18,13 Kč [10]. Průměrná cena nafty, která vzhledem k současné situaci ve světě klesla za poslední rok o přibližně 5 Kč, je 25,73 Kč [11]. Nižší cena je dána především výrazně menším zatížením spotřební daní u zemního plynu použitého pro pohon motorů. Do konce roku 2017 platí sazba 0,72 Kč/m<sup>3</sup>. Tato částka je v porovnání se spotřební daní motorové nafty více než 15x menší. Při provozu spalovacího motoru nedochází k zanášení jeho částí karbonovými úsadami a životnost motoru i oleje je vyšší. [1], [3], [12], [13], [14], [15]

Pokud zemní plyn zkapalníme procesem prováděným při  $-161\text{ }^\circ\text{C}$ , vytvoříme tzv. Liquefied Natural Gas (LNG). Obsah energie je v porovnání s CNG zhruba dvojnásobný na stejnou jednotku objemu. Toho je využíváno především v nákladní automobilové dopravě, kde je dlouhý akční rádius na jedno tankování velkou výhodou. Dále je významným plusem až trojnásobně rychlejší tankování kapalného zemního plynu oproti CNG.

Z nedostatků LNG lze zmínit nevhodné využití pro individuální automobilovou dopravu, kde lze předpokládat i několikadenní odstávku vozu a i při použití tepelně izolované nádrže dochází k odpařování zkapalněného zemního plynu. [16], [17], [18], [19]

Oblibu stlačeného zemního plynu reflektuje údaj z roku 2015, kdy na našich silnicích jezdilo 13 000 takovýchto vozidel. Ve třídě osobních aut bylo z celkového počtu 1,19 % poháněno CNG a v rámci autobusů dokonce 26 %. [20]

## 1.4 Vodík

Jedná se o nejjednodušší plynný chemický prvek, který se samostatně vyskytuje velmi sporadicky. Je vázán v organických sloučeninách a tudíž i v ropě. Dále jako sloučenina s kyslíkem tvoří vodu  $H_2O$ , jež pokrývá více než 70 % povrchu Země. Zásoby vodíku by tedy měly být ohromné a lehce přístupné. Bohužel, získávání chemicky čistého vodíku nese jistá úskalí.

V současné době jsou hlavním vstupním materiálem pro výrobu vodíku fosilní paliva – zemní plyn, ropa a uhlí. Proces ohřívání paliv za přítomnosti vody na vysokou teplotu je nazýván *parní reformace*. Nevýhodou je neustálá závislost na fosilních palivech i uvolňování  $CO_2$  z běžící reakce. Východiskem pro udržení rovnováhy oxidu uhličitého v koloběhu přírody by bylo využívání bioplynu. Při jeho spalování by došlo k vypuštění jen dříve pochyceného  $CO_2$ .

Přibližně 4 % světové výroby vodíku jsou prováděna procesem zvaným *elektrolýza*. Elektrickým štěpením elektrolytu skládajícího se z vody a kyseliny sírové dochází ke vzniku kladných iontů vodíku, které následně přijmou od záporné elektrody elektron a vzniká molekula vodíku  $H_2$ . U kladné elektrody jsou uvolňovány molekuly kyslíku  $O_2$ . V poměru k přijaté elektrické energii se elektrolýzou vyrobí až 70 % vodíku. Zde vzniká stejný problém jako v prvním případě získávání vodíku z fosilních paliv. Chceme-li považovat vodík za ekologický, je nezbytné, aby elektřina pocházela z obnovitelných zdrojů. V tomto případě by se perfektně zvládnutým skladováním vyrobeného vodíku vyřešilo skladování přebytků elektrické energie v době, kdy je výroba solární, větrné a vodní energie větší než aktuální spotřeba.

Z výše řečeného je jasné, že hladký přechod na vodík, jako na zdroj energie budoucnosti, v brzké době nenastane. Vzhledem k tomu, že se v přírodě volně nenachází, ale musí být vyráběn, nelze ho považovat za palivo, nýbrž nositele energie. Hustota energie obsažená v litru vodíku je oproti metanu třetinová. To je další úskalí, zpomalující nasazení vodíku ve větším měřítku. Dále se vědci potýkají s problémy se skladováním a distribucí vodíku. Vodík při kontaktu s kyslíkem tvoří velmi výbušnou směs. Další hledisko, s kterým je při nakládání s vodíkem třeba počítat.

Vodík je palivo s nejmenší hustotou a nejnižším bodem varu. Tyto vlastnosti skladování nejen neusnadňují, ale i prodražují. Skladování plynného vodíku probíhá v bezešvých lahvích z nízkouhličkatých nebo legovaných chrom-molybdenových ocelí. Při nasazení v automobilech se používají kompozitní materiály potažené tenkou vrstvou kovu nebo speciálního polymeru, zabraňujícího úniku vodíku skrz kompozitní materiál. Vnitřní tlak se pohybuje od 200 bar až v poslední době využívaných 700 bar. Laboratorně bylo odzkoušeno skladování při 1 000 bar. Větší tlak současné technologie nedovolují a zvýšení požadované skladovací kapacity se provádí pospojováním vícero nádrží.

Pokud se rozhodneme pro kapalný vodík, jsou nezbytné vícevrstvé nádrže s výbornými izolačními schopnostmi, neboť vodík musí mít teplotu  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vnitřní přetlak dosahuje maximálně 5 bar. Proces zkapalnění je energeticky náročný a je potřeba až 40 % energie ve vodíku obsaženého. Teplo prostupující přes nádobu zapříčiňuje odpařování vodíku a nárůst vnitřního tlaku, který musí být v rámci bezpečnosti přepouštěn. Denní ztráty dosahují až 3% z objemu nádrže. [21], [22], [23], [24], [25]

S vodíkem bezpečně uloženým v nádržích lze naložit dvěma způsoby – využít ho jako palivo do spalovacího motoru, nebo palivového článku a tím ho přetransformovat na elektrickou energii.

#### 1.4.1 Vodík ve spalovacím motoru

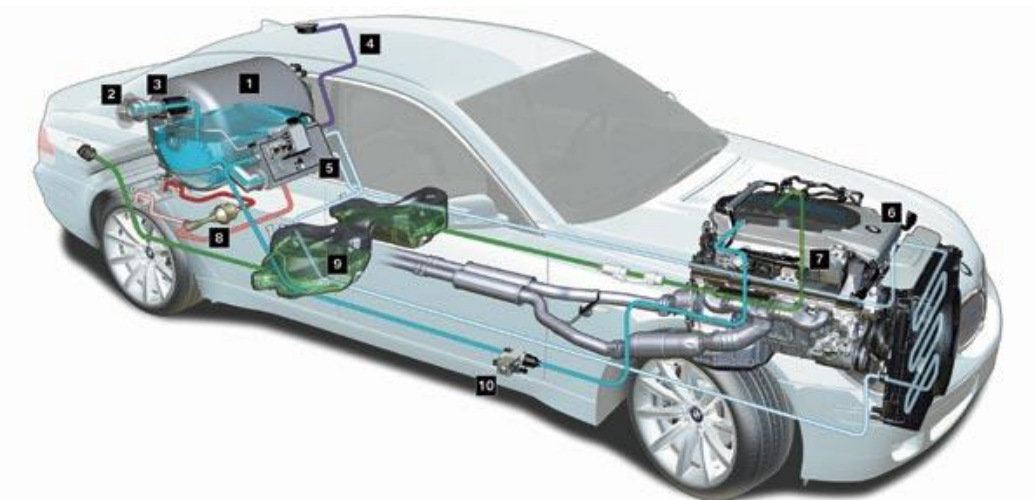
Konečné využití vodíku jako náhrady za klasické fosilní palivo ve spalovacím motoru je principiálně jednoduché. Uzpůsobené auto obsahuje klasické části, přičemž některé části mohou být zdvojeny (nádrž, výfuková soustava). Řídící jednotka určuje nejvhodnější poměr vodíku a vzduchu. Výsledná směs obsahuje přebytek vzduchu. Jeho úkolem je snižovat teplotu spalovacího prostoru motoru, aby nedošlo k překročení kritické teploty a možnému samovznícení. Proces hoření při nižších teplotách je výhodný pro omezení vzniku oxidů dusíku  $\text{NO}_x$ . Vodíkový motor vypouští pouze vodní páru a nízké množství oxidů dusíku.

Bivalentní vůz viz obr 1.1 schopný spalovat v motoru jak benzín, tak vodík, vyráběla automobilka BMW v letech 2005 až 2007 v německém Dingolfingu. Nazýval se BMW Hydrogen 7 a jednalo se o omezenou sérii 100 kusů. Osazený motor byl podobný tomu v modelu 760i, bylo však nezbytné ho upravit. Jednalo se především o snížení kompresního poměru, nové vstřikování a sání. Úpravy se podepsaly na výkonu motoru, který pro obě paliva poklesl z 327 na 190 kW. Zrychlení vozu vzrostlo o 4 sekundy. To je nicméně také způsobeno

nárůstem hmotnosti o 250 kg. Dojezd na obě paliva se sčítá a dosahuje přibližně 200 km na vodík a 500 km na benzín.

V bakalářské práci [22] studenta Pavla Nádraszkého z roku 2009 je proveden výpočet provozních nákladů pro obě paliva. Obtížné získávání samostatného vodíku se projevuje na jeho ceně a proto je kilometrový náklad na palivo při provozu na vodík zaokrouhleně 8,5 Kč, zatímco na benzín 5,1 Kč. To zatím daný vůz, i s přihlédnutím k nemožnosti koupě, ale pouze pronájmu, řadí na pomyslný technologický vrchol automobilky BMW.

Vzhledem k výše zmíněnému se tedy jedná o zdroj energie, který může být v budoucnu alternativou fosilním palivům, vzhledem k teoreticky neomezeným zásobám a téměř nulovému znečišťování. Na druhou stranu se musí vyřešit malá účinnost spalování, jednodušší získávání vodíku za použití obnovitelných zdrojů energie, snížení ceny výroby a jeho účinné a dlouhodobé skladování.[1], [22], [26], [27], [28]



Obr. 1.1 BMW Hydrogen 7 (převzato z [29])

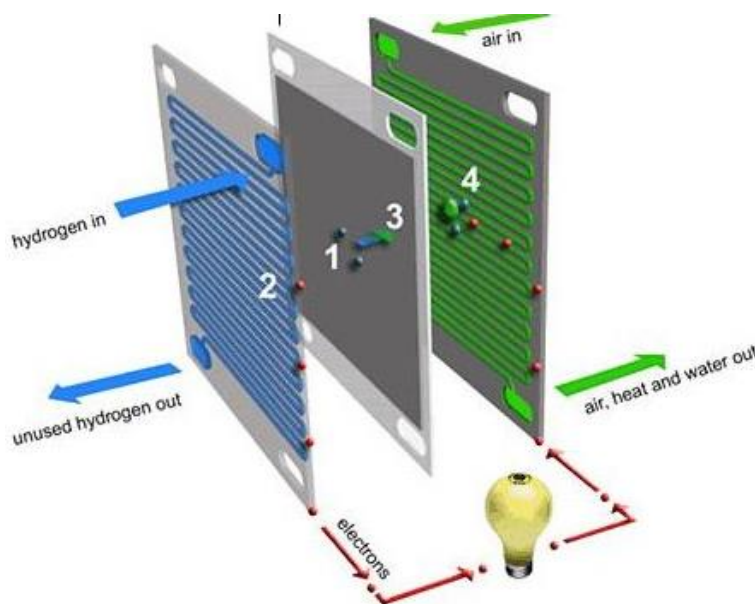
1. Palivová nádrž na vodík
2. Víčko palivové nádrže na vodík
3. Spojka do nádrže
4. Bezpečnostní potrubí a vypouštěcí ventil
5. Tepelný výměník pro vodík + řídicí jednotka pro vodíkovou nádrž
6. Bivalentní spalovací motor
7. Sací potrubí s vodíkovým rozvodem
8. Vypouštěcí vedení při ohřívání a rozpínání vodíku
9. Benzinová nádrž
10. Tlakový regulátor



### 1.4.2 Vodík a palivový článek

Palivový článek je zařízení pro přeměnu energie primární na elektrickou. Děje se tak na základě elektrochemických procesů. Na rozdíl od primárních a sekundárních článků je pro provoz palivového článku nezbytné neustálé přivádění aktivních chemických látek z externího zásobníku, neboť tyto látky nejsou součástí elektrod. Zde jsou elektrody pro účely katalyzátoru elektrochemické reakce a nejčastěji jsou vyrobeny z platiny. Nepoužívaný palivový článek nedegraduje, ani se nevybijí. Naopak při přívodu aktivních látek může pracovat neustále.

Pro udržení palivového článku v činnosti je potřeba zajistit přívod vodíku, oxidantu (kyslíku), odvod reakčních zplodin (vodní páry) a uzavření elektrického obvodu. Vodík přiváděný na zápornou elektrodu oxiduje. Vzniklé uvolněné elektrony přes uzavřený elektrický obvod konají práci a na kladné elektrodě opět reagují s okysličovadlem a vzniká voda, nebo vodní pára. Jak palivový článek vypadá, je vyobrazeno na obr. 1.2.



**Obr. 1.2 Palivový článek s protonovou membránou (převzato z [30])**

Palivový článek není přímo použit pro pohon vozu, ale pro výrobu elektrické energie. Pohon obstarává elektromotor. Vozidlo může být dále vybaveno akumulátorem, superkapacitory nebo obojím, pro efektivnější nakládání s energiemi a pokrytí proudových špiček. V tomto případě nemusí být palivový článek dimenzován na plný výkon motoru, nýbrž může být rozměrově a hmotnostně výhodnější, levnější a hlavně pracovat při optimálním využití a tudíž neefektivněji. Aktuálně nespotřebovaná energie se ukládá pro pozdější použití.

Oproti běžným elektromobilům, vybavených akumulátory, dosahuje toto řešení většího dojezdu. Odpadá také neekologická výroba akumulátorů a jejich následná likvidace. Palivové články neobsahují pohyblivé části a neprodukují proto žádný hluk.

Naproti tomu skladování vodíku ještě není zcela vyřešeno. Plynné skladování není dostatečné a zkapalněný vodík je nutné skladovat při velmi nízké teplotě ve výborně izolovaných nádržích. Vzhledem k použití platiny jako katalyzátoru je výsledná cena palivového článku velmi vysoká. Nalezne-li se typ článku s jiným katalyzátorem, předpokládám, že při hromadné výrobě a zvládnutém vodíkovém hospodářství může být tato technologie další alternativou dnešním palivům. Při provozu článku je nutné zajistit jeho optimální teplotu a stejně tak několik minut trvá prvotní ohřátí při spuštění.

Průkopníkem tohoto druhu pohonu se zdá být Honda se svým modelem FCX Clarity, který byl světu představen v roce 2006. Vůz nebylo možné si zakoupit, ale pouze pronajmout, a to v americké Kalifornii, která disponuje několika veřejnými plnicími stanicemi s vodíkem. Ve voze byla nádrž na 4 kg kapalného vodíku zajišťující dojezd přes 350 km.

Konkurenční automobilka Toyota uvedla na trh svůj „vodíkový“ vůz na přelomu let 2015/2016. Toyota Mirai by měla být přelomová v chápání vodíkového pohonu, přesto tento vůz skrývá jistá ale. Značnou překážkou ke zvýšení prodeje bude jistě i cena převyšující 1 milion Kč. [1], [30], [31], [32], [33]

## 1.5 Elektřina

Elektrická energie má v moderním světě mnoho způsobů využití. Pomáhá, usnadňuje, ale i umožňuje úspěšné provozování zdravotnictví, finančního trhu, školství, zemědělství, velkoobchodu i jiných odvětví hospodářství. Významnou roli hraje na poli dopravy.

Historie elektřiny v dopravě se datuje do první poloviny 19. století, tedy dokonce před vznik benzínového motoru. Z počátku se elektromobily těšily velkému zájmu, přesto počátkem 20. století byly předechnány spalovacím motorem. Ten prošel za svoji existenci ohromným vývojem v rámci zvyšování výkonu a spolehlivosti, snižování hlučnosti, spotřeby, emisí a ceny. Zdálo se, že elektromobily budou navždy v zapomnění. Tento názor však vyvrátila neustále se zvyšující poptávka, závislost na ropě a k tomu následující ropné krize. Návrat elektromobilů do popředí zájmu nastal v 90. letech 20. století a ještě se umocnil novým tisíciletím.

Jak z názvu vyplývá, elektromobil je poháněn elektrickou energií pomocí elektromotoru. Spalovací motor předčí jednoduchostí spouštění, tichým provozem, výrazně jednodušší konstrukcí, nižší hmotností a vyšší účinností. Jednoduchá konstrukce a menší rozměry umožňují konstruktérům umístit elektromotory přímo do kol, čímž odpadá potřeba vybavení vozidla převodovkou, diferenciály či hnacími hřídeli. Nižší počet komponent hnacího řetězce se pozitivně projevuje na výši udržovacích nákladů. Není třeba výměna provozních kapalin, maziv či filtrů. Další obrovskou výhodou je nulové znečišťování bezprostředního okolí při provozování elektromobilu. Proto své uplatnění najde především v pěších zónách, centrech měst, národních parcích a vnitřních prostorech. Předpokládá se, že více než polovina vozidel používaných uvnitř podniků je poháněna elektrinou.

S tím nulovým znečištěním to, bohužel, není až tak jednoduché. Elektrina musí být nejprve vyrobena, aby mohla být použita pro pohyb. Pozitivem je, že zdroj elektrické energie může být obnovitelný a nedochází tudíž k žádné produkci emisí. V případě použití neobnovitelného zdroje (uhelná, plynová elektrárna) je přínosem přesunutí zdrojů emisí z exponovaných míst do oblastí elektráren. Na rozdíl od spalovacího motoru, který vykazuje maximální výkon i točivý moment jen v jistém otáčkovém spektru, je elektromotor schopen dodávat maximální výkon i točivý moment v širokém rozmezí otáček a dokáže zvládnout i krátkodobé přetížení, a to bez destrukce. Dovoluje to konstruktérům osadit vozidlo elektromotorem s nižším výkonem v porovnání se spalovacím. Tyto vlastnosti jsou velmi výhodné pro městský provoz veřejné dopravy s častými zastaveními a rozjezdy. I v tomto režimu použití bude vozidlo vybavené elektromotorem vykazovat plynulejší jízdu bez nepříjemných vibrací. Pokud vozidlo stojí, motor neběží, a tudíž nedochází k žádné spotřebě energie.

Účinnost přeměny elektrické energie na pohybovou je vyšší než 80%. To je více než dvojnásobek v porovnání se spalovacími motory. Ty při brzdění nespotřebovávají žádnou energii (dochází k mírnému zpomalování, ale nespotřebovávají palivo), elektromotory jsou však schopny elektrickou energii dokonce vyrábět a tím ještě zvýšit efektivitu provozu. energii lze poslat zpět do sítě např. u trolejbusů nebo uložit k pozdějšímu využití u vozidel provozovaných v ostrovním režimu. Zpětné využívání energie se nazývá rekuperace.

Přes všechny výše zmíněné výhody nedošlo doposud k početnějšímu rozšíření elektromobilů. Jedním z důvodů je bezesporu cena elektromobilu v porovnání s konvenčním vozem. Ta na jednu stranu reflektuje chybějící mechanické části a jednodušší motor, ale na druhé straně nejsou doposud elektromobily vyráběny ve velkých sériích a nejsou zcela

zaběhnuty. V celkové ceně výrazně dominuje částka za zdroj nebo úložiště elektřiny. Elektromobily stále nedosahují rovnocenného akčního rádiusu jako vozy se spalovacím motorem. Zdroj [36] uvádí, že průměrná denní vzdálenost ujetá automobilem v Americe je méně než 55 km. V ostatních státech je tato hodnota ještě nižší. V těchto případech by bylo nasazení elektromobilu efektivní. Úložištěm je ve většině doposud prodávaných elektromobilech akumulátor. Lze však použít i jiné způsoby, které více či méně s osazením akumulátorů také počítají. Některé z dostupných možností jsou zmíněny a blíže popsány níže spolu se způsoby rozšíření dojezdu na elektrický pohon. [1], [3], [22], [32], [34], [35], [36]

### 1.5.1 Akumulátor

Běžný elektromobil se bez akumulátoru, neboli trakční baterie, nemůže obejít. Slouží jako úložiště elektrické energie a jiným zdrojem vůz nedisponuje. Nejperspektivnějším akumulátorem se jeví ten na bázi lithia – Li-ion, Li-Pol, LFPO. Jednotlivé druhy se v závislosti na materiálu a chemickém složení liší v nákladových, energetických i mechanických vlastnostech. Lze se i setkat s olověnými, nikl-kadmiovými nebo nikl-metal hydridovými akumulátory. Každý ze zmíněných typů má své přednosti i zápory. Přesto ani jeden z doposud objevených nesplňuje všechny požadavky kladené na zdroje energie v elektromobilech:

- Vysoký hmotný výkon – podíl množství energie, kterou je akumulátor schopen dodávat do zátěže a jeho hmotnosti - ovlivňuje výkonové parametry vozu (W/kg)
- Vysoká hmotná energie – podíl množství energie, kterou je akumulátor schopen uchovat a jeho hmotnosti – ovlivňuje dojezd vozu (Wh/kg)
- Přetížitelnost výstupního výkonu – ovlivňuje dynamiku jízdy při rozjezdech
- Rychlá akumulace rekuperované energie
- Přiměřená cena
- Vysoký počet nabíjecích cyklů nezávislý na stáří
- Vysoká účinnost a rychlost nabíjení a vybíjení
- Odolnost vůči paměťovému efektu, tj. snižování kapacity vlivem nevhodného nabíjení
- Mechanická odolnost, nezávislost na okolní teplotě
- Nízký vnitřní odpor
- Ekologická recyklace

Ideální akumulátor s rezervou splňující všechny parametry dosud neexistuje. Zatím není možné vyrobit víceúčelový pohon splňující protichůdné požadavky na výkon, rozměry, hmotnost, dojezd a cenu. Volba akumulátoru se tedy odvíjí od zamýšleného účelu. Z principu se nehodí pro dálkové použití a své uplatnění najde především v městských elektrobusech s kratší jízdní trasou, kde denní nájezd je předem odhadnutelný a často nižší než 150 km. Dále jsou pro elektrobusey charakteristické jejich časté rozjezdy a brzdění s možností rekuperace. Pokud to okolnosti vyžadují, lze elektrobuse dobíjet i mimo depo dopravního podniku. Způsoby nabíjení jsou popsány v kapitole 1.5.3.

Pro efektivní a hospodárné využívání elektrobuse je nezbytné správné provázání vhodného akumulátoru, typu pohonu, velikosti elektrobuse, jízdního profilu i trasy a možnostmi dobíjení. Získaný vůz bude důsledněji splňovat ekologické a hlukové požadavky na moderní dopravní prostředek především v centrech měst a jejich historických částech. [1], [32], [34], [35], [37]

### **Akumulátory na celý den**

Léty prověřená technologie, avšak stále s jistými negativy. Současné akumulátory umožňují elektromobilům urazit vzdálenost 150 km, aniž by výrazně omezili užitný prostor. Denní porce kilometrů běžného motoristy je však zhruba třetinová, ale často i menší. Autobusy ve službách městské hromadné dopravy jsou provozovány téměř po celý den, tj. 20 hod. Během této doby přepraví několikanásobně více cestujících než osobní elektromobil a urazí přitom vzdálenost mnohdy přes 200 km. Z tohoto pohledu je zřejmé, že provozování jednoho elektrobuse přináší společnosti větší přínos z hlediska úspor energie a omezování znečišťování životního prostředí než jeden individuální elektromobil. Vývoj v oblasti akumulátorů zvýšil hustotu uložené elektrické energie. Bohužel není stále dost vysoká na to, aby bylo efektivní postavit elektrobuse pro celodenní linkový provoz v jakémkoliv počasí. V prezentaci p. Pohla [38] je proveden výpočet dojezdu elektrobuse v ideálním případě a dále se zastaveními, jízdou v kopcovitém terénu, se zapnutým topením, rezervou pro pokles kapacity a proti úplnému vybití. Při výpočtu byl uvažován 12 m elektrobuse s velkým akumulátorem o kapacitě 300 kWh. Maximální teoretický dojezd je 450 km, přičemž s přibývajícím dojezdem omezujícími parametry klesá až na 120 km. To je pokles o 73 %. Vysoká účinnost elektrického motoru neumožňuje využívat jeho zbytkové teplo pro vytápění vozu. To se podepisuje na sníženém dojezdu. Řešením je doplňkové naftové topení. Při jeho instalaci však vozidlo ztrácí punc bezemisního vozidla.

Míru dojezdu lze tak v zásadě kromě vhodného nasazení a efektivního řízení ovlivnit pouze velikostí baterie. Presentace společnosti Solaris [39] zmiňuje úskalí nasazení velké baterie. Tím je její hmotnost snižující užitečnou nosnost vozidla a dále také prostor, který ve vozidle zabere. Pro bližší názornost jsou tyto informace shrnuty v tabulce 1-I.

**Tab. 1-I Parametry elektrobusu při různých variantách akumulátoru (pro referenční 12m elektrobus při vypnutém topení a klimatizaci) [39]**

	Neužitečné	Ke zvážení	Výhodné
Dojezd [km]	350	185	60
Kapacita ak. [kWh]	450	240	80
Hmotnost [kg]	5 430	2 800	960
Dopad na obsaditelnost [počet pasažérů]	-78	-41	-15

### Výměna baterií

Relativně krátký dojezd akumulátorových elektrobusů je navíc ještě umocněn jejich dlouhým nabíjením (lze použít rychlonabíječky, které však negativně ovlivňují životnost baterií a enormně zatěžují rozvodnou síť, jež pro tento druh použití musí být vhodně dimenzována). Může se stát, že během nočního nabíjení akumulátor nedosáhne potřebné úrovně nabití pro celodenní jízdu. Nastalé potíže mohou být vyřešeny nasazením jiného plně nabitého vozu (vzhledem k pořizovacím nákladům elektrobusů není nákup nadbytečného množství pravděpodobný) nebo autobusu se spalovacím motorem (vyšší jízdní náklady jsou doprovázeny vypouštěnými zplodinami).

Další alternativou je výměna vybité sady akumulátorů za nabitou. Ve vhodně navrženém elektrobusu může být celková výměna otázkou pouze několika minut. Tento způsob může být i řešením na prodloužení dojezdu. Při poklesu hladiny nabití pod jistou úroveň by elektrobus zajel na výměnu sady akumulátorů. Vyjmuté akumulátory by mohly být následně optimálně nabíjeny s důrazem na životnost článků a rovnoměrného rozložení zatížení napájecí sítě i nabíjecích stanic v čase a místě. Potenciál úspor je ve využívání levnějších tarifů elektrické energie a obnovitelných zdrojů.

Pro zjednodušení a zrychlení výměn v rámci celého vozového parku by byla nutná unifikace vozů, akumulátorových sad a jejich výborná přístupnost. Umístění hmotných

akumulátorů ovlivňuje těžiště vozu. Nezřídka se však stává, že je akumulátor rozdělen na několik částí a ty jsou rozmístěny po celém voze pro efektivnější vyplnění volných prostorů. Dokonce se mohou nacházet i na střeše vozidla. Obtížnost výměny by se odrážela na ekonomice provozu a času výměny.

Akumulátorové sady by nebyly stálou součástí vozů, nýbrž by docházelo k jejich výměně ve specializovaných výměnných střediscích. Není možné, aby jejich majitelem byl vlastník automobilu. Řešením se tak jeví plošný pronájem od jedné nebo několika společností, ideálně vzájemně spolupracujících. Řidič by touto službou získal potencionálně neomezený dojezd s krátkou dobou „tankování“. Životnost by byla ovlivněna jednotlivými řidiči, jejich jízdními styly i nabíjecími zvyklostmi. Bez absolutní unifikace vozidel, akumulátorů, nabíjecích konektorů a nabíječek si lze tento postup ve větší míře jen velmi těžko představit.

Přes všechny zmíněné obtíže danou možnost výměny akumulátorů nabízí na svých webových stránkách [40] společnost Renault u modelu FLUENCE Z.E. Proces výměny prováděný na vybraných pracovištích trvá pouze 3 minuty a automobilka jej nazývá „Quick Drop“.

Při aplikaci technologie výměn v rámci dopravního podniku u elektrobusů, by odpadla problematika vlastnictví akumulátorů i různých nabíjecích technik. Stejně jako u autobusů a trolejbusů jsou u elektrobusů využívány jednotné karoserie, jež by usnadňovaly unifikaci exponovaných dílů. Vzhledem k neustálému vývoji na poli akumulátorů, superkapacitorů a dalších alternativ ve skladování energie s důrazem na hustotu uložené energie a výkonu, snižování hmotnosti a ceny, zkracování nabíjecího času, optimalizování jízdních linek a způsobům nabíjení se mi prodlužování dojezdu výměnou akumulátorů jeví do budoucna jako nereálné. [40], [41]

### 1.5.2 Superkapacitory

Dynamický provoz a rychlé nabíjení si žádá zdroj energie s vysokým měrným výkonem. Současné akumulátory tomuto požadavku mnohdy nestačí a tak vznikl prostor pro superkapacitory. Běžný kondenzátor má extrémně vysokou hustotu výkonu, zatímco hustota energie je velmi nízká. V zásadě má zcela opačné vlastnosti než akumulátor, který dále vykazuje nižší účinnost, jelikož elektrická energie se musí při ukládání transformovat na chemickou a při vybíjení naopak.

Vysoká účinnost ukládání elektrické energie je u kondenzátorů dána jejím přímým uchováváním. Superkondenzátor je z principu podobný elektrolytickému kondenzátoru. Obě elektrody jsou tvořeny pórovitým uhlíkem pro dosažení co největšího povrchu elektrod v zájmu rychlejší absorpce iontů a to až 3000 m<sup>2</sup> z jednoho gramu uhlíku. Mimo tekutého elektrolytu se mezi nimi nachází i separátor, který odděluje dvě vrstvy, v nichž je skladován elektrický náboj. Zjednodušeně lze superkapacitor přirovnat ke dvěma kondenzátorům zapojeným do série. Kombinace velké plochy elektrod a velmi malých rozměrů uhlíkových zrněk, je předpokladem velké kapacity v řádu Faradů. Malá tloušťka dielektrika je na druhou stranu omezujícím faktorem výsledného napětí superkapacitoru, které nepřevyšuje 3 V. V praxi se více uplatňují sério-paralelní kombinace, tzv. kondenzátorové baterie.

Okamžitá možnost čerpání velkého měrného výkonu předurčuje superkondenzátory pro použití v aplikacích, kde jsou vysoké špičkové odběry. Vzhledem k velmi malému sériovému odporu (řádově mΩ) je přenos energie velmi účinný a bez výrazných tepelných ztrát. Výsledná účinnost se pohybuje i přes 90 %. Vnitřní odpor pozitivně ovlivňuje rychlost odezvy superkondenzátoru na změnu zatížení a umožňuje rychlý přechod mezi režimy nabíjení a vybíjení. Oproti akumulátorům jsou dále výhodné pro svoji životnost danou počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů. Kapacita a vnitřní odpor superkondenzátoru degradují po každém cyklu. Provozní doba se udává jako počet cyklů, po kterém kapacita dosáhne 80 % své původní hodnoty a velikost vnitřního odporu se zdvojnásobí. U nových modelů je životnost až 1 000 000 cyklů. Superkondenzátor lze i nadále používat, ovšem se zhoršenými parametry. Jsou odolné vůči vibracím a jejich kapacita neklesá s okolní teplotou, bohužel reakční doba roste v závislosti s redukovanou pohyblivostí iontů. Vnitřní odpor mírně roste. Životnost je ale teplotou ovlivněna. Typická hodnota 1 000 000 cyklů platí pro provozní teplotu 25°C. S rostoucí teplotou životnost klesá. Dále jí také neprospívá provozování při vyšším napětím než jmenovitém. Superkapacitory nemají žádný paměťový efekt.

Charakteristickým rysem je nižší uložená hmotná energie v porovnání s akumulátory viz Tab. 1-II. Za účelem zvýšení hustoty uložené energie se testují nové materiály elektrod a očekává se i používání nanostruktur. Tím by se mohla hustota uložené energie zvýšit nad současnou úroveň chemických zdrojů a možnost použití superkapacitorů by se výrazně rozšířila. V současnosti se používají pouze ke krátkodobému uložení energie, neboť vykazují nežádoucí efekt samovybíjení. Výrazným negativem bránící vyššímu nasazení je vysoká cena spočívající v samotné ceně článků, ale i kontrolní a řídicí elektronice.



Vyvážený mix pozitiv a nedostatků dělá ze superkapacitorů lukrativní zboží s širokým portfoliem uplatnění. Mohou být použity pro krátkodobé zálohování při výpadku elektrické energie. Jeho největší využití je však jako úložiště energie v elektrobusech, jiných hybridních vozidlech, nebo elektrické trakci. Místo maření v odporních je energie vyrobená rekuperací s vysokou účinností ukládána do superkapacitorů. Při následném požadavku na příkon je spotřebovávána primárně před jiným zdrojem energie. Jejich velká výkonová hustota by umožnila ještě navýšit dynamické parametry elektromobilů. Pokud jsou použity v součinnosti s akumulátorem, slouží především k dodávce energie při odběrových špičkách a primární zdroj dodává pouze trvale potřebnou energii. Zvýší se tím jeho životnost.

Od roku 2006 jezdí v Šanghaji 12m autobus se superkapacitory o kapacitě 5,9 kWh. Nabíjení probíhá po dobu 30 s na vybraných zastávkách a současně 5 minut na konečných stanicích. Jako primární a jediný zdroj dovolují autobusu urazit až 10 km. Oproti trolejbusu vykazují až o 40 % menší spotřebu, z důvodu nižší hmotnosti a efektivnějšímu nakládání s brzdou energií. I při využívání elektřiny z uhelných elektráren dochází k třetinovému vypouštění oxidu uhličitého nežli u dieselového autobusu. [32], [36], [37], [42], [43], [44], [45]

**Tab. 1-II Orientační parametry akumulátorů, superkapacitorů a kondenzátorů [43]**

parametr	Akumulátor	Superkapacitor	Kondenzátor
Měrná energie	100 Wh/kg	10 Wh/kg	0,2 Wh/kg
Měrný výkon	1 kW/kg	10 kW/kg	500 kW/kg
Doba nabíjení (podobná době vybíjení)	5 h	10 s	0,001s
Životnost	1000 cyklů	1 000 000 cyklů	1 000 000 cyklů

## 1.6 Dobíjecí infrastruktura

Elektrická energie potřebná pro pohon elektromobilů a elektrobuseů, až na výjimky, nevzniká přímo na palubě vozů. Je vyráběna z obnovitelných i neobnovitelných zdrojů zcela mimo místo její spotřeby. Souhrn zařízení, která se nacházejí mezi zdrojem elektrické energie a samotným úložištěm ve vozech se nazývají *elektrická trakční zařízení*. Ta, která jsou umístěna na pevných základech, a není s nimi možno za provozu pohybovat, slouží pro přeměnu a přenos elektrické energie vhodných parametrů od přípojky po trolejové vedení nebo plug-in konektor, jsou *stacionární*. Elektrické výzbroji hnacích vozidel se říká mobilní. Jedná se o zařízení

sloužící k odběru elektrické energie z trakční sítě, její akumulaci, regulaci pohonu, rekuperaci a další pomocné a komfortní prvky. [34]

Měnírny, neboli pevná trakční zařízení pro úpravu primárního střídavého napětí na stejnosměrnou hladinu 600 V jsou strategicky rozmístěna v rámci celé trakční sítě. Obvykle jsou osazeny vypínačem, vstupními transformátory, 12-ti pulzním usměrňovačem a rychlovypínači. Následuje soustava zemních vodičů dimenzovaných na příslušný příkon. Vyúsťují u napájecích bodů. Nejsou však přímo napojeny na trakční vedení, nýbrž přes odpojovač. Vedení není celistvé, ale je rozděleno do úseků. Mezi nimi se nachází úsekový dělič, což je místo bez napětí. Zmíněná trakční zařízení slouží pro napájení klasických trolejbusů. V případě elektrobusů je situace mírně odlišná. Blíže se této problematice budu věnovat níže. [46], [47], [48]

U trolejbusu už kromě elektrického motoru a jeho regulace následují pouze tyčové sběrače. Jedná se o laminátové tyče umístěné na střeše trolejbusu, na jejichž druhém konci jsou připevněny mosazné botky. V nich je umístěn měkký uhlík zajišťující dobrý elektrický kontakt s trolejovým vedením a výhodné mechanické vlastnosti. Mosazné botky jsou s trakčním měničem spojeny vodičem. [46]

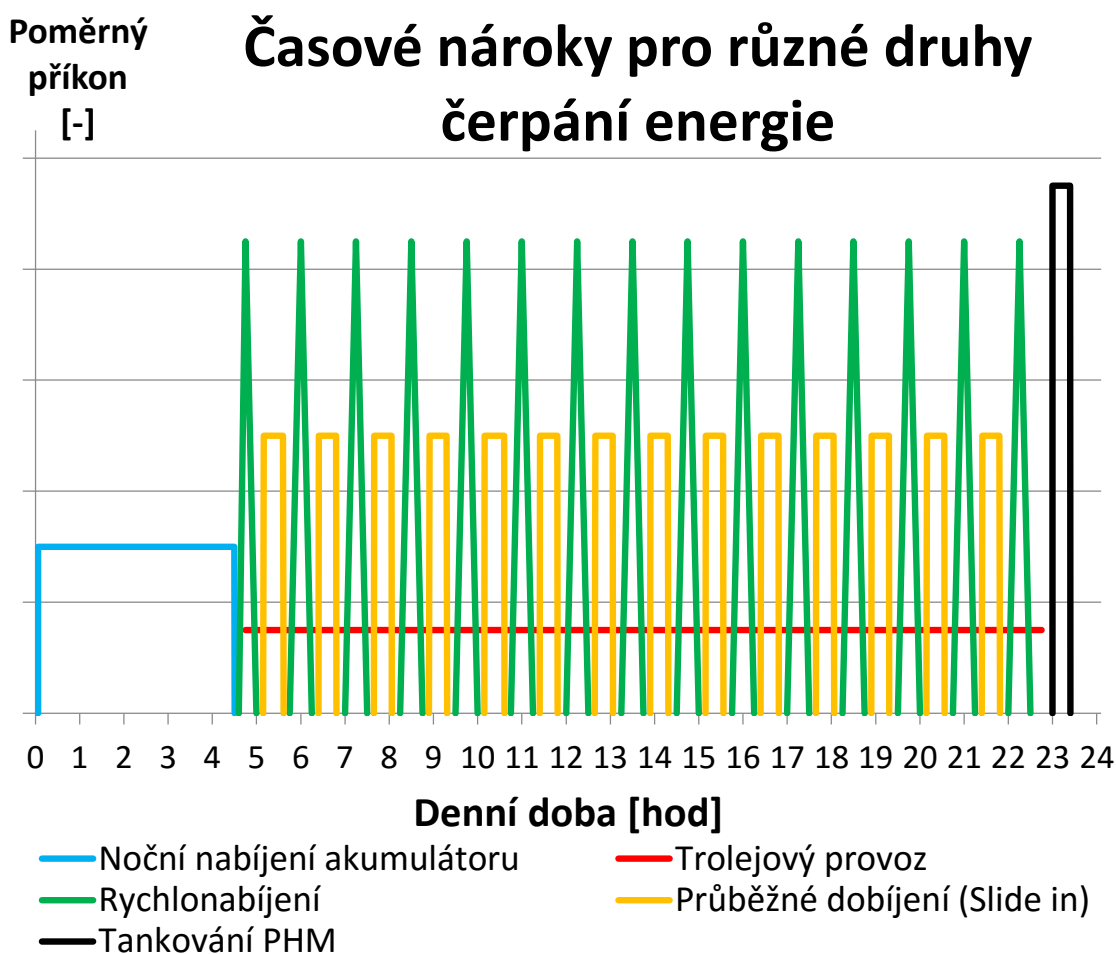
Dosavadní přístupy k vozidlům veřejné dopravy byly, že jsou schopny celodenního provozu po načerpání pohonných hmot, nabití akumulátorů nebo doplnění jiného nositele energie. Předpoklady to nejsou špatné, především z pohledu flexibility, jednoduchosti provozu a infrastruktury, okamžité operativnosti a dojezdové vzdálenosti. S tímto úsudkem by však ještě dlouho nemohlo dojít k plnohodnotnému nahrazení naftu spalujících autobusů moderními, tichými a lokálně bezemisními elektrobusy. Technologie akumulátorů ještě k možnosti tvrdého celodenního provozu nedospěla.

V minulosti i současnosti se celodenní mimokolejový elektrický provoz řeší především trolejbusy. Toto řešení klade vysoké nároky na infrastrukturu, kdy pro 100 % elektrický provoz musí být horní trolejové vedení nataženo po celé délce linek. K tomu připadá odpovídající množství napájecích podzemních kabelů, napájecích bodů, úsekových děličů, křížení, výhybek, obloukových trolejových úseků a především měníren. Dle [49] náklady na novou infrastrukturu se pohybují v průměru 1 000 EURO na 1 m tratě. Na dlouhých přívodních vedeních i trolejových úsecích vznikají ztráty. V těchto vzdálených místech od měníren může docházet k poklesu trolejového napětí a vzniku následných problémů. Se vzrůstající hustotou budov

vzniká problém související s umístěním nosných konstrukcí nebo úchytů trolejového vedení. Majetkoprávní vztahy prodlužují dobu výstavby a jsou přídatnými náklady. Provoz trolejbusů je na trolejovém vedení zcela závislý. Nejsou možné žádné objížďky. I drobná komplikace v provozu způsobuje zdržení a roste nespokojenost cestujících. Rekuperace elektrické energie je závislá na přítomnosti jiného vozu na stejném napájecím úseku nebo na schopnosti měničny vracet elektrickou energii zpět do rozvodné sítě. Ty starší založené na tyristorových usměrňovačích toho schopny nejsou. Naopak výhodou je rovnoměrnost zatížení rozvodné sítě a dále nižší nároky na vozidla. Elektrická výzbroj vozů se skládá ze sběračů, řídicí elektroniky a elektromotoru. Trolejbus neobsahuje žádné úložiště energie. To se pozitivně projevuje na ceně vozového parku. V případě výpadku napájení je však celý provoz zastaven. [49]

Na Obr. 1.3 je možno vidět dřívější způsoby čerpání energie pro pohon vozidel jako je tankování PHM a noční nabíjení akumulátoru. Především v případě dieselu je čerpání otázkou několika minut následný jízdní dosah je v řádu stovek kilometrů. Z hrubého hlediska dochází u trolejbusů ke kontinuálnímu odběru elektrické energie bez extrémních špiček. Vývoj moderní elektroniky, řídicích systému, akumulátorů a ultrakapacitorů změnil pohled na provozování veřejné dopravy. Vhodně navrhnutá infrastruktura, efektivní pohon a adekvátní energetické úložiště dovolují proměnu ze závislého trolejbusu na polozávislý elektrobús. Hlavní myšlenka spočívá v plánování tras, nasazení vhodně vybavených a dimenzovaných elektrobúsů s adekvátním způsobem nabíjení. Ty se dělí na:

- Kontaktní x Bezkontaktní
- Zastávkové x Obratišťové x Průběžné



Obr. 1.3 Průběhy čerpání energie [50]

### 1.6.1 Způsoby nabíjení

#### Kontaktní kabelové nabíjení

Kontaktní spojení je osvědčená technologie s bohatou historií. Spojení rozvodné sítě s vozem má na starosti napájecí kabel zakončený vhodným konektorem. Těch je k dispozici široké množství variant, což je v této oblasti spíše na škodu. Velice by pomohla globální standardizace. Při použití v městské dopravě je tento způsob nabíjení využíván především v nočních hodinách nebo při dlouhodobější zastávce. Výhodou je cena zařízení a téměř 100% účinnost daná pouze ztrátami ve vodičích. Nabíjecí výkon je v jednotkách, maximálně v desítkách kW. Dojezd vozidla je dán především velikostí baterie. Princip je zobrazen na Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Plug-in nabíjení elektrobusu (převzato z [51])

### Bezkontaktní nabíjení

Je založeno na indukčním přenosu energie, kdy vysílací část je nejčastěji uložena v zemi a je připojena k elektrickému vedení. Přijímací část se nachází ve spodní části vozidla – elektrobusu. Vysílací cívkou prochází elektrický proud a vytváří magnetické pole, které indukuje v plošné sekundární cívce elektrický proud. Tento jev vzniká, i pokud se v železném jádře nachází vzduchová mezera. Můžeme tedy hovořit o bezkontaktním přenosu energie.

K nabíjení akumulátorů dochází nejen při stání vozu, ale i při jeho pohybu pruhem vybaveným bezkontaktní technologií. Celý proces „vzdušného“ nabíjení dosahuje 90% účinnosti v porovnání s kabelovým dobíjením. Princip je zobrazen na Obr. 1.5.

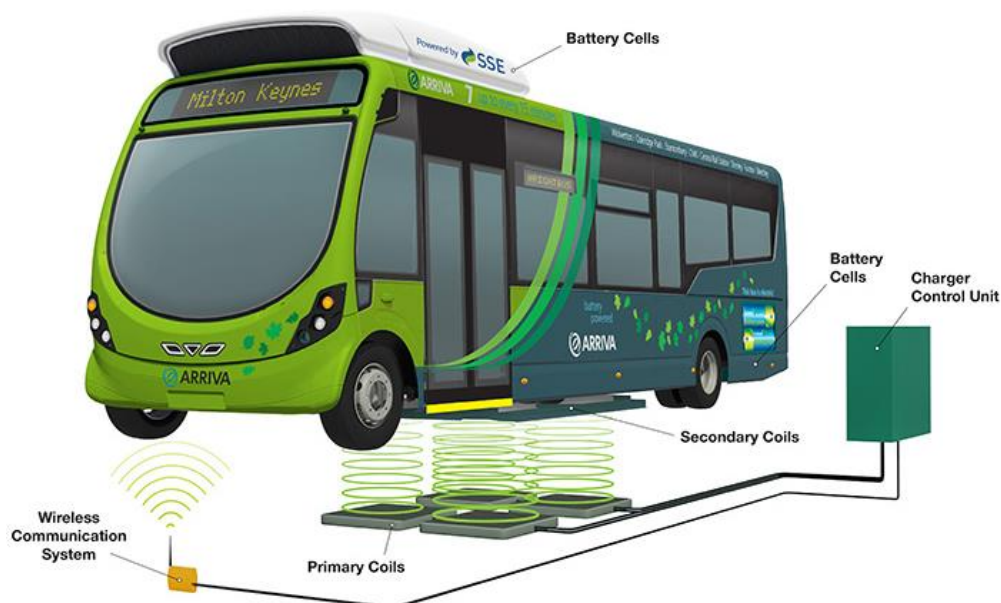
Vzhledem k neexistujícímu silovému kontaktu vozu a nabíjecího místa by bylo nerozumné jakékoliv datové kabelové spojení. I toto je nutné řešit bezkontaktně. Proces lze nastavit tak, že nabíjení započne při správném umístění vozidla nad nabíjecí místo. To je velmi důležité, neboť správné fungování a vysoká účinnost je podmíněna ideální vzájemnou pozicí cívek. V aplikacích, kde je jednoduchost upřednostněna před účinností, lze použít vysílací cívku větších rozměrů. Na přesné umístění vozu již nebudou kladeny tak velké nároky avšak při snížené účinnosti. To je z hlediska přenosu vysokých výkonů při nabíjení nežádoucí.

Účinnost silně a nepřímě úměrně ovlivňuje vzduchová mezera mezi cívkami. Její snížení lze realizovat vysouváním cívky zabudované ve vozovce nebo poklesem mobilní cívky, případně celého auta, např. pomocí pneumatického odpružení. Při skončení nabíjení se vše

uvede do výchozí polohy. Vhodně dimenzovaná cívka je nežádoucím přídatným zařízením zvyšujícím hmotnost elektrobuse.

Nabíjení je plně funkční i při dešti a oproti nabíjecím stanicím je odolnější vůči svému okolí i potencionálním škůdcům. Většina částí je totiž umístěna pod zemí nebo v přilehlé napájecí buňce. Bezdrátové technologie mají za úkol plnit svou funkci stejně kvalitně jako drátové varianty, avšak při zvýšeném uživatelském komfortu. K tomuto ideálu se bezdrátové nabíjení zatím nedostalo. [41], [52], [53], [54]

Zkušenosti s provozem indukčně dobíjených elektrobuseů sbírají od října 2015 v Belgii, konkrétně v městě Bruggy. Energie pro dobíjení se čerpá z trolejové sítě současného tramvajového provozu. Provoz mají na starosti elektrobusey zkrácené na 9,7 m vybavené trakčním motorem o výkonu 160 kW. Vůz je dále vybaven 36kWh akumulátorem technologie Li-ion. Po celonočním Plug-in nabíjení vystačí energie až na 45 minut provozu. Elektrobusey obsluhuje linku dlouhou 3,2 km s jízdní dobou 10 – 15 min. Při dokončení okružní jízdy vůz zastaví v zastávkovém zálivu vybaveném bezkontaktním nabíjením. To započne po zjištění, že elektrobusey zcela zakrývá nabíjecí desku. Výkonem 200 kW netrvá plné nabití déle, než 12 min. Výrobce udává celkovou účinnost nabíjení přes 90%. Vzhledem k nedávné době spuštění tohoto projektu jej není možné komplexně hodnotit, ale již nyní je zřejmé, že pro historické město Bruggy jsou krátké elektrobusey více než vhodné pro nulové emise a nehlukný provoz. [55], [56]



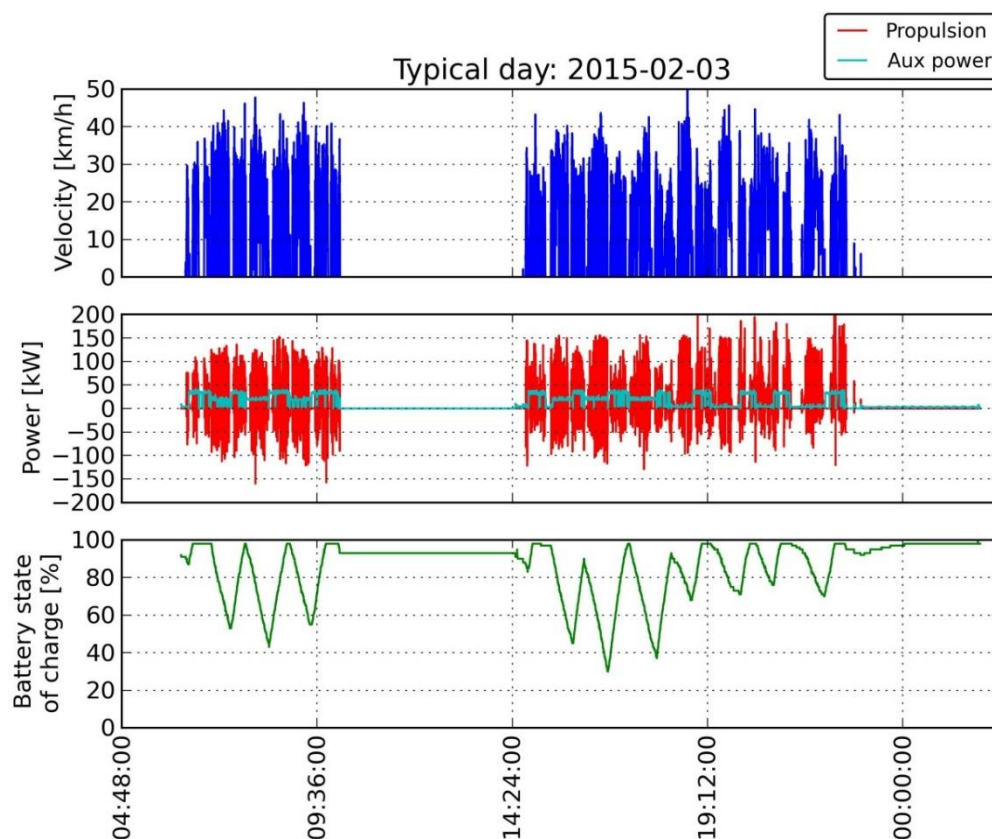
Obr. 1.5 Bezkontaktní indukční nabíjení (převzato z [57])

## Průběžné nabíjení, Slide – in, In Motion Charging (IMC)

Všechny doposud zmíněné způsoby přenosu energie ze sítě do vozu vyžadovaly stojící vozidlo. Neuvažují metodu jízdních pruhů vybavených cívkami pro bezkontaktní přenos energie pro svou nižší účinnost a vysoké náklady na budování infrastruktury. Po dobu nabíjení závislé na jeho způsobu, typu úložiště a zdroji elektrické energie, je vozidlo v klidu a nemůže být použito v provozu. Zdá se to být minimálním problémem, neboť čerpání klasických pohonných hmot trvá v řádu jednotek minut, ale šetrné nabíjení akumulátorů je otázkou několika hodin. Děje se tak především v nočních hodinách, kdy ale nemohou dané elektrobuses vykonávat službu noční linky a musí být nahrazeny diesellovými autobusy, nebo u nich musí dojít k výměně akumulátoru. Náhradní akumulátor i jeho výměna jsou však další přídavné náklady na provoz. Vzhledem k době nabíjení je žádoucí velká kapacita akumulátoru a následný provoz bez přestávek. Tomuto způsobu nabíjení se říká Plug-in.

Oproti tomu Slide-in používá stále baterii jako hlavní zdroj energie, ale ta se dobíjí v průběhu jízdy i zastaveních. Nabíjení probíhá skrz vodička vložená do vozovky, indukčním systémem a nejčastěji vrchním vedením, ne však na 100 % délky tratě. Ve švédském městečku Landskrona je tento systém již v provozu a jen 30 % délky linky dochází k nabíjení. To probíhá na současných trolejbusových linkách a bateriový provoz je využit v místech, která dříve obsluhoval naftu spalující autobus. Používají trolejbus Škoda Trollino 12 dovybavený o automatické sběrače, 450V baterii o kapacitě 54 kWh pro samostatný dojezd 20 km. Projekt běží již od roku 2011 a tak jsou bohaté zkušenosti s provozem i mnoho naměřených dat.

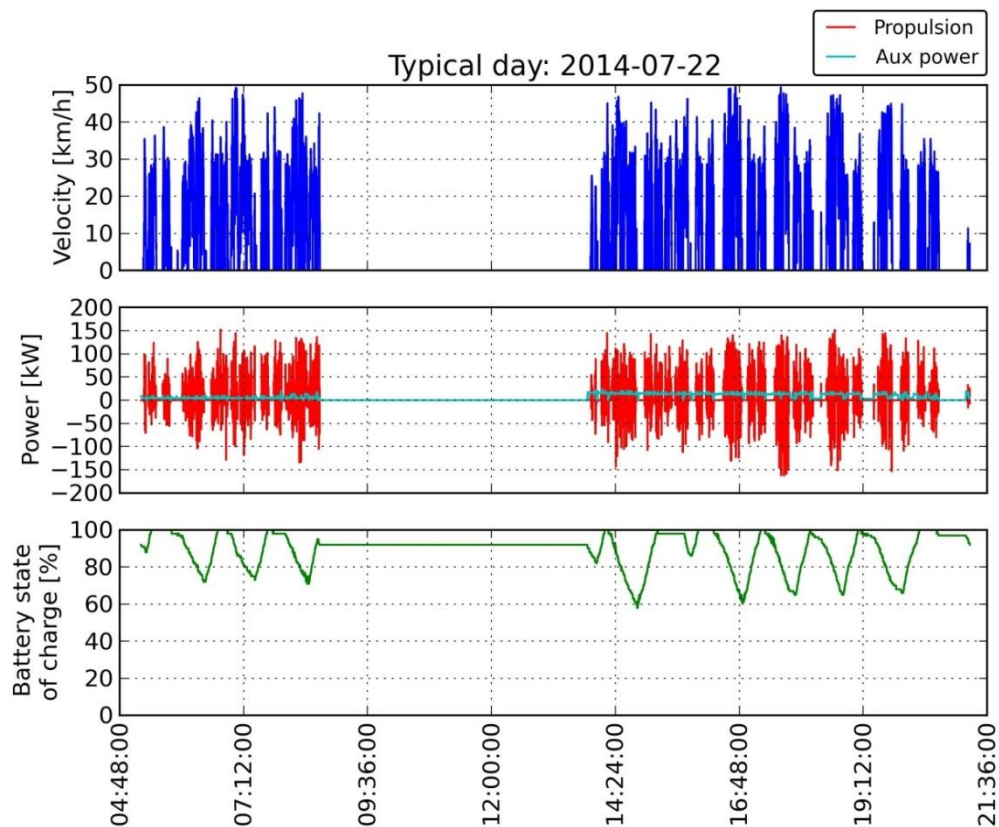
Elektrobuses jsou provozovány na dvou linkách, přičemž v obou případech dochází k 6 km nabíjení a 8,2 – 9,2 km bateriového provozu. Z obrázku 1.6 vyplývá, že ve vyobrazeném dni byl elektrobuses využíván při ranní a odpolední špičce s přibližně 5 hodinovou pauzou přes poledne. Vlivem chladného počasí v únoru bylo nutné mít zapnuté vytápění, což dokládá tyrkysová křivka odebíraného výkonu pomocných zařízení. Úroveň nabití akumulátoru oscillovala od 100 % až po 30 %. Dále je z obrázku zřejmé, že odběr pomocných zařízení byl v době nabíjení vyšší. V posledních 4 jízdních cyklech bylo topení v době bateriového provozu vypnuté, což se odrazilo na poklesu úrovně nabití pouze o maximálně 30 %. Při zapnutém topení se jednalo zhruba o dvojnásobek. Ve většině případů byla doba nabíjení dostatečná pro dosažení plné kapacity. Po ukončení denní služby předpokládám, dle pomalejšího průběhu nabíjení, připojení vozu k nabíjecí stanici spojené s vyrovnáním napětí článků. Celkově vůz za den překonal vzdálenost 106 km na baterie a 68 km trolejového provozu.



Obr. 1.6 Naměřené provozní hodnoty elektrobuse v režimu slide-in (převzato z [58])

Z předchozího případu je zřejmé, že vytápění vozu výrazně ovlivňuje jeho dojezd. Stejně tak, i když nikoliv tak výrazně, k jeho snížení dojde při používání klimatizace. Obrázek 1.7 zobrazuje průběh jízdy elektrobuse v červenci 2014. Vůz vykonal 10 jízdých cyklů, přičemž urazil 88 km na baterie a 62 km trolejového provozu. V dopoledním provozu nepanovalo velké horko, a tudíž klimatizace byla vypnutá. Naopak odpoledne již byla zapnuta. Výsledkem byl rozkmit úrovně nabití zvýšený v průměru o 10 %.





Obr. 1.7 Naměřené provozní hodnoty elektrobuse v režimu slide-in (převzato z [58])

Slide-in je provozován na současné infrastrukturu a využívá ji pro expanzi dosavadních linek až do míst, kde by budování plnohodnotné napájecí infrastruktury pro klasické trolejbusy postrádalo ekonomický smysl. Dosahuje nižších nákladů na budování infrastruktury. Obsluhující vozidla nejsou zcela závislá na trolejovém vedení a v případě výskytu překážek je mohou objet. Trolejové vedení není bohužel dimenzováno na vysoký konstantní proud. Z dlouhodobého hlediska je přípustné nabíjení 90 A [60]. Toto pravidlo platí obzvláště pro stojící vozidla.

Již dříve jsem zmínil, že průměrná cena 1 m trolejového vedení i s měnírou je 1000 EUR/m. Dochází-li k trolejovému provozu pouze na polovině délky linky, poklesnou náklady nikoliv na polovinu, nýbrž méně než 40 %, neboť zmizí složitá křížení, výhybky a oblouky. Nabíjecí sekce je vhodné umisťovat do pomalu projížděných úseků a obratišť, pro maximalizaci času zde stráveného. Dalším vhodným místem jsou strmá stoupání, kde je principiálně vysoká spotřeba, která je hrazena z trolejí a dále dochází i k nabíjení. Je také žádoucí, v rámci snížení infrastrukturních nákladů, vyhnout se složitým úsekům s kříženími a výhybkami a tudíž budovat trolejové vedení v rovných úsecích. Dále je ke zvážení, zda

budovat napájecí vedení spíše v centru měst anebo v okrajových částech. Pro každou variantu jsou jistá pro a proti.

### **Střed měst**

- + pomaleji projíždějící vozidla (světelné křižovatky, častější výskyt zastávek)
- + vícenásobné využívání infrastruktury – linky obvykle vedou skrz centrum
- + více rozjezdů tj. větší spotřeba krytá z vnějšího napájení
- obvykle komplikovanější vedení (křížení, výhybky)
- zastavěnost a složitější umístování sloupů a převěsů
- nenabíjení při stání v obratištích

### **Okrajové části**

- + snazší budování sloupů a převěsů
- + využití doby stání na obratišti
- + zpravidla rovnější úseky
- větší průměrná rychlost, tj. delší ujetá dráha za stejný nabíjecí čas
- individuální budování nabíjecích úseků pro jednotlivé linky

Každé město je originální svou rozlohou, traťovým profilem, složitostí dopravního systému, již vybudovanou infrastrukturou a mnoha dalšími faktory. To je důvod, proč nelze jednoduše říci, jaké umístění nabíjecích úseků je nejvhodnější.

Existují vize, kdy by mělo stačit pouze 10 % trati využívat k nabíjení. [49], [58], [59], [60]

### **Kontaktní rychlonabíjecí systém**

Dlouhá doba nabíjení je jedním z problémů bránící masovému nasazení elektrobusů. Pro plnohodnotné celodenní používání musí být elektrobus vybaven velkou a těžkou baterií výrazně snižující obsaditelnost vozu, se schopností se nabít v průběhu noční zastávky. Linky veřejné dopravy mají dlouhodobě definovanou a stálou ujetou vzdálenost, výškový profil a jízdní řád. Společné využití těchto informací, moderních technologií s vhodně navrženou

a vybudovanou infrastrukturou umožňují využívání elektrobusů zcela odlišným způsobem než doposud. Časté, intenzivní a krátké dobíjení dovoluje osadit elektrobusy menším zásobníkem energie, který má nižší hmotnost i rozměry. Obsaditelnost vozů nebude tolik limitována. Dojezd je v tomto případě dán především infrastrukturou. [38]

Rychlonabíjení není prováděno v depu, ale přímo v provozu, a to na vybraných zastávkách nebo obratištích. Doba stání dopravního prostředku, i v zastávce s velkým počtem cestujících, málokdy překročí 1 min. Z tohoto důvodu musí být nabíjecí výkon vysoký a dosahuje až 500 kW. Uložit tento výkon je pro současné baterie velmi obtížné a proto jsou upřednostněny ultrakapacitory. Ty jsou také součástí nabíjecího terminálu, kdy dochází k jejich postupnému nabíjení ze síťového připojení v případě nečinnosti. Následně, když k zastávce přijede elektrobus, se uložená energie přenesení do prázdného úložiště ve vozidle. Přenesená energie obvykle není dostačující na celou dráhu a rychlé („flash“) dobíjení se musí pravidelně opakovat. Na konci jednoho jízdního cyklu dojde k plnému nabití, viz další odstavec. Orientace tímto směrem je výhodnější pro nově budované dopravní systémy. Stavba nabíjecího bodu je prováděna současně s výstavou zastávkového zálivu. [38]

Druhou možností je nabíjení na obratišti s řádově polovičním výkonem. Doplňuje soustavu nabíjecích stanic umístěných na vybraných zastávkách podél trasy. Hlavním úkolem je využít několikaminutové stání vozidla na obratišti a dosáhnout plné hladiny nabití. [38]

Poměr střední hodnoty vybíjecího a nabíjecího výkonu dává informaci o době, po kterou je elektrobus nutné dobíjet. Obvyklá hodnota je 25 %, tj. 5 minut z 20 minut trvající jízdy. Výhodné je, že nabíjení probíhá v době, kdy i současná vozidla stojí – zastávky, obratiště. Z důvodu vyrovnání jízdního řádu, rezervy na nepravidelnosti a odpočinku řidiče tráví vozidla veřejné dopravy průměrně až třetinu pracovní doby stáním na konečných. [38]

Napájení nabíjecích bodů lze realizovat dvěma způsoby. Výhodnější, avšak ne všude proveditelné je napojení na současnou soustavu trakčního vedení 600 V DC pro elektrickou dráhu. Druhou alternativou je distribuční síť nízkého napětí 3 AC 400 V 50 Hz. První varianta vítězí především kvůli [38]:

- Elektrická energie je odebírána z distribuční sítě 22 kV ve velkém množství a tudíž za příznivější cenu

- Vzájemné propojení dovoluje využití přebytků rekuperované energie od ostatních vozidel elektrické trakce, které byly dosud mařeny v odporcích
- Síť je na přenášení vysokých výkonů již dimenzována.
- Využití již nainstalovaného výkonu z hlediska dimenzování dřívějších měření na provoz odporově řízených vozidel s vyšší měrnou spotřebou, v porovnání se současnými vozy vybavenými moderními metodami řízení.
- Propojka mezi nabíjecím bodem a trakčním vedením může být provedena vzdušným vedením, namísto pokládky zemních kabelů.
- Využití již postavených trakčních zařízení.

Spojení elektrobuse s nabíjecím stojanem je prováděno několika způsoby lišící se počtem pólů a mechanickým provedením.

Pro přenos energie jsou zapotřebí minimálně 2 póly. V tomto případě se přenáší stejnosměrný proud, kdy nabíječ je součástí stojanu. Díky tomu dochází k redukci hmotnosti přídatného vybavení elektrobuse. Nabíjecí zařízení lze sdíleně využívat pro více vozidel, což je efektivnější než v případě, kdy každé vozidlo disponuje svým nabíječem, jenž je používán jen po krátkou dobu. Třípólová varianta je doplněna o zemnicí spojení, ale jeho kontrola se nachází až u čtyřpólové. Existuje i pětípólová varianta pro trojfázové střídavé napájení doplněné o uzemnění a kontrolu. Dvoupólové dobíjení neklade žádné speciální nároky na současnou infrastrukturu, zvyšuje však požadavky na bezpečnost a izolaci vozidla. Opakem je čtyřpólová varianta. [61], [62]

Z hlediska mechanického provedení lze rozlišit tyčový sběrač, pantograf a boční konzoli.

### **Tyčové sběrače**

Technologie tyčových sběračů je osvědčená a spolehlivá. Několika metrový úsek trakčního vedení, podobný trolejbusovému, ale dimenzovaný na statický přenos energie, je umístěn v prostoru zastávky a obratiště. Vedení může být i vkusně zakomponované do konstrukce zastávkového přístřešku. Není tak potřeba žádných převěsů či výložníků, což zjednodušuje a zlevňuje dané řešení. Elektrobuse by měl být vybaven automatickými sběrači pro rychlé připojení bez nutnosti obsluhy. Poloha vozidla je v podélném směru omezena délkou úseku vedení a v příčném směru sběrače dovolují vychýlení až o 4 m od osy trolejového vedení. [66]



Obr. 1.8 Trolejbus s tyčovými sběrači (převzato z [63])

### Pantograf

Namísto tyčových sběračů lze pro čerpání energie z horního trakčního vedení použít pantograf. Podélná tolerance je shodná s předchozím provedením, avšak příčná je omezena šířkou jednotlivých elementů pantografu. Komunikace s nabíjecím stojanem probíhá bezdrátově a bezobslužnost podporuje i automatický pantograf přizpůsobivý aktuální výšce trolejového vedení.

Společnost Schunk namísto trolejového vedení používá čtyřvodičové spojení skrz speciální hlavu, viz Obr. 1.9. Na straně nabíjecího stojanu je stříška vybavená kontakty, která připomíná naváděcí stříšky při zdvihání tyčových sběračů. Systém je s ohledem na bezpečnost konstruován obdobně jako zásuvka, kdy nejdříve dochází ke spojení uzemnění a až posléze k silovým kontaktům. Kontaktní zařízení na straně nabíječe musí být umístěno mimo



Obr. 1.9 Nabíjecí hlava umístěná na pantografu (převzato z [61])

průjezdny profil, a to do výšky min 4,5 m nad vozovkou. Systém je do jisté míry schopen korigovat nepřesné zaparkování. Kontaktní trychtýř je nepohyblivý, ale rameno pantografu umožňuje vertikální a horizontální pohyb. Moderní vozidla veřejné dopravy jsou vybavena technologií kneeling, kdy se strana přiléhající k nástupišti sníží pro usnadnění nastupování. Z hlediska nastupování se jedná o žádoucí funkci, pantograf však musí být vybaven kompenzací pro zajištění konstantní přitlačné síly u každého kontaktu. Děje se tak až do příčného náklonu 5°.

Ve svém výrobním portfoliu nabízí standardní provedení popsané výše, kdy na střeše vozidla je umístěn pantograf s kontaktní hlavicí, která je polohovatelná. V provozu je výhodná až 1kA zatížitelnost po dobu 30 sekund. Celková hmotnost zařízení je 85 kg. Výhodné řešení pro flotilu unifikovaných vozidel a více nabíjecích míst.

Existuje však i opačné řešení, kdy na střeše vozu se nachází pouze kontakty a pohyblivý pantograf je součástí nabíjecí stanice, jak je uvedeno na obrázku 1.10. Systém podporuje stejné funkce jako předchozí, tj. krátké nabíjení vysokým proudem i dlouhodobé se sníženým výkonem, kompenzaci nepřesného zastavení i automatický chod. Pantograf je vybaven pružinou pro vytáhnutí v případě výpadku napájení, aby byl zachován průjezdny profil.



**Obr. 1.10** Invertované provedení nabíjecího pantografu (převzato z [61])

Poslední možností je podvozkové nabíjení, kdy je celé zařízení umístěné do podlahy vozu a nijak nenarušuje jeho vzhled. Jedná se o alternativu k bezdrátovému nabíjení nebo automatickému plug-in systému. [54], [61]

### **Boční konzole**

Zařízení na obrázku 1.11 od společnosti Multi-Contact se nachází na střeše elektrobuse a může být až devítipólové. Vzhledem k výšce vozidla je výhodné umístění nabíjecího boxu na střechu zastávkového přístřešku. Nedochozí k žádnému omezení prostoru v okolí zastávky a v případě vhodného zakomponování do designu přístřešku splyne s okolím. Instalace zařízení je jednoduchá a může být namontována na současné zastávky bez nutnosti velkých investic. Zařízení se skládá z flexibilního konektoru vybaveného kontakty a nabíjecího trychtýře

umístěného na střeše vozidla. Ten se stará o bezpečné navedení nabíjecího ramene do zdířky. Kompenzuje nepřesné zaparkování až do 50 cm. Spojení je dimenzováno na krátkodobé přenesení až 900 A a na více než 100 000 cyklů spojení a rozpojení. [61], [64]



**Obr. 1.11 Rychlonabíjecí kontakt vysouvateľný ze zastávky (převzato z [64])**

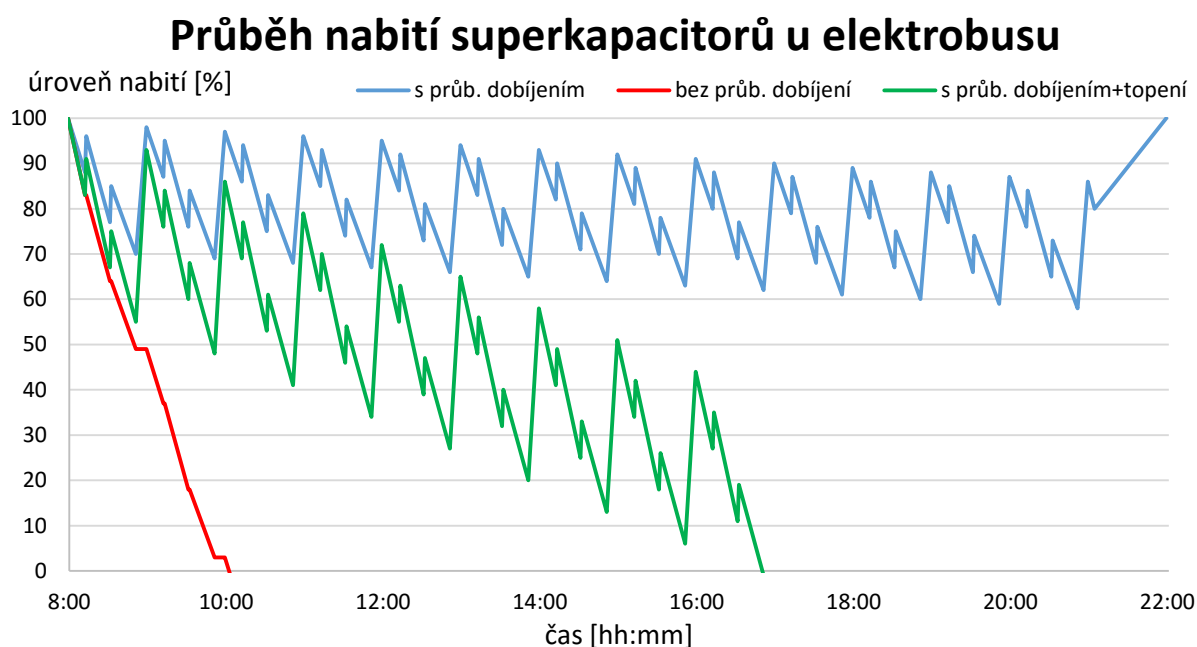
### **Jak funguje průběžné nabíjení?**

Proces nabíjení je u všech zmíněných způsobů podobný. Nejdříve je nezbytné přistavení vozidla pod nabíjecí bod a navázání bezdrátové komunikace. Řidič elektrobuse potvrdí požadavek na nabíjení a proces může začít. Pohyblivý nabíjecí pantograf se zdvihne, dojde ke kontrole propojení a přenos energie začne. Po dosažení plné kapacity dojde k rozpojení kontaktu a pantograf se vrací do výchozí polohy. Senzory zkontrolují bezpečnou polohu pantografu a umožní odjetí elektrobuse. [65]

Popsaný systém krátkého a intenzivního nabíjení je již používán několik let a to s kladnými ohlasy. Přes některá technologická omezení, doufejme, že pouze dočasná, je kladně vnímána vysoká účinnost nabíjení, jednoduchost a funkčnost. Technologie pantografů i vrchního vedení je již léty odzkoušená a prověřená. Jednoduše aplikovatelné řešení do současné veřejné dopravy tím snadnější, čím je nynější elektrická trakce a infrastruktura v daném městě rozvinutější. Přidané komponenty neúměrně nezvyšují hmotnost vozidla v porovnání s indukčním nabíjením. [65], [66]

Obrázek 1.12 nastiňuje způsob, jakým lze elektrobuse s průběžným nabíjením chápat. Zobrazuje rozdílné průběhy úrovně nabití superkapacitorů elektrobuse, z nichž jeden v průběhu jízdy absolvuje průběžné dobíjení a druhý nikoliv. Jeho jízda se skládá z okružních jízd, kdy dvakrát v průběhu jednoho kola dochází k nabíjení v zastávce po dobu 1 min a na konečné

8 minut. V příkladu neuvažují půlhodinovou pracovní pauzu. Řidič byl po dobu pauzy nahrazen zaskakujícím řidičem. Dále jsem do příkladu zanesl neúplné nabití na obratišti, tj. nabíjecí výkon není dostatečný, nebo doba stání krátká. Následkem je postupný pokles střední hodnoty nabití. Výsledkem je, že i po téměř celodenním provozu se úroveň nabití pohybuje nad 50 % u průběžně nabíjeného vozu. Je-li topení nebo klimatizace v provozu, vůz v modelové situaci ujede pouze přibližně 2/3 denní porce kilometrů. Jedním z řešení je osazení vozu superkapacitorem o větší kapacitě (v daném případě minimálně dvojnásobným). Docházelo by stále ke stejně velkým odběrům energie, ale přes noc zcela nabitý superkapacitor by měl větší rezervu energie. Druhou možností je častější, intenzivnější nebo delší nabíjení. Elektrobus bez průběžného nabíjení by teoreticky dokončil dva celé jízdny cykly, ale na další by mu již nezbyla energie.



Obr. 1.12 Průběh nabití superkapacitorů u elektrobusu [38]

## 1.6.2 Palivový článek

Samotný palivový článek se pro pohon elektrobusu nehodí. Jedná se o zařízení s nevelkým výkonem, pro které je výhodné běžet dlouhodobě na plný výkon a přebytečnou energii skladovat k dalšímu použití. Ta je ukládána a později použita pro špičkové odběry. Hovoří se tedy spíše o hybridním vozidle s dvěma druhy pohonné energie. Detailněji bude probráno v kapitole Hybridy.



### 1.6.3 Diesel zdroj

Používání spojení diesellového agregátu s generátorem elektrické energie bez dalšího energetického úložiště je velmi sporadické. Vyrobená elektřina je přiváděna do napěťového meziobvodu trakčního měniče a musí být okamžitě spotřebována. Přebytky spálené v odporu snižují efektivitu pohonu. Výkon agregátu musí být řízen dle aktuálního požadavku, nemůže tak být provozován v ideálních otáčkách a podmínkách. Opět dochází ke snížení provozní efektivity. Dané spojení se používá velmi omezeně např. jako „range extender“ v trolejbusu Škoda 21 Tr ACI. Širšího využití dosahuje s akumulátorem nebo superkapacitorem, čímž se opět řadí spíše mezi hybridy. [46]

## 1.7 Hybridy

Hybridem lze označit vozidlo, které ke svému pohonu používá nejméně 2 zdroje energie. Nejčastěji se lze setkat se spojením spalovacího motoru a elektromotoru, který je napájen z některého druhu zásobníků elektrické energie. Spalovací motor je hlučný, složitý a relativně efektivní jen v jistém spektru otáček. Naproti tomu jeho palivo má několikanásobně vyšší energetickou hustotu než baterie. Doba natankování je v porovnání s nabíjením akumulátorů doslova nicotná. Elektromotor je používán pro eliminaci záporných vlastností spalovacího motoru. Je tichý, jednoduchý, při brzdění generuje elektrický proud a vrcholný výkon i točivý moment dodává v širokém spektru otáček. Má vysokou účinnost. Kouzlo hybridu spočívá ve správné kombinaci 2 a více pohonných systémů za účelem vyzdvihnutí pozitiv všech pohonů a zároveň potlačení jejich negativ. Hybridní systémy jsou vysoce efektivní v městském provozu. Při dálniční jízdě ustálenou rychlostí jsou hybridní komponenty spíše přítěží a nijak neslouží ke snížení spotřeby a vypouštěných emisí. Jelikož spalovací motor neběží neustále, je nutné spotřebiče (posilovače, klimatizaci), které jsou závislé na běhu motoru pohánět elektromotorem. Otevírá se tím možnost přizpůsobovat jejich výkon aktuálním požadavkům, nezávisle na otáčkách motoru a docílit tím nižší spotřeby energie. [1], [3], [36]

### 1.7.1 Sériový hybrid

Komponenty hybridního řetězce jsou řazeny sériově za sebou dle schématu na obrázku 1.13. Spalovací motor není nijak mechanicky spojen s poháněnou nápravou. Ta je poháněna jen elektromotorem.

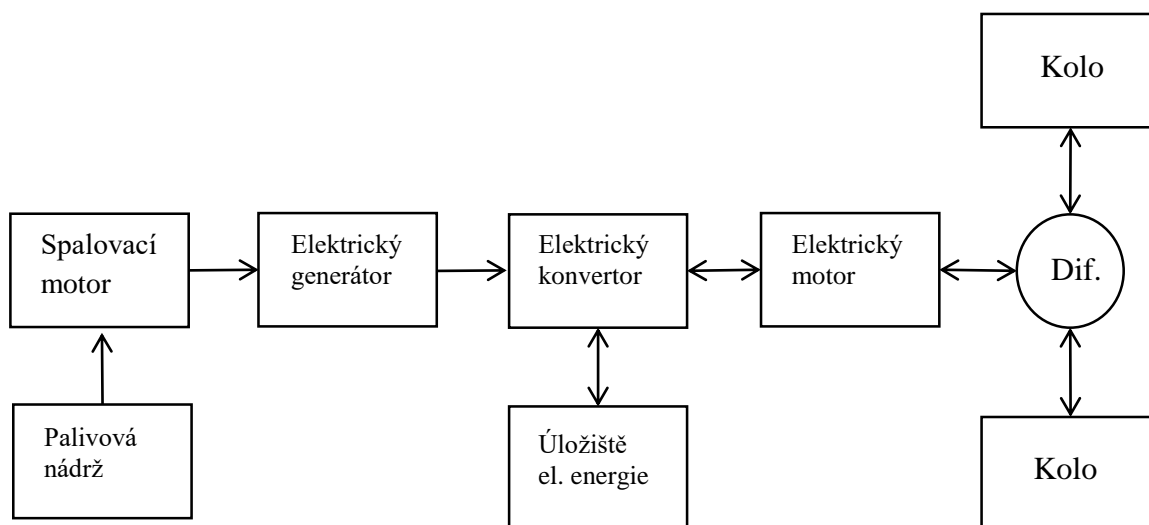
Zdrojem energie je akumulátor, který může být nabíjen až třemi způsoby:

- Rekuperací
- Plug-in
- Spalovací motor spojený s generátorem el. energie (eventuálně i palivový článek)

Spalovací motor je provozován v neefektivnějších otáčkách. Vyrobená elektrická energie se ukládá v baterii nebo slouží k pohonu vozidla v případech, kdy uskladněná energie je nedostatečná. Při brzdění se elektromotor přemění v generátor a transformuje pohybovou energii do elektrické a ukládá do baterií.

Vzhledem k neexistenci mechanické vazby mezi pohony je možné je flexibilně umístit v rámci celého vozu. Elektromotory lze umístit do nábojů kol. Vozidlo pak nepotřebuje převodovku, diferenciály ani hnací hřídele, což umožňuje stavět nízkopodlažní vozidla. Pohonný řetězec je jednoduchý, avšak skládá se ze tří hlavních komponent (spalovací motor, generátor, elektrický motor), a vhodný především do provozů s častými zastaveními. Při jízdě čistě na elektrický pohon neprodukuje žádný hluk.

Elektrický motor musí být navržen s ohledem na časté rozjezdy a jízdu v kopcích, přestože po většinu času nebude takto zatěžován. V podstatě celý řetězec, včetně baterií, musí být dimenzován i na delší cesty, aby nedocházelo k situacím, kdy prázdná baterie nedovoluje již další jízdu a všechnu energii dodává spalovací motor skrz generátor. Několikanásobná přeměna energie snižuje účinnost celého řetězce. [1], [3], [36]



Obr. 1.13 Blokové schéma pohonného řetězce sériového hybridu [36]

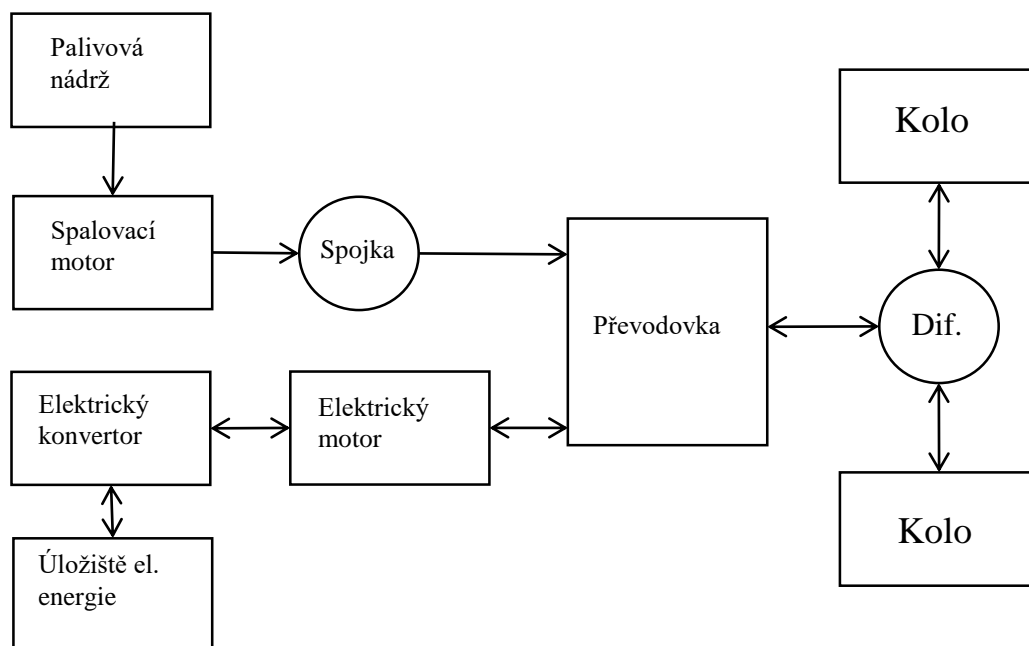
### 1.7.2 Paralelní hybrid

V tomto typu hybridu již existuje mechanická vazba spalovacího motoru na poháněnou nápravu. Je-li vůz poháněn pouze jím, nedochází k žádným nadbytečným přeměnám energie. Pohonný řetězec se v tu chvíli neliší od klasického vozidla. Elektromotor je obvykle umístěn v převodovce, díky čemuž může působit také jako startér, alternátor i generátor při rekuperaci. Motory běží nezávisle na sobě. Jedná-li se o tzv. „full hybrid“, je umožněn pouze elektrický pohon. V případě požadavku na dynamickou jízdu dochází ke spojení obou motorů a dodávce velkého výkonu. Spolupráci obou motorů obstarává řídicí jednotka v závislosti na zvoleném jízdním režimu. Při dlouhodobé ustálené jízdě je elektromotor vypnutý a nijak nenarušuje přenos výkonu od spalovacího motoru. Právě proto se hodí i pro dálkové jízdy ustálenou rychlostí. Schéma pohonného řetězce je na obrázku 1.14.

Zjednodušený pohonný řetězec neobsahuje generátor, ale převodovku. Vzhledem k možnosti současného pohonu vozu oběma motory, mohou být dimenzovány na nižší výkony v případě, že kapacita baterií pokryje základní jízdní dosah. Pokud by byly baterie prázdné, vozidlu by k pohonu sloužil pouze spalovací motor a dynamika by byla snížena. V případě delších ujetých vzdáleností, kdy by byla hmotnost a rozměry baterií nepřiměřené, je spalovací motor dimenzován na maximální požadovaný výkon a elektromotor na nižší. Pozitivně se to projevuje na hmotnosti pohonného řetězce a jeho ceně.

Zvýšená složitost řízení je dána kombinací dvou druhů pohonů. Tomu dále odpovídá i příslušnost vhodné převodovky se zabudovaným elektromotorem nebo schopné přenášet výkon z dvou zdrojů.

Každá z uvedených koncepcí má svá pozitiva i negativa a obě se v reálném světě vyskytují. Přesto existuje i smíšený hybrid, jenž obsahuje dělič výkonu, který řídí vhodný poměr mezi sériovým a paralelním hybridem v každém okamžiku. [1], [3], [36]



Obr. 1.14 Blokové schéma pohonného řetězce paralelního hybridu [36]

### 1.7.3 Palivové články

Spalovací motor v sériovém hybridu může být nahrazen palivovým článkem. Takto vybavený vůz definici hybridu i nadále splňuje, neboť k pohonu slouží energie uložená ve vodíku a dále elektrická energie uložená v akumulátorech. Ty mohou být doplněny, nebo zcela nahrazeny superkapacitory. Energetické úložiště je zcela nezbytné a má několik úkolů:

- Dodávat energii při přetížení palivového článku
- Ukládat energii při rekuperativním brzdění
- Skladovat aktuálně přebytečnou energii z palivového článku

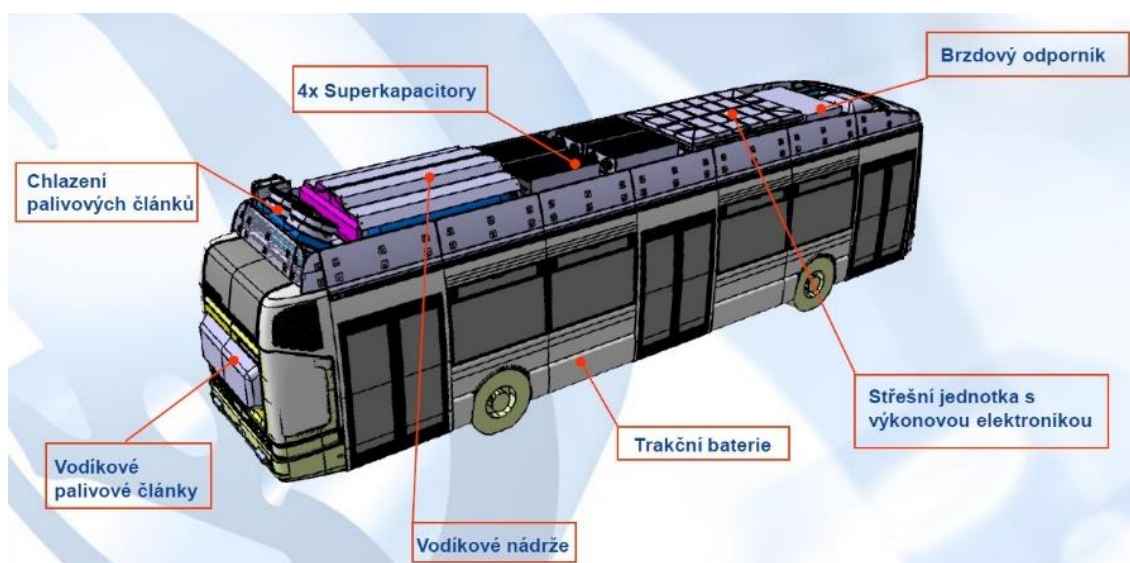
Palivový článek funguje coby „range extender.“ Vůz je poháněn pouze elektromotorem a energii čerpá přímo z palivového článku nebo energetického úložiště. Takto koncipovaný elektrobus pomáhala vyrobit společnost Škoda Electric od roku 2005 pro Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. Vzhledem k osazené technologii dostal jméno TriHyBus. Jedná se o demonstrační prototyp. Naměřené hodnoty nejsou zcela porovnatelné s běžným provozem. V budoucnu se uvažuje jej nasadit do veřejné dopravy v Neratovicích.

Hybridní pohonný řetězec byl zabudován do vozu Irisbus Citelis klasické délky 12 m. Jedná se o trojhybridní pohon, jelikož je vůz vybaven palivovým článkem, akumulátorem

a superkapacitorem. Na obrázku 1.15 jsou vidět hlavní komponenty hybridu. Motor je asynchronní s výkonem 120 kW a není doplněn o převodovku. Výkon palivového článku je 50 kW a plynný vodík je uložen v nádržích o celkovém objemu 820 l. Má malou dynamiku a svým výkonem pokrývá základní spotřebu. Přebytečná energie se ukládá. Dalším zdrojem elektrické energie je Li-ion akumulátor s kapacitou 26 kWh schopný dodat výkon až 120 kW. Nejvýkonnějším zdrojem je superkapacitor dimenzovaný až na 300 kW při brzdění (200 kW při rozjezdu). Má však kapacitu jen 1 kWh. Není to však překážkou, neboť slouží především pro pokrytí krátkodobých špiček při rozjezdech a brzdění. Tam, kde už jeho kapacita nestačí, jej nahrazuje akumulátor. Stává se tak např. v dlouhých stoupáních. K jeho využívání nedochází nijak často a tak je jeho životnost odhadována na více než 12 let, což je plánovaná životnost autobusu.

Trojhybridní pohon je velmi výhodný, neboť v porovnání s hybridním vozem vybaveným pouze palivovým článkem a akumulátorem, lze palivový článek dimenzovat až o 65 % méně. Je to dáno především charakterem městského provozu s četnými krátkodobými špičkami, které pokrývá právě superkapacitor. Ten je vzhledem k životnosti 1 milion cyklů a jeho velké dynamice využíván nejvíce. Pro případy, kdy jsou obě úložiště plná, je vůz vybaven elektrickým odporníkem pro maření rekuperované energie.

Dojezd TriHyBusu je až 300 km. Průměrná spotřeba je 8 kg vodíku na 100 km. Pro lepší pochopení efektivity hybridu se jedná o ekvivalent k 20 litrům motorové nafty. Naplnění nádrží zabere 10 min. [1], [3], [36], [37], [67]



Obr. 1.15 Hybridní autobus TriHyBus (převzato z [35])

## 2 Současná veřejná doprava města Plzně

System veřejné dopravy na území města Plzně a jeho blízkém okolí je zajišťován Integrovanou dopravou Plzeňska. Do této veřejné služby jsou zainteresováni vybraní dopravci, přičemž největším a nejvýznamnějším článkem je společnost Plzeňské městské dopravní podniky, a.s. Ta zajišťuje dopravu elektrickými dopravními prostředky na území města Plzně, tj. tramvajemi a trolejbusy. Pro doplnění elektrického systému jsou používány autobusy. [68]

### 2.1 Tramvaje

Nejstarší a nejdůležitější trakcí je tramvajová. V Plzni je už od roku 1899 a dnes měří 24 km. Je rozdělena do 3 linek, které obsluhují nejlidnatější části a souběžně střed města. Celkem je v majetku společnosti 122 tramvají. Jejich podíl na celkovém dopravním výkonu je 37 %. Vzhledem k četnosti a vytíženosti spojů je na celé délce linek nataženo vrchní vedení pro napájení tramvají. V současnosti nejsou provozovány žádné bateriové tramvaje. Vozy nejsou ani vybaveny superkapacitory pro ukládání rekuperované energie. Ta je v lepším případě předána zpět do sítě nebo v horším mařena v brzdových odporcích. Výjimku tvoří dvojice napájecích úseků č. 028 Přemyslova a č. 052 Sokolovna, jež byla osazena stanicí EPOS viz další kapitola a obrázek 2.1. [46], [68], [69]

#### 2.1.1 Energetická posilovací stanice - EPOS

Úsek Sokolovna používá trolejbusová linka č. 12 a je napájen z měnírny Zátíší. K napájecímu bodu vede podzemní pár kabelu AYKCY 500 mm<sup>2</sup> o délce 1,5 km. Při větším zatížení daného úseku docházelo vzhledem k délce úseku 1,22 km a délce přívodního kabelu k poklesům napětí a Joulovým ztrátám na vedení a přívodním kabelu. Hledalo se tudíž řešení jak danou situaci vyřešit. Využila se blízká přítomnost tramvajového úseku č. 028 Přemyslova, který je napájen z měnírny Hydro čtveřicí paralelních kabelů AYCKY 500 mm<sup>2</sup> délky 1770m, a na vhodné místo byla postavena stanice EPOS. Jejím primárním úkolem je přelévání energie mezi zmíněným úseky. Převažuje směr z lépe napájeného tramvajového do trolejbusového a to až 350 A. Druhým úkolem bylo efektivnější nakládání s rekuperovanou energií vzniklou při brzdění. Dříve byla převážně mařena v odporcích, jelikož pouze sporadicky docházelo k okamžitému využití jiným vozidlem na témže úseku. Stanice EPOS je vybavena superkapacitorovou baterií, jež danou energii ukládá a následně je schopna podpořit napájený úsek proudem 50 A po dobu minimálně 15 vteřin.

Instalace zařízení proběhla v roce 2009. Provozem byla zjištěna účinnost vyšší než 92 %. Zvlnění a pokles napětí byl eliminován. Vzniklé úspory jsou dvojího charakteru. Hlavní úspory jsou zapříčiněny přesunem energie z tramvajového úseku do trolejbusového díky snížení ztrát na přívodním vedení. Jedná se zhruba o 75 % úspor. Doplněk do 100 % připadá na superkapacitorovou baterii a její efektivní nakládání s rekuperovanou energií. V roce 2010 byla průměrná roční úspora vyčíslena na 117 895 kWh. Přihlédnou-li k ceně elektřiny, získané od společnosti PMDP, a.s. v roce 2012, jež činila 3,3 Kč/kWh, je návratnost investice do daného zařízení téměř 18 let. Výpočet byl orientační pro lepší pochopení dané investice. [46], [60]



Obr. 2.1 Umístění stanice EPOS (převzato z [60])

## 2.2 Autobusy

Druhou nejvýznamnější trakcí jsou autobusy. Na dopravním výkonu se podílejí 35 %. Plzeňské cestující vozí o 30 let méně než tramvaje, avšak délka všech 35 linek je 471 km. Dopravní podniky disponují 109 autobusy, z nichž pouze 5 není nízkopodlažních. Autobusová doprava je doplňkem tramvajové sítě. Je primárně vedena mezi tramvajovými linkami a vzhledem k minimálním infrastrukturním nákladům je hlavním dopravním prostředkem do vzdálenějších míst města Plzně i blízkých vesnic. Většina vozového parku je obsazena klasickými dieselovými autobusy značek Irisbus, Renault, Solaris a SOR. Existují však 2 výjimky v zájmu snižování emisí, spotřeby a směřování k elektromobilitě. První je vůz Škoda H12 a druhou Škoda Perun 26BB HP. [60], [69], [70]

### 2.2.1 Škoda H12

Prvním autobusem využívajícím i elektřinu ke svému pohonu byl vůz Škoda H12, který byl v dubnu roku 2013 převzat od společnosti Škoda Electric, a. s. a zařazen do pravidelného

provozu. Základem je karoserie běžného autobusu Solaris Urbino 12. Od standardně červeno-bíle zbarvených autobusů se liší na první pohled a to celovozovým polepem se vzorem trávy. Zelená barva dodává vozu punc ekologického dopravního prostředku. Zabarvení vozu je vidět na obrázku 2.2 a obrázek 2.3 ukazuje komponenty hybridního řetězce.

Škoda H12 je sériový hybrid stejně jako TriHyBus, místo palivového článku však využívá konvenční spalovací motor o zdvihovém objemu 6700 cm<sup>3</sup> a výkonu 184 kW. K výstupní hřídeli je připojen třífázový alternátor značky Kirsch, jehož elektrický výkon je 188 kW a generuje napětí až 750 V. Pulzní měnič střídavé napětí usměrní pro využití k pohonu nebo uložení do jednoho z úložišť. Hlavním je Li-ion akumulátor o kapacitě 69 Ah (23,8 kWh) a nominálním napětí 345,6 V. Zkušební vůz obsahuje i superkapacitory s kapacitou 21 F při napětí 375 V. V zásadě se také jedná o trojhybridní systém. Při plném využívání rozsahu napětí superkapacitoru by jeho kapacita byla (2.1):

$$W_c = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot 21 \cdot 375^2 \doteq 1,5 \text{ kWh} \quad (2.1)$$

K jejich používání dochází zejména při velkých změnách dynamiky vozu, jakožto rozjezdy a brzdění. Toto úložiště je vhodnější pro pokrytí velkých odběrových špiček a následně ukládání velkého množství energie po krátkou dobu v případě rekuperačního brzdění. Trakční baterie umožňuje bezemisní a bezhlučné ujetí až 10 kilometrů. Pro případy kdy je baterie prázdná nebo to vyžadují jízdní podmínky, naskočí diesellový motor spojený s alternátorem a zásobuje pohonný řetězec elektrickou energií. Jeho výkon dovoluje plnohodnotnou jízdu při prázdných bateriích i superkapacitorech. Vůz je dále vybaven interní nabíječkou. Postačí tedy pouhé připojení k rozvodné síti 3x400 V AC 50 Hz. Výhradní pohon vozu zajišťuje asynchronní elektromotor s nominálním výkonem 130 kW. Z důvodu bezpečnosti je vůz vybaven i brzdovým odporníkem pro maření nadbytečné energie.

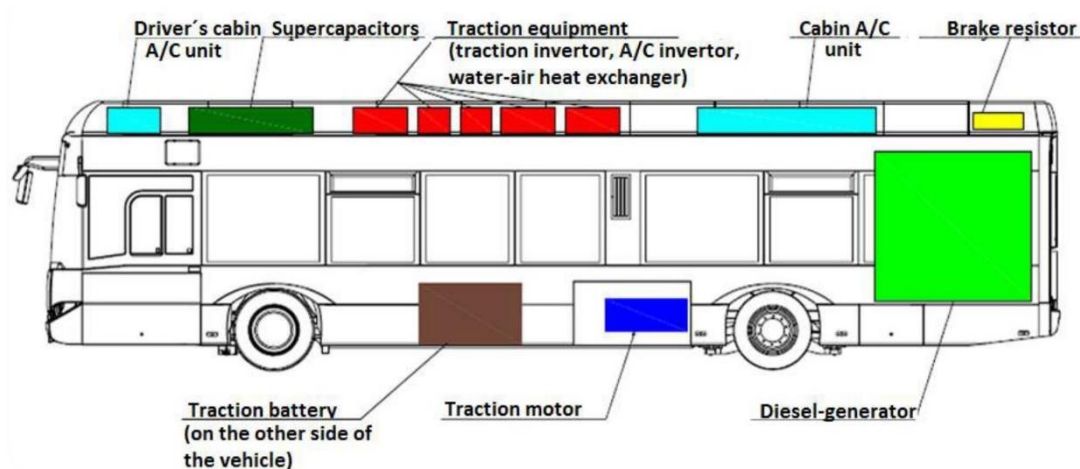
Cena takto vybaveného vozu by v případě sériové výroby byla asi o 30 % vyšší než standardního autobusu. Je to dáno zejména složitostí hybridního systému a komplexností řídicího systému. Řidiči hybrid chválí. Oceňují především jednoduchý systém ovládání a tichý provoz. Úspora paliva je závislá na způsobu použití. Nejvyšší pokles spotřeby byl naměřen ve standardizovaném cyklu SORT 1 (městský) a 3 (příměstský) a to více než 29 %. V kombinovaném cyklu SORT 2 (kombinovaný) úspora dosahovala stále znatelných 25 %.



Vozidlo se při svém provozu osvědčilo a i nadále je ve službách Plzeňských dopravních podniků. [67], [70], [71], [72], [73]



Obr. 2.2 Škoda H12 (převzato z [70])



Obr. 2.3 Škoda H12 a její hybridní komponenty (převzato z [67])

## 2.2.2 Škoda Perun 26BB HP

Dalším vývojovým stupněm předchozího hybridu je elektrobus. Celkem 2 byly pronajaty dopravnímu podniku, aby ukázaly, zda jsou rovnocenným partnerem současným dopravním prostředkům. Město Plzeň je totiž součástí mezinárodního projektu ZeEUS. Plzeňské městské dopravní podniky, Škoda Electric, Plzeňská teplárenská a Západočeská univerzita spolu uzavřely partnerství a provádí pilotní testování koncepce rychlého nabíjení elektrobusů

na obratištích. Ostatních 9 měst testuje odlišné koncepce elektrobusů. Získaná data pomůžou lepšímu pochopení a rozvoji elektromobility.



Obr. 2.4 Škoda Perun 26BB HP při rychlonabíjení v obratišti



Obr. 2.5 Nabíjecí rameno a silové kontakty

První z vozů byl předán v březnu 2015 a nasazen na zkušební provoz. K nabíjení docházelo v místě jeho zrodu, a to v areálu společnosti Škoda Electric. Až 20.4. 2015 byla úspěšně dokončena instalace nabíjecího ramene na točně autobusů Sídliště Košutka. Od té doby nic nebránilo nasadit vůz do ostrého provozu právě s nabíjecí pauzou na zmíněné konečné. Stalo

se tak 29.5. téhož roku, kdy už vyjely oba dva vozy a obsluhovaly linku č. 33 a následně i č. 27. Trasa byla vybrána záměrně, aby se na ní nacházelo stoupání. Vozy jsou na něj dimenzované a vyjedou jej bez obtíží. V průměru za den ujedou 200 km. Elektrovýzbroj je osazena do karoserie Solaris Urbino 12. Vozy jsou od ostatních autobusů jednoduše rozeznatelné, jelikož jeden z nich je polepen zeleno-bílými polepy s nápisy upozorňujícími na bateriový pohon. Jeho kolega na sebe také strhává pozornost nápisy a maskováním, ovšem v tomto případě provedeným do kombinace modré a bílé.

Škoda Perun 26BB HP je poháněna asynchronním motorem o výkonu 160 kW. Energetické úložiště zastává lithiový akumulátor s kapacitou 78 kWh zajišťující dojezd až 30 km. Zkratka HP, neboli High Power je velmi důležitá. Vozy jsou totiž koncipované pro rychlé dobíjení v průběhu svého pracovního dne a to v jednom z obratišť na své trase. To je zajišťováno plně automatizovaným dobíjecím ramenem schopným svým výkonem 600 kW vůz nabít za 6 až 8 minut. Kontakty pro připojení nabíječe se nacházejí na střeše elektrobuse. Řidič dostává zpětnou vazbu o poloze vozu vůči ramenu nabíječe skrz displej zobrazující přímý přenos z kamery umístěné na střeše. Rychlonabíjení není zcela šetrné k akumulátorům a způsobuje velké zahřívání. Baterii je tak nutné chladit a tím se zvyšuje spotřeba energie. Jedná se o první vozidla v plzeňské dopravě, která disponují klimatizací pro salón cestujících. Jízda je velmi tichá a plynulá. Je vcelku stejná jako jízda s trolejbusem, jen s tím rozdílem, že není třeba brát ohled na křížení, úsekové děliče a vzdálenost od trolejí. Celé to však vyvažuje omezeným dojezdem, který však v případě vhodně navržených jízd a dostatečné infrastruktury pracovní nasazení vozu nijak nesnižuje. V podmínkách linky č. 27 je průměrná spotřeba 2,4 kWh/km. Tato hodnota je v porovnání s naměřenou spotřebou v mé bakalářské práci [72] u trolejbusu Škoda 21Tr (1,3 kWh/km) téměř dvojnásobná. V obou případech se však jedná o rozdílná vozidla provozovaná na jiných linkách, s jinými řidiči a při různém počasí a okolní teplotě. Dále se jedná o pilotní projekt, kdy ještě není zcela detailně známa spotřeba jednotlivých komponent a řídicích systémů bateriobuse. Délka trasy z Košutky do středu města a zpět k rychlonabíječe je 11 km. Vzhledem k průměrné spotřebě tak dochází k pouze zhruba třetinovému využívání kapacity baterie. Velká rezerva je vhodná pro řešení nenadálé situace či možnému nasazení na jinou trasu. V krajním případě by bateriobus byl schopný svou trasu objet 2x i bez nabíjení. V letním provozu, kdy je topení vypnuté a spotřeba tudíž nižší, je možné, za účelem nižšího zahřívání, nabíjet sníženým proudem, např. 400 A ( $P = U \cdot I = 600 \cdot 400 = 240 \text{ kW}$ ). V období vyšší spotřeby se nastaví nabíjecí proud 800 A nebo až jmenovitých 1000 A. [60], [68], [70], [72], [74], [75]

## 2.3 Trolejbusy

Třetí, poslední, ale určitě ne nedůležitou trakcí je ta trolejbusová. Z počátku v roce 1941 měla pouze jednu linku, tehdy označovanou ještě písmenem A. Dnes jsou linky značeny dvěma číslicemi, kdy ta první je jednička. Linek je celkem 9. Vozový park čítá 87 trolejbusů, z nichž 72 je nízkopodlažních. Trolejbusové linky dnes čítají 86 km. Horní vedení je napájeno šesti měnírnami z celkového počtu 8. Plzeňské trolejbusy jsou provozovány jako závislé. Přesto jsou již nyní schopny i nezávislého provozu za účelem prodloužení stávajících linek, provizorních objezdů, provozování i při výpadku napájení či vyřešení jiné nenadálé situace. Z dat [60], [76], [70] je zřejmé, že lehce nadpoloviční množství všech vozů je vybaveno dieselaagregátem. Jedná se především o novější vozy, ale i mezi nimi se najdou výjimky, které ho nemají. Je to dáno především nižší nákupní cenou trolejbusu, znatelně nižší hmotností, vyšší obsaditelností u karoserií Solaris danou chybějící motorovou věží a dále jednodušším servisem.

V tabulce 2-I je seznam trolejbusových vozů současně provozovaných spolu s rokem výroby a dále počtem, kolik vozů dané typové řady je osazeno pomocným dieselaagregátem.

**Tab. 2-I Seznam trolejbusů v plzeňské veřejné dopravě [60], [70], [76]**

Typ trolejbusu	Rok výroby	Celkový počet kusů	Počet vozů vybavených pomocným dieselaagregátem
Škoda 14Tr	1989-91	9	0
Škoda 21Tr	2001-04	18	18
Škoda 24Tr	2004-09	23	16
Škoda 25Tr	2009	5	5
Škoda 26Tr	2011-15	16	2
Škoda 27Tr	2010-12	16	5
<b>suma</b>		<b>87</b>	<b>46</b>

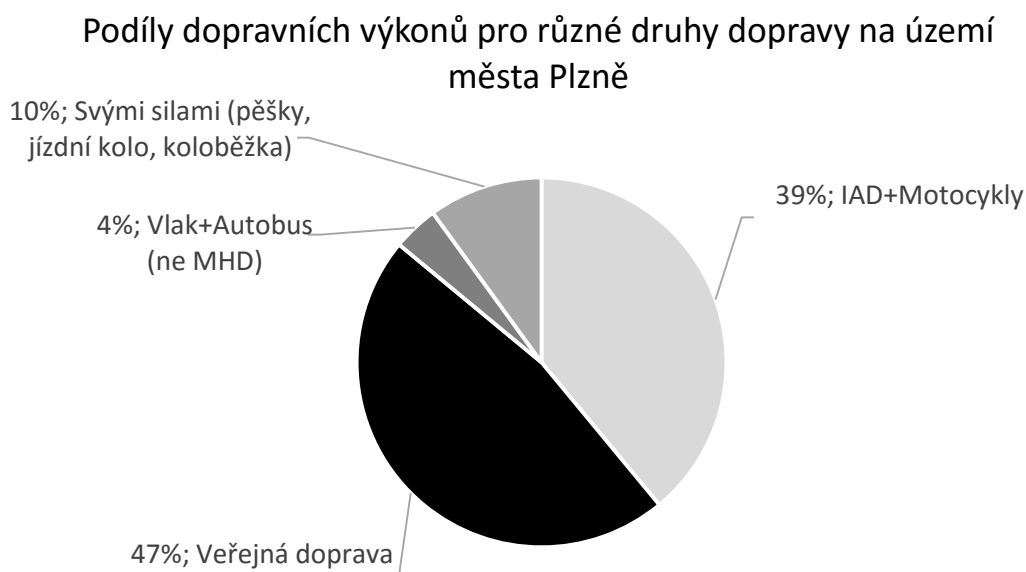
Výše zmíněné vozy mohou pružněji reagovat na dopravní situaci, než jejich „kolegové“ zcela závislí na trolejovém vedení. Při rekonstrukcích současných tratí nemusejí být zcela nahrazovány autobusy, nýbrž překonávají daný úsek se zapojením dieselaagregátu. Jejich praktický přínos je znát především na lince č. 12 a 13, kde je pomocný pohon využit pro umožnění jízdy i mimo trolejové vedení a tím obsluhu nezasítovaných lokací. Např. většina vozů na lince č. 12 končí v obratišti Božkov, několik spojů však pokračuje na pomocný pohon do přilehlé obce Letkov. Cesta je v jednom směru dlouhá více než 4 km a při cestě tam musí vůz překonat celkové převýšení přes 110 m. V opačném směru stejnou výšku sjezdí. Cestu proto zvládnou pouze vozy Škoda 24Tr a další novější typy osazené agregátem, umožňujícím víc než jen nouzovou jízdu.

Podobná situace nastává u další linky obsluhující plzeňskou čtvrť Černice. Zdejší nevelké obratiště slouží pouze pro některé vozy, přičemž zbylá část vozů pokračuje až do 2 km vzdálené nákupní zóny Olympia Plzeň. Cesta je rovinatá bez výraznějšího stoupání a klesání. Na víkendový provoz na této lince musí být nasazeny pouze vozy vybavené pomocným agregátem, neboť mezi 8 a 18 hod všechny spoje jezdí i mimo trolejové vedení až do nákupního centra.

Ve zmíněných případech je využíváno trolejbusů vybavených „range extenderem“ za účelem rozšíření stávajících linek bez vysokých nákladů na nutnou infrastrukturu. Vyplatí se především při občasném využívání. V opačném případě je ke zvážení zavedení horního trakčního vedení. [60], [69], [70], [76], [77]

### 3 Rozvoj elektromobility

Veřejná doprava je službou pro širokou veřejnost. Používají ji všechny věkové skupiny, muži, ženy, děti i hendikepovaní. Z průzkumu mobility v Plzeňské aglomeraci [78], provedeného v roce 2014, vyplývá, že 47 % dopravní poptávky na území města Plzně pokrývá veřejná doprava (Obr. 3.1). Toto číslo je vysoké a potěšující. Bohužel i tak jsou dlouhé fronty automobilů k vidění každý den v plzeňských ulicích, stejně jako přeplněná parkoviště. Hluk a znečištění plynoucí z IAD netřeba zmiňovat. Vyšší podíl veřejné dopravy, častější využívání jízdního kola, rozšíření pěší chůze nebo minimálně odstínění silniční dopravy mimo obytné části a centrum města, to jsou jen některé cíle, které si klade za úkol docílit nový strategický plán. Pracuje se na něm od dubna 2014 a jsou do něj zapojeny útvary, jako jsou Plzeňské městské dopravní podniky, a.s., Správa veřejného statku města Plzně, p.o., Útvar koncepce a rozvoje města Plzně, p.o. a Útvar koordinace evropských projektů města Plzně, p.o. Nazývá se **Plán udržitelné mobility Plzně** a jednotlivé kroky pro splnění cílů by měly být podnikány mezi lety 2016 až 2025. [78]



**Obr. 3.1 Podíly dopravních výkonů u různých typů dopravy na území města Plzně [78]**

Bez dopravy si dnešní svět snad nelze ani představit. Benefity přináší každému jednotlivci – doručení balíčku do druhého dne, dojíždění do zaměstnání do jiného města, individuální dovolená, zvýšený komfort atd. Automobilová, nákladní, letecká či lodní doprava je dnes z velké převahy závislá na ropě a jejích produktech. Je tomu z mnoha praktických důvodů. Bohužel však zásoba ropy není nekonečná. Doba, kdy se individuální automobilová doprava zbaví své závislosti na černém zlatu, ještě nenastala a v blízké době v nějakém velkém měřítku

ani tento krok pravděpodobně nenastane. Jiný scénář však může v brzké době potkat veřejnou dopravu provozovanou na území měst. Její evoluce zdá se být snazší především kvůli:

- Dílčí změna znamená velký posun vzhledem k jízdám výkonům
- Vysoká obsaditelnost (nižší počet vozů na stejný počet pasažérů jako v IAD)
- Pravidelné trasy – lepší plánovatelnost, nižší nároky na infrastrukturu
- Nižší podíl emisí na osobu a na kilometr

Problémy, které trápí veřejnou dopravu, především však autobusovou, jsou hlučnost a vypouštění emise. Dále pak náklady na provoz související s dříve rostoucí cenou ropy a v současné době s její vysokou volatilitou. Je tak třeba najít vhodný způsob náhrady současných autobusů. [69]

Město Plzeň a společnost, v ní provozující veřejnou dopravu, Plzeňské městské dopravní podniky, kladly v minulosti velký důraz na provozování elektrických trakcí. Tato myšlenka přetrvávala do dnešních dní a výsledkem je 65% podíl elektřinou poháněných prostředků veřejné dopravy. V centru, obsluhovaném převážně tramvajemi, trolejbusy, elektrobusy a pouze dodatečně autobusy, tento podíl roste až na 84 %. Tento fakt je umožněn především vhodnou infrastrukturou, čítající 8 měníren, non-stop fungující dispečink, rozsáhlou sít' trolejového vedení, která je v Plzni neustále vylepšována a rozvíjena. Vyšší fixní náklady, plynoucí ze stavby a údržby těchto zařízení, dovolují provozovat ekologickou a tichou dopravu s nižšími provozními náklady, navzdory vyšší pořizovací ceně elektrických dopravních prostředků. Složení vozového parku výrazně ovlivňuje přítomnost společnosti Škoda, výrobce dopravních prostředků poháněných elektřinou, jež nově obstarává i část údržby vozového parku. [69]

### 3.1 Cena energie

Společnost PMDP, a.s. je velkoodběratelem elektrické energie i motorové nafty. Vzhledem k tomu dosahuje na nižší ceny než maloodběratelé. V případě elektřiny se jedná o přibližně 2,5 Kč/kWh (cena bez DPH). Jeden litr nafty stojí méně než 20 Kč (cena bez DPH). Je to dáno předkupením na energetické burze na jistý časový horizont. [60]

Navyšování podílu elektrické dopravy by dále rozvíjelo sít' veřejné dopravy města Plzně směrem k ekologické dopravě. Ta je ohleduplnější k životnímu prostředí, neboť efektivněji nakládá s dostupnou energií. Cena elektřiny, jakožto komodity, je v současné době velmi

příznivá. Rozšíření elektrického provozu je možné ve všech třech současných trakcích. Proberme je nyní podrobněji. [69]

### 3.2 Tramvaje

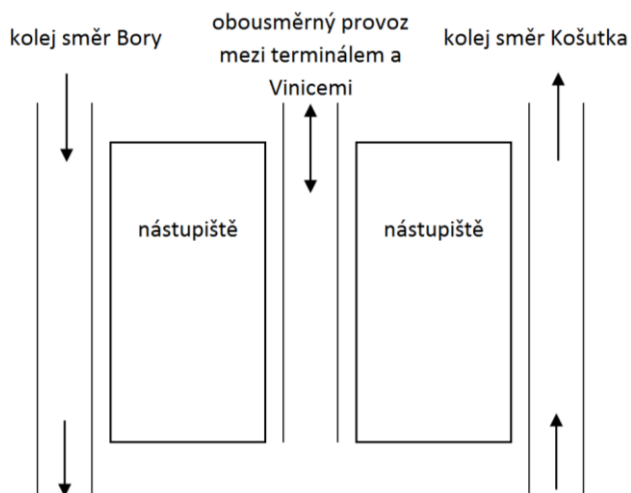
Současný stav tramvajové dopravy byl popsán výše, konkrétně v kapitole 2.1. Rozvoj tohoto druhu dopravy je limitován především velikostí vstupních nákladů vynaložených pro vybudování potřebné infrastruktury. Ta čítá zejména tramvajový pás, sloupy pro převěsy či výložníky, napájecí body, trolejové vedení, měničnu, výhybky, obratiště a další. Průměrné náklady přesahují 100 mil. Kč/km a proto se tento druh dopravy hodí především v místech s velmi hustou dopravou. K tomuto účelu je také v Plzni používána, což dokládá Příloha B, zobrazující průměrný počet přepravených cestujících na všech třech tramvajových linkách. [79] Tramvaje obsluhují velká plzeňská sídliště a městské čtvrti, přičemž mezi cestující patří místní obyvatelé i lidé tam pracující. Z velkých sídlišť není tramvajová doprava zavedena do východní části (Doubravka), která je převážně obsluhována trolejbusy. Linka č. 16 by, vzhledem ke svému vytížení, potencionálně mohla být nahrazena tramvajovou. Tamní prostorové poměry však nedovolují stavbu odděleného tramvajového pásu a přínos by nebyl v souladu s vyšší investice. Prostor pro oddělený pás se nachází v zatravněném ostrůvku oddělující obousměrný provoz na Rokycanské ulici. Na současnou linku č. 11 jsou nasazovány 12m trolejbusy jezdící v pracovní dny s taktem 15 min. Zavedení tramvají by zde bylo velmi neefektivní. [69], [77]

Sídliště Vinice jsou místem s potřebným vysokým přepravním výkonem. Ten je zajišťován převážně kloubovými autobusy. V pracovní dny jezdí v podobném taktu jako tramvaj č. 1 nebo 2, zatímco o víkendu ve dvojnásobném. Pro stavbu tramvajové trasy je zde vyhrazené travnaté těleso procházející okrajem celého sídliště. Nyní se bytová zástavba nachází pouze jedním směrem od zmíněného pásu. V budoucnosti, pokud by výstavba pokračovala i na druhé straně ulice Na Chmelnicích, by pro uspokojení přepravního výkonu byla tramvajová doprava velmi výhodná. Délka nově vzniklé trasy by, v závislosti na umístění obratiště, dosahovala zhruba délky 1,25 až 2 km. Tomu odpovídají stavební náklady minimálně 125 až 200 mil. Kč. V úvahu připadá vícero variant. [69], [77]

- Spojí současné linky č. 4 míří z obratiště „Bory“ přes „Sady Pětatřicátníků“ do zastávky „Zoologická zahrada,“ kde se linka dělí na dvě větve, z čehož jedna pokračuje na Košutku a druhá odbočuje na Vinice.



- Obsluhu Vinic zajišťují některé spoje tramvaje č. 4, které tam zajíždí, ale dále pokračují po své původní trase.
- Nově vzniklá linka spojuje střed města „Sady Pětatřicátníků“ a obratiště „Vinice.“ Částečně podporuje dosavadní linky č. 1 a 4
- Cestující používají linku, např. č. 5, pouze pro jízdu ze sídliště Vinice do zastávky „Zoologická zahrada“, kde je terminál pro přestup na současnou linku č. 4. Tramvaj je buď bezobslužná (obdoba systému DLR v Londýně), nebo řidič mění své stanoviště. Nasazovány musí být pouze obousměrné vozy. Podoba terminálu je na obrázku 3.2. (Ke zvážení je i možnost, kdy by se terminál nacházel v zastávce Pod Záhorskem. Přínosem je obsluha zastávky dvojicí linek. Dochází tak k plynulejšímu cestování i z oblasti centra Plzně, vlakového nádraží a Slovan a to linkou č. 1. Část náporu cestujících by tudíž měla volbu, zda využít vytíženou linku č. 4 nebo její méně obsazenou alternativu. Na druhou stranu by délka trati na Vinice byla delší, což by se projevilo vyššími náklady na výstavbu i údržbu, vyšším kilometrovým provozem, větším počtem obsluhujících vozů, složitějším řešení kolejových tratí.)



Obr. 3.2 Přestupní terminál mezi linkami 4 a 5

Varianty se od sebe liší v míře stavebních prací, ale především pak následným řízením provozu na dané trati. Konečným řešením musí být kompromis mezi požadovaným dopravním výkonem, vhodného zakomponování do současného terénu, bezproblémového provozu a také finanční dostupnosti.

Napájení nové trati by měla na starosti měnírna Lochotín. Z křižovatky ulic Karlovarská a Na Chmelnicích je vzdálena vzdušnou čarou 400 m. Napájení trolejové armatury v místě křížení se současným vedením a v celé oblasti zmíněné křižovatky by bylo zajištěno z napájecího úseku č. 102 Lochotín jeho prodloužením. Ten je napájen čtveřicí vodičů skrz 2 napájecí body. Umístění úsekového děliče v blízkosti křižovatky je nevhodné. Nový napájecí úsek by tedy začal zhruba o 50 m dále. Zbývající trolejové vedení by tvořilo jeden úsek. Vzhledem k rovinatému profilu, délce, využívání pouze jednou linkou a omezené expanzi, by napájení dvojicí kabelů bylo dostatečné. Dvoubodové připojení je výhodnější, avšak na úkor investičních nákladů. Vhodně dimenzované napájení by bylo možné v budoucnu použít jako zdroj pro nabíjení. Elektrobusy vyjíždějící z přestupního terminálu na konečné stanici by zajišťovaly bezemisní a tichou dopravu pro přilehlé okolí. [60]

Ještě pár let zpátky byla velkým nedostatkem v elektrické trakci neexistující infrastruktura a tudíž i obsluha průmyslové zóny „Borská pole.“ Tento stav je dnes již z části napraven trolejbusovými linkami, vedoucí důležitými tahy v dané lokalitě. Další problém však nastal přesunem velké části univerzitních objektů do kampusu na Borských polích, který způsobil velký nárůst cestujících. Reakce ze strany dopravních podniků ve formě rozšířené linky č. 30 a nově vzniklé linky č. 24, která v dnešní době pokračuje až do Zadních Skvrňan, byla jediným okamžitým řešením. Tento stav ale trvá nadále. Výstavba tramvajové trati byla několikrát posunuta. Její přibližná délka 1,2 km vyžaduje nejméně 120 mil. Kč pro výstavbu. Opět se nabízí několik variant. [69]

- Zachování obratiště „Bory,“ kdy jen vybrané vozy budou obsluhovat nově vzniklou trasu až do univerzitního kampusu. (U této varianty lze uvažovat i nad jednokolejovou stavbou od Klatovské třídy po obratiště v kampusu. Nižší cena i prostorové nároky by zjednodušily proces stavby. Velká délka úseku, který by ale mohl být bez mezizastávky, by snižovala takt vozů.)
- Zrušení obratiště „Bory“ a celý provoz linky č. 4 pokračuje na novou konečnou.

V tomto případě se pro napájení hodí měnírna M 8 Karlov. Byla postavena spolu s novým trolejbusovým provozem na Borských polích. Je vybavena dvěma transformátory o celkovém výkonu 2,2 MVA. Pro potřeby tramvajového provozu by její výkon mohl být navýšen přidáním dalších transformátorů. Křížení u ulic Kaplířova a Klatovská a krátký úsek tratě za ním by bylo ještě připojeno k napájecímu úseku č. 001 Bory. Ten je napájen dvojicí kabelů v blízkosti místa

odbočky a dále v jeho dolní části u zastávky Náměstí Míru další dvojicí opět z měnírny M 7 Bory a přídatnými dvěma kabely z měnírny M 1 Hydro. [60]

Další lokality, které by vyžadovaly zavedení vysoce kapacitní tramvajové dopravy, se v Plzni zatím nenacházejí. Stavba zcela nové tratě je finančně, stavebně, technologicky, technicky, provozně, prostorově i právně velmi náročná. Z tohoto důvodu se jeví výhodnější navázání na současnou síť tramvajových linek. Rozšíření může být provedeno formou větvení, nebo prodloužení. Obě dvě varianty jsou použity v případech výše a týkají se linky č. 4. Jiné větvení do husté bytové zástavby pravděpodobně nepřipadá v úvahu. Prodloužení jedním směrem už jsem uvažoval. Na opačném konci trasy je linka ukončena obratištěm „Košutka.“ To se nachází na samotném konci sídliště, které je dále obklopeno lesy, přírodními rezervacemi a celkově oblastí boleveckých rybníků. Jiný rozvoj linky č. 4 tedy neuvažuji.

Pro tramvajovou linku č. 1, v oblasti Bolevec, je situace podobná. Její obratiště bylo vybudováno na vhodném místě. Podporuje přestupní uzel mezi autobusovou dopravou, vlakovým spojením a veřejnou dopravou města Plzně. Rozšíření tímto směrem je opět limitováno boleveckými rybníky a vzrostlým lesem. Druhý konec linky je v obratišti nacházejícím se na náměstí Milady Horákové. Vytíženost linky tímto směrem dokládá příloha B. Je způsobena hustou zástavbou, ale i přítomností významného přestupního uzlu mezi všemi třemi trakcemi. V blízkosti je umístěno tramvajové depo, kde začíná a končí všechny denní provoz tramvají. Rozšíření tramvajového provozu by kladlo ještě vyšší nároky na vozovnu, která již v současné době je svou rozlohou ne zcela dostačující. Plocha, která je pozůstatkem dřívějších kasáren a nachází se zhruba 600 m za náměstím Milady Horákové, je alternativou k současné, okolní výstavbou omezené, ploše tramvajového depa. Při realizaci nového objektu pro údržbu a stání vozů tramvajové vozby by vznikl nový úsek tramvajových pásů, který by vedl od současného obratiště po zmíněnou stavbu. Vzhledem k délce by cena výstavby převyšovala 60 mil. Kč bez započtení investic do nové vozovny. Lokalita je však výhodná i pro výstavbu bytů nebo rodinných domků.

Hojná průmyslová zástavba i nedostatečná šíře vozovky Koterovské ulice v místech za obratištěm Světovar znesnadňují potencionální rozšíření trasy linky č. 2. Rozvětvení je také velmi nepravděpodobné. Stejná linka obsluhuje i sídliště Skvrňany na západní straně města, kde je hustá panelová výstavba, několik vzdělávacích institucí a také Atletický stadion města Plzně. Tramvajová obslužnost Skvrňan je nezbytná a v současné době dostatečná. Realizovaná I. etapa západní části městského okruhu spojující Chebskou a Domažlickou ulici výrazně

omezila plochu pro rozvoj bytové výstavby na sídlišti Skvrňany. Na druhou stranu, pokud by celá zbývající plocha, vymezená současnou výstavbou a nově vzniklou Regensburskou ulicí, byla zastavěna, ani tehdy by nebylo třeba prodloužení tramvajové trasy. Dochozí vzdálenost by nebyla větší než je obvyklé.

Výše zmíněné rozšíření tramvajové sítě je červeně zakresleno do mapy současných linek na obrázku 3.3.

Bateriové tramvaje, podobné těm, které Škoda Transportation dodala v roce 2015 do tureckého města Konya, nejsou v Plzni nutně zapotřebí. Tramvaj je na celém území vedena povrchově, bez tunelů, a tak k místům s omezenou výškou, kde je umístění trolejového drátu problematické, dochází pouze na dvou místech. Podjezdová výška pod mosty v ulici Karlovarská a Mikulášská je ale pro osazení trolejového vedení dostatečná. Existují i jiné důvody pro zavedení bateriových tramvajů, jako minimalizace horního trakčního vedení např. v historických centrech. Vozy by byly koncipované jako Slide-in, viz kapitola 1.6.1. Na druhou stranu lze troleje chápat jako městotvorný prvek vymezující hlavní dopravní tepny města. Bateriový pohon by byl přínosný při uvíznutí tramvaje v místě bez napětí. Jedná se především o tramvajové soupravy vybavené jedním sběračem. Jsou-li spojeny 2 samostatné vozy, je velká pravděpodobnost, že aspoň jeden ze sběračů je pod napětím a daný vůz pohne celou soupravou. Přes zmíněné výhody je použití akumulátoru v tramvajích diskutabilní. Náklady na úpravu vozovky a výstavbu kolejí jsou tak vysoké, že vynechání trolejového vedení nepředstavuje významnou úsporu. Na druhou stranu by tato úspora „přinesla“ zvýšenou váhu tramvajů, jejich vyšší cenu a nemožnost provozu bezakumulátorových vozů na daném úseku.

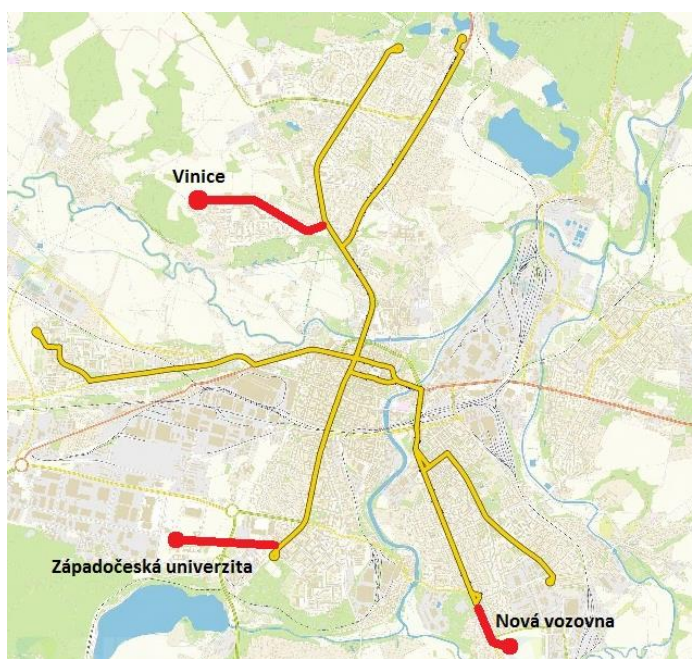
Akumulačním prvkem vybavená tramvaj má lepší předpoklady pro využití rekuperované energie při brzdění. Ta je generována při každém zpomalování, ale nenachází-li se na společném napájecím úseku, u některých měnících i na jiných, další vozidlo, energie musí být při překonání jisté napěťové úrovně mařena. Ukládat a následně využívat tyto přebytky je nezbytné pro vytvoření efektivní dopravy. Superkapacitory by byly pro tuto aplikaci vhodnější, neboť jsou schopny dosáhnout větších výkonů při delší životnosti. Jejich nižší hustota uložené energie oproti akumulátorům není v této aplikaci velkou překážkou. Celkové množství energie vzniklé při brzdění jednoho prázdného vozu Tatra T3 o hmotnosti 16 tun z rychlosti 40km/h (11,1 m/s) je dáno rovnicemi 3.1 a 3.2. [46], [80]

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \xi = \frac{1}{2} \cdot 16\,000 \cdot 11,1^2 \cdot 1,25 = 1\,234,5 \text{ kJ} \quad (3.1)$$

$$W_{rek} = \frac{W_{kin} \cdot \eta_{mot}}{3\,600} = \frac{1\,234,5 \cdot 0,9}{3\,600} = 0,3 \text{ kWh} \quad (3.2)$$

- přičemž  $\xi$  je tzv. poměrná přírážka, neboť všechna rotující tělesa, převody atd. zvyšují setrvačnou sílu
- tj. respektuje kinetickou energii rotujících těles na vozidle
- dále respektuje poloviční obsazení vozidla cestujícími
- u elektrických vozidel MHD je  $\xi = 1,25$

Umístění akumulčního prvku přímo do vozidla eliminuje ztráty vzniklé na vedení. V opačném případě, kdy je energie ukládána až v měničce, dochází k jistým ztrátám, proti hodnotě je nižší počet superkapacitorů v měničce oproti počtu při osazení všech vozů. V polském městě Gdyně proběhlo kontrolní měření, při němž byly 2 měničny osazeny superkondenzátorovými zásobníky, každá v počtu čtyř kusů. Kapacita jednoho článku byla 0,7 kWh, napětí 201,6 V a byl schopný přijmout nebo vydat výkon 200 kW. Při provozu se došlo k závěru, že průměrný příkon měničny z rozvodné sítě poklesl o 26 %. Efektivnější využívání zásobníku nastává při nízkém počtu vozidel, neboť v opačném případě se vytrácí jeho přínos z důvodu přímé rekuperace do jiného vozidla. Další možností zvýšení efektu rekuperace je měnična vybavená dvoustranným měničem pro přenos energie z vozidla zpět do napájecí soustavy nebo propojení úseku napájených odlišnými měničkami. V tomto případě byla změřena úspora ve výši 7 %. [46], [81]



Obr. 3.3 Schéma současných tramvajových linek doplněné o nové úseky [82]

### 3.3 Trolejbusy

Trolejbusová doprava je rozvinuta především v jižní části města Plzně, tj. Božkov, Černice, Bory, průmyslová zóna Borská pole, Nová Hospoda a dále pak celé Doubravce. Ostatním čtvrtím se vyhýbá. Jedná se o nekolejovou dopravu, z čehož vyplývá nižší infrastrukturní náklady v porovnání s tramvajemi. Trolejbusy používají vozovku stejně jako osobní a nákladní doprava. Je tak nutná především výstavba napájecí infrastruktury podobné té tramvajové, kdy největší rozdíl je v natažení dvojice trolejových drátů s roztečí 600 mm o obvykle nižším průřezu. Na trase jsou budovány převážně zastávkové zálivy místo nástupních ostrůvků. Průměrné náklady na stavbu 1 km trolejbusové trati se pohybují od 25 mil. Kč. Trolejbus je výhodný v místech s hustou zastavbou, úzkými ulicemi s nemožností odděleného tramvajového pásu, klidovými zónami, vysokou přepravou osob, avšak nižší než v případě tramvají.

V Plzni je trolejbusová doprava rozšířená. Infrastruktura byla budována mnoho let až do současného stavu. Je velmi výhodné využít této možnosti a bez velkých investičních nákladů rozšířit trolejbusovou síť. Trolejbusy vybavené dieselem agregátem budou postupně nahrazovány těmi s akumulátorem, které také umožní jízdu i mimo zatrolejované úseky. Takto koncipovaný parciální trolejbus bude lépe nakládat s rekuperovanou energií a dále zlevňovat provoz. Baterie mohou být nahrazeny superkapacity. Rozvoj trolejbusové sítě může probíhat několika způsoby. Jednak vznikem zcela nových linek, rozšířením stávajících, nebo jako náhrada autobusových. Jistý potenciál skrývají Borská pole. V současnosti jsou obsluhovány linkami č. 15, 17 a 18, které vedou po Folmavské ulici. Bateriový pohon by trolejbusům dovolil zajíždět i mimo hlavní ulici a tím zajistit lepší dopravní spojení pro větší část průmyslové zóny. Vstupní investice by byla mimo nákupu nových trolejbusů minimální.

Do Starého Plzně dnes zajíždí autobusová linka č. 32 (od 21.5. bude nahrazena č. 50) a 51. Jako alternativu lze považovat trolejbusovou linku vedenou od nákupního centra Olympia přes Ostrou hůrku do Starého Plzně k vlakovému nádraží. Jedná se o stejnou trasu, jakou obsluhuje linka č. 32, ta však pokračuje dále do Sedlce. Trasa je kopcovitá. Její celá délka v jednom směru je 6,7 km. Minimální garantovaný dojezd by musel být alespoň 20 km. Nahrazení linky č. 51 by bylo obtížnější. Současná trasa měří 9,2 km a začíná na náměstí Milady Horákové. Větší nároky na kapacitu baterie a současně kratší doba provozu pod trolejemi tuto variantu komplikují. Variantou je elektrobuses s rychlonabíjením.

Parciální trolejbus by i nadále obsluhoval obec Letkov, pouze místo dieselového motoru by používal baterie.

Pouhé prodloužení trasy by znamenalo zavedení trolejbusové dopravy do obchodního centra Plzeň na Rokycanské ulici. Od současného obratiště linek č. 11 by trolejbus pokračoval ulicemi U Zahrádek a Nákupní do již postaveného obratiště. K zpětnému nasazení sběračů by došlo v zastávce U Václava. Celkové prodloužení by nepřesáhlo 2 km. Baterie by následně ke svému plnému nabití využila i rekuperovanou energii získanou brzděním po Rokycanské ulici.

Ať zamýšlené silniční spojení středu města, konkrétně Tyršovou ulicí, s Fakultní nemocnicí Lochotín přes Roudnou bude vybudováno nebo ne, místo pro trolejbusovou dopravu zde je. Nově projektovaná stavba by již byla vybudována s trolejovým vedením a zastávkovými zálivy. Nebude-li tato stavba zrealizována, může trolejbusová trasa vést po alternativní cestě ulicemi Goethova, Františkánská, Rooseveltova, Otýlie Beníškové, Malická a Na Roudné v délce 2,5 km, případně 3 km až před FN Lochotín. [46], [49], [60], [77]

### 3.3.1 Trolejbusová linka Plzeň – Štěnovice

Dopravní obsluha obcí přilehlých k městu je důležitá pro jejich rozvoj a udržení obyvatelstva, které je z velké části závislé na městě. Dopravu využívají všechny věkové kategorie pro různorodé účely. Jednou z přilehlých obcí k městu Plzeň jsou Štěnovice. Ta je vzdálena 6 km jihozápadně od obchodního komplexu Olympia Plzeň a má kolem 2 000 obyvatel.

#### Technický pohled

Dopravní spojení v dnešní době obstarávají autobusové linky společnosti ČSAD, mnohdy s potřebným přestupem v Losiné, nebo Radobyčicích. Nově nakoupené trolejbusy s pomocným pohonem na baterie o kapacitě 44 kWh jsou možností, jak zajistit dopravu do dané obce. Podmínkou společnosti PMDP ve výběrovém řízení bylo, aby vozy i po několikaletém provozu byly schopny urazit 12 km na bateriový pohon. Trolejbusy by byly provozované na současné lince č. 13 z Doubravky do Černic o délce 11 km. Celá délka je zatrolejovaná. Hlavním zdrojem energie by v tomto úseku byla ta přijatá z vrchního vedení, která by dále sloužila pro nabíjení akumulátoru. Troleje končí obratištěm Černice. Je však plánováno jej posunout do volného prostoru za dosavadní zástavbu. Délka provozu pod trolejemi by ještě mírně narostla. V tomto místě by došlo ke snížení sběračů a trolejbus by dále pokračoval na baterie. Trasa vede

zvlněným terénem. Štěnovické náměstí, vhodné jako obratiště trolejbusové dopravy, se nachází 5 km daleko od místa, kde by vozy spustily sběrače. Provoz by byl tedy veden z 31 % mimo trolejové vedení. Průměrná spotřeba 12m trolejbusu Škoda 24 Tr je 1,9 kWh/km. Dojezd na plnou baterii je dán vztahem 3.3.

$$44 \text{ kWh} \div 1,9 \text{ kWh/km} = 23,15 \text{ km} \quad (3.3)$$

Tato vzdálenost je pouze teoretická, neboť baterii škodí její plné vybití a dále kapacita v průběhu života klesá. Dovolенý maximální nabíjecí výkon je dle rovnice 3.4:

$$P = U \cdot I = 600 \cdot 90 = 54 \text{ kW} \quad (3.4)$$

Dle jízdního řádu je doba jízdy linky č. 13 v jednom směru 31 minut a v druhém 33 minut. Připočtu-li šestiminutové stání v obratištích, je vůz nabíjen po dobu 70 minut. V provozu je obvykle stání delší.

Pro lepší měřitelnost lze výpočet nabíjení a vybíjení vztáhnout k dráze, času nebo kapacitě akumulátoru a vyjádřit v procentech. Množství energie pro ujetí 1 km dráhy vztahené ke kapacitě by tedy bylo (3.5):

$$1,9 \text{ kWh/km} \div 44 \text{ kWh} = 0,043/\text{km} = 4,3 \text{ %/km} \quad (3.5)$$

Na ujetí jednoho kilometru je tedy potřeba 4,3 % kapacity akumulátoru. Za jednu minutu se baterie nabije (3.6):

$$54 \text{ kWh} \div 60 = 0,9 \text{ kWh/min, tzn. } 2 \text{ %/min} \quad (3.6)$$

Nabíjení poslední pětiny kapacity akumulátoru se děje pomaleji. Doba strávená pod trolejemi je však dostatečná pro plné nabití.

Z výše vypočítaných hodnot je zřejmé, že vůz by 10km cestu bez trolejového napájení překonal. Při bezproblémovém provozu by došlo k poklesu úrovně nabití baterie o 43 %. Tuto energii by trolejbus následně doplnil během 22 minut. Celková doba nabíjení je ale více než trojnásobná. Nová flotila trolejbusů vybavených 44Ah akumulátorem by tedy navrhovanou trasu byla schopna obsluhovat.



## Ekonomický pohled

Přes zjevné výhody jako je tichost provozu, nulové emise, vyšší jízdní komfort, prestiž, exkluzivita jsou diesellové autobusy stále velmi rozšířené. Je to dáno především jejich nižší pořizovací cenou viz tabulka 3-I.

**Tab. 3-I Pořizovací ceny 12m vozidel se shodnou výbavou [60]**

Druh vozidla	Autobus	Trolejbus	Trolejbus s akumulátorem
Pořizovací cena [mil. Kč]	5	9,5	11,5

S provozem dopravního prostředku se pojí i náklady nutně vydané na jeho správné fungování. Na dané lince uvažujeme 3 spoje v ranních hodinách pro pracující a studenty, dále jeden spoj v průběhu dopoledne, a následně 4 spojení mezi 14 a 21 hodinou. Celkem tedy 8 jízd, potažmo 80 km. Aby byl výpočet schopný srovnání, je nutné uvažovat jízdu autobusu i ve zbývající části trati na Doubravku. V opačném případě by museli cestující v Černicích přestoupit a využít vyhrazeného autobusu. Výpočet aplikujeme na 8 kompletních jízd, tedy 256 km v pracovní dny. O víkendu bude jezdit polovina spojů, tj. 128 km. Vzhledem k délce trati je nezbytné provozování minimálně třech vozů, aby byla dodržena výše zmíněná frekvence dopravy. V příkladě neuvažují servisní úkony na vozidlech. Životnost vozidel se uvažuje na 12 let, a tak v příkladě bude uvažována pouze poměrná část za 1 rok provozu. Výpočet bude proveden pro všechny tři druhy vozidel. [60]

Rok má 52 týdnů, tj. 104 víkendových dnů a 260 pracovních. Roční kilometrový výkon na dané lince tedy je (3.7):

$$104 \cdot 128 + 260 \cdot 256 = 79\,872 \text{ km} \quad (3.7)$$

Amortizaci vozů počítám dle následujícího vzorce [60]:

$$\text{Roční amortizace} = \frac{\text{cena vozidla} \cdot \text{počet vozidel}}{\text{předpokládaná doba životnosti (12 let)}}$$

## a) Autobus

**Tab. 3-II Náklady na dopravu autobusy**

Amortizace vozů	1,25 mil. Kč
PHM	639 000 Kč
Celkem	1,889 mil. Kč

Linka kombinuje městský i mimoměstský provoz. Průměrná spotřeba na těchto tratích je 40 l/100 km. Náklady na PHM jsou (3.8):

$$\frac{79\,872}{100} \cdot 40 \cdot 20 = 638\,976 \text{ Kč} \quad (3.8)$$

Roční amortizace vozů je dána vztahem 3.9:  $\frac{5\,000\,000 \cdot 3}{12} = 1\,250\,000 \text{ Kč}$  (3.9)

## b) Trolejbus

**Tab. 3-III Náklady na dopravu trolejbusy**

Amortizace vozů	2,375 mil. Kč
Amortizace infrastruktury	5 mil. Kč
El. Energie	380 000 Kč
Celkem	7,755 mil. Kč

Výstavba 5 km trati stojí 150 mil. Kč. Životnost je počítána s přihlédnutím k nízkému provozu na 30 let, tj. 5 mil. Kč/rok. Náklady na elektrickou energii jsou (3.10):

$$79\,872 \cdot 1,9 \cdot 2,5 = 379\,392 \text{ Kč} \quad (3.10)$$

Roční amortizace vozů je dána vztahem 3.11:  $\frac{9\,500\,000 \cdot 3}{12} = 2\,375\,000 \text{ Kč}$  (3.11)

## c) Trolejbus s bateriovým pohonem

Tab. 3-IV Náklady na dopravu trolejbusy s bateriemi

Amortizace vozů	2,875 mil. Kč
El. Energie	399 000 Kč
Celkem	3,274 mil. Kč

$$79\,872 \cdot 1,9 \cdot 2,5 \cdot 1,05 = 398\,362 \text{ Kč} \quad (3.12)$$

$$\text{Roční amortizace vozů je dána vztahem 3.13: } \frac{11\,500\,000 \cdot 3}{12} = 2\,875\,000 \text{ Kč} \quad (3.13)$$

Spotřeba energie bude teoreticky stejná jako v předchozím případě. Jelikož dochází v akumulátoru k přeměně energie s jistou účinností, je nutné počítat s vyšší spotřebou. V případě uvažují celkové zvýšení o 5 % i vzhledem k vyšší hmotnosti vlivem akumulátoru. Náklady na elektrickou energii jsou vypočteny vzorcem (3.12). V tomto případě není započítána amortizace infrastruktury, neboť ta je již vybudována a je používána i bez uvažovaného prodloužení.

Tab. 3-V Souhrn nákladů na dopravu Plzeň - Štěnovice

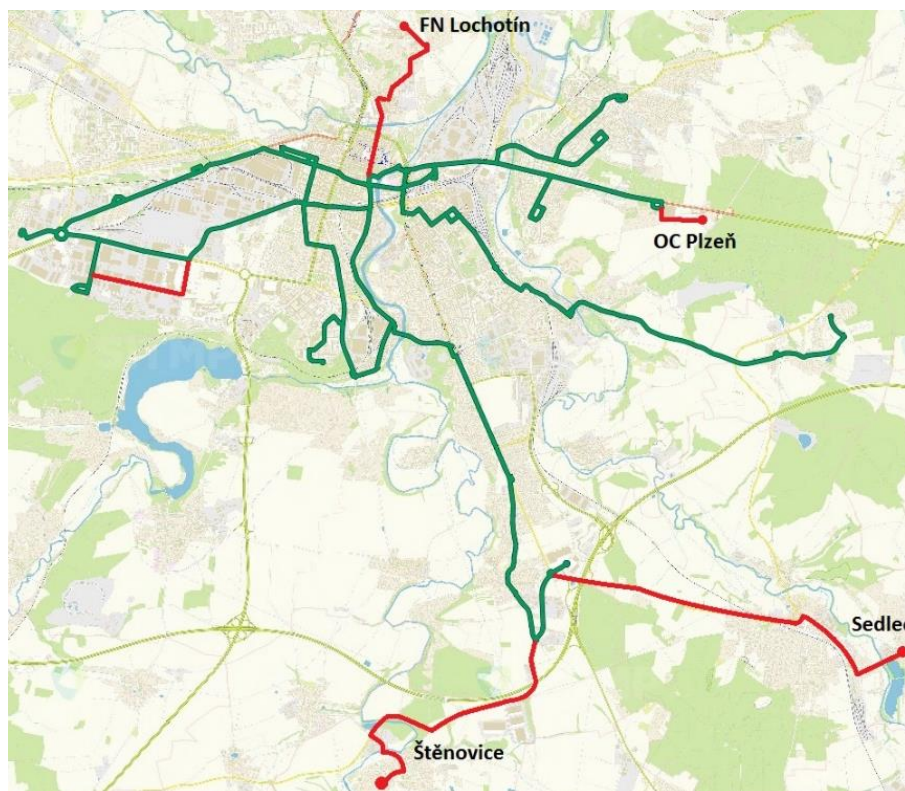
Druh vozidla	Autobus	Trolejbus	Trolejbus s akumulátorem
Roční náklady [mil. Kč]	1,889	7,755	3,274

Tabulka 3 – V ukazuje, že zřízení plnohodnotného trolejbusového provozu je na inkriminované trase velmi neekonomické. Roční náklady jsou v porovnání s autobusy více než čtyřnásobné. Bez uvažování vyšších nákladů na údržbu infrastruktury by se trolejbusová doprava vyplatila až při ročním proběhu 1,88 milionů kilometrů, tj. 24x více než předpokládám. Tehdy by nižší náklady na energie převážily vyšší investice do vozidel a infrastruktury. Varianta je tedy zcela neprůchodná.

Srovnání autobusů a trolejbusů s akumulátorem vychází opět z hlediska celkových nákladů lépe pro autobusy. Náklady by se vyrovnaly až při sedminásobném jízdním výkonu.

Získané výsledky jsou ovlivněny především vyšší pořizovací cenou elektricky poháněných vozidel, ačkoliv jsou z mechanického hlediska jednodušší. Nižší výrobní série se odrážejí na vyšších vývojových nákladech v přepočtu na jeden vyrobený vůz. Plně automatické sběrače stojí i 1 milion. Dále pak se ve vyšší cenovce odráží jistá prestiž a exkluzivita. [60]

Trolejbusy jsou běžně vybavovány diesel agregátem pro zvýšení operativnosti a potlačení závislosti na trolejovém vedení. Ze strany dopravních podniků je snaha o jejich eliminaci a nahrazení trolejbusy s bateriemi a režimem provozu Slide-in. Jejich provozováním společnost získá ekologický, tichý a moderní dopravní prostředek schopný jízdy i mimo zatrolejované úseky. Na autobus zatím ztrácí především cenou a dojezdem na baterie. Oba tyto neduhy pravděpodobně v dlouhodobém horizontu vymizí, nebo se alespoň minimalizují, pokud dojde k nárůstu sériové výroby a zlepšení technologií akumulátorů. [60], [77]



Obr. 3.4 Schéma současných trolejbusových linek doplněné o nové úseky [82]

### 3.4 Elektrobusy, Bateriobusy

Jak je zmíněno v kapitole 2.2.2, provoz bateriobusů není v Plzni nijak rozšířen. Nachází se pouze na jedné lince a to v testovacím provozu. Je to dáno jednak vyšší pořizovací cenou vozů, nutnou nabíjecí infrastrukturou, omezeným dojezdem a nízkou flexibilitou. Cena plzeňských bateriobusů není známa, jedná se totiž o cíleně vyvinuté produkty, které byly k provozu pronajmuty. Pro jednoduchost uvažujme stejnou cenu jako v případě trolejbusu s bateriemi, tj. 11,5 mil. Kč. Bateriobus může být vybaven pro dojezd např. 150 – 200 km. V tomto případě však baterie zabírá značnou část vozu, což je u vozidel pro hromadnou přepravu nevhodné. Vhodnější způsob je dobíjení kapacitně menší baterie v průběhu dne. K tomu je zapotřebí rychlonabíječka, schopná vůz nabít v řádu jednotek, maximálně desítek

minut. Její cena se pohybuje kolem 6 mil. Kč. Toto zařízení je sdílené pro více vozů. Ke každému bateriobusu však musí přináležet pomalá nabíječka pro noční nabíjení a balancování článků. Prodává se za cenu 0,5 mil. Kč. Celková cena pořízení nového bateriobusu je tedy 12 mil. Kč a náklady na rychlonabíječku se rozpočítávají mezi obsluhované vozy. Z tohoto důvodu je výhodné stavět rychlonabíječky na místa s hustším výskytem autobusů, a ne na jednotlivá obratiště, mnohdy obsluhovaná pouze jednou linkou. Z plzeňských autobusových obratišť se jedná především o Bory, Borská pole, Doubravku, Košutku, Slovany a CAN.

Zavedení bateriobusů se nabízí u linky č. 21 z Plzně do Litic. Detailněji se této možnosti budu věnovat v kapitole 3.4.1.

Autobusy jezdící mezi Skvrňany a Bory, tj. lince č. 24, překonají při jízdě jedním směrem 7,2 km. To je o přibližně 2 kilometry více, než v současnosti jezdí bateriobus Škoda Perun na lince č. 27. Nabíjecí terminál by byl vybudován na obratišti Bory, kde by vzhledem k vysokému provozu bylo zařízení efektivněji využíváno. Autobusy na této lince jezdí často a v pravidelných intervalech. Některé spoje dokonce jezdí pouze 1,5 km z Bor k Západočeské univerzitě. Linka č. 24 je velmi využívána a nemyslím si, že by se uvažovalo o jejím zrušení. V budoucnosti, až bude dostavěna tramvajová trať na Borská pole, by však její trasa mohla být zhruba o 2 km kratší, neboť by končila u nově vybudovaného přestupního terminálu na konečné tramvaje.

Další linka autobusů vedoucí z Bor přes Valchu a Lhotu do Nové vsi je č. 26. Ne každý spoj obsluhuje celou trasu, ale bateriobus musí být dimenzován pro ujetí plné trasy. Ta měří 10,5 km. Jedná se opět o vzdálenost, kterou je bateriobus schopen při adekvátní kapacitě baterie a upraveném jízdním řádu pro rychlonabíjení opakovaně překonávat.

Pouze několik spojů v pracovní dny, a žádný o dnech pracovního volna, má linka č. 31 spojující Slovany a Hradiště. Trasa dlouhá pouze 2,5 km není pro dnešní bateriobus žádnou překážkou. Problémem je nízká frekvence spojů, načež je autobus využíván i na jiných linkách. V případě nasazení bateriobusu by bylo nutné jeho další provoz na jiných linkách pečlivě plánovat, aby nedošlo k úplnému vybití akumulátoru.

Dalším místem aplikace bateriobusů jsou linky č. 52, 53, 54. Jedná se o spoje do okolních obcí. Trasy jsou dlouhé i 10 km. Při vhodném plánování zastávek na konečné Doubravka a dimenzaci nabíjecí stanice lze o zavedení bateriobusů uvažovat i na těchto trasách.



Obr. 3.5 Schéma navrhovaných linek vhodných pro bateriobusy [82]

### 3.4.1 Elektrobusová linka Bory - Litice

Dřívější obec Litice je dnes městským celkem Plzeň 6 – Litice. Litická náves je od konečné tramvaje č. 4 Bory vzdálena 3,5 km. Populace čítá 2 800 lidí.

#### Technický pohled

Litice jsou dnes obsluhovány jednak dopravcem ČSAD, ale také linkou č. 21 společnosti PMDP. Ta jezdí mezi obratištěm Bory a konečnou v Liticích umístěnou na konci dnešní zástavby. V pracovní dny dopravu zajišťují dva vozy. Jeden slouží od 5:00 do 23:08 s dvojitým střídáním řidiče. Tvoří hlavní spoj s taktem 30 minut. Doplňkový vůz pro zajištění 15minutového taktu začíná již v 4:20 a končí v 8:09, kdy jede do vozovny. Do další služby nastupuje o 13. hodině. Překrývací jezdí s prvním vozem pro navýšení přepravní kapacity a linku opouští v 17:49. Denní výkon prvního vozu je 295,1 km a druhého 158 km. Doba zastavení v Liticích je minimální a to maximálně 2 minuty pro vyrovnání jízdního řádu a dodržení taktu. Naopak na Borech vozy stojí po dobu 6–20 min. V případě hlavní pracovní přestávky 30 min. Délka jednoho jízdního cyklu je 8,4 km. Budeme-li uvažovat průměrnou spotřebu shodnou s bateriobusem Škoda Perun, tj. 2,4 kWh/ km, musí mít trakční baterie minimální kapacitu dle vztahu 3.11:

$$2,4 \cdot 8,4 = 20 \text{ kWh} \quad (3.11)$$

S růstem technologické úrovně bateriobusů by jejich spotřeba mohla ještě poklesnout. Jedná se však pouze o předpoklad. Kapacitu baterie je nutné vhodně dimenzovat, aby vozy

ujely vzdálenost jednoho cyklu se započítáním minimálního stavu nabití a opotřebením i při zapnutém topení. Spotřeba tím vzrůstá. Aby byl bateriobus schopen vyřešení nenadálé situace, objížďky nebo jisté variability nasazení, navrhuji jej osadit trojnásobkem minimální kapacity (60 kWh). Nabíjecí výkon uvažujme v příkladě stejný jako u rychlonabíječky na Košutce. Ten je v šetrném režimu 400 A (240 kW), v obvyklém 800 A (480 kW) a v maximálním 1000 A (600 kW). Budeme-li uvažovat šetrné nabíjení a spotřebu energie 20 kWh/jízdní cyklus, postačuje k plnému nabití přestávka daná vztahem 3.12:

$$\frac{20}{240} = 0,083 \text{ h} = 5 \text{ min} \quad (3.12)$$

Při maximálním proudu se doba nabíjení zkrátí na (3.13):

$$\frac{20}{600} = 0,033 \text{ h} = 2 \text{ min} \quad (3.13)$$

V zimním provozu, kdy je spotřeba z důvodu zapnutého topení vyšší, uvažujme spotřebu 30 kWh/cyklus. Nabíjecí doba se zvýší na 7,5 a 3 minuty. Doba stání je ve většině případů dostatečná pro plnohodnotné nabití. Průměrná spotřeba za letní a zimní provoz je 25 kWh/8,4 km, což je 3 kWh/km. Množství energie pro ujetí 1 km dráhy vztažené ke kapacitě by tedy bylo (3.14):

$$3 \text{ kWh/km} \div 60 \text{ kWh} = 0,05/\text{km} = 5 \text{ %/km} \quad (3.14)$$

Na ujetí jednoho kilometru je tedy průměrně potřeba 5 % kapacity akumulátoru. Za jednu minutu se baterie nabije (3.15-3.17):

$$240 \text{ kWh} \div 60 = 4 \text{ kWh/min, tzn. } 6,66 \text{ %/min} \quad (3.15)$$

$$480 \text{ kWh} \div 60 = 8 \text{ kWh/min, tzn. } 13,33 \text{ %/min} \quad (3.16)$$

$$600 \text{ kWh} \div 60 = 10 \text{ kWh/min, tzn. } 16,66 \text{ %/min} \quad (3.17)$$

Ukazatel spotřeby energie na ujetý kilometr vztažený ke kapacitě akumulátoru vyšel 5%. V porovnání s parciálním trolejbusem je tato hodnota vyšší a je dána především vyšší uvažovanou spotřebou bateriobusu. Pokles úrovně nabití o 30 % by na obratišti Bory byl zpětně dobit za 2 – 7,5 minuty.

## Ekonomický pohled

Pořizovací cena bateriobusu je i s noční nabíječkou 12 mil. Kč. Klasický dieselový autobus stojí 5 milionů Kč. Ceny jsou zobrazeny v tabulce 3-VI.

**Tab. 3-VI Pořizovací ceny 12m vozidel se shodnou výbavou [60]**

Druh vozidla	Autobus	Bateriobus
Pořizovací cena [mil. Kč]	5	12

Ve výpočtu opět neuvažujeme servisní úkony na vozidlech. U bateriobusu se jedná o výměnu špatných článků trakční baterie, zatímco u dieselového autobusu především o výměnu provozních kapalin. Oba vozy za pracovní den ujedou 453,1 km. O víkendu je denní porce 210 km. Celkem tedy 2 685,5 km za týden. Pro zajištění provozu musí být nakoupeny minimálně dva vozy, kdy jejich životnost je počítána na 12 let. [60]

Za 52 týdnů vozy celkově najedou (3.18):

$$52 \cdot 2685,5 = 139\,646 \text{ km} \quad (3.18)$$

a) Autobus

**Tab. 3-VII Náklady na dopravu autobusy**

Amortizace vozů	0,833 mil. Kč
PHM	1,062 mil. Kč
Celkem	1,895 mil. Kč

Linka je provozována především v mimoměstském provozu. Průměrná spotřeba na těchto tratích je 38 l/100 km. Náklady na PHM jsou (3.19):

$$\frac{139\,646}{100} \cdot 38 \cdot 20 = 1\,061\,309 \text{ Kč} \quad (3.19)$$

Amortizace vozů je dána vztahem 3.20:  $\frac{5\,000\,000 \cdot 2}{12} = 833\,333 \text{ Kč} \quad (3.20)$



## b) Bateriobus

Tab. 3-VIII Náklady na dopravu bateriobusy

Amortizace vozů	2 mil. Kč
Amortizace infrastruktury	0,5 mil. Kč
El. Energie	1, 048mil. Kč
Celkem	3,548 mil. Kč

Rychlonabíjecí zařízení stojí 6 mil. Kč a jeho životnost odhaduji na stejnou dobu jako u vozidel. Amortizace infrastruktury je dána vztahem 3.21. Amortizace vozů je dána vztahem 3.22.

$$\frac{6\,000\,000}{12} = 500\,000 \text{ Kč} \quad (3.21)$$

$$\frac{12\,000\,000 \cdot 2}{12} = 2\,000\,000 \text{ Kč} \quad (3.22)$$

Náklady na elektrickou energii jsou (3.23):

$$139\,646 \cdot 3 \cdot 2,5 = 1\,047\,345 \text{ Kč} \quad (3.23)$$

Tab. 3-IX Souhrn nákladů na dopravu Plzeň - Litice

Druh vozidla	Autobus	Bateriobus
Roční náklady [mil. Kč]	1,895	3,548

Tabulka 3 – IX ukazuje náklady na provozování dvou navrhovaných variant. Roční provoz bateriobusů na inkriminované lince by dopravní podnik stál téměř dvakrát tolik co v případě autobusů. K tomu všemu jsou ještě podmínky provozu nastaveny tak, že bateriobusy budou vykazovat menší provozní náklady až po ujetí extrémních 16,5 mil. km za rok. Tento fakt je dán několika faktory. Zejména vyšší cenou autobusů poháněných elektřinou. Ta je navíc vzhledem k jejich nesériové výrobě těžko zjistitelná. Přídavným nákladem je stacionární noční nabíječka v depu. Velkou investici přináší rychlonabíječka, která s rostoucím počtem bateriobusů bude představovat nižší dílčí položku. V tomto případě je celý náklad rozpočítán pouze do dvou bateriobusů. Dalším faktorem výhry autobusů je vysoká, a zatím ne zcela rozklíčovaná, spotřeba energie u bateriobusů. Ta se navíc v zimním provozu výrazně zvyšuje. Zásadní vliv také má současná cena ropy, potažmo motorové nafty. Ještě minulý rok byla její cena

minimálně o 4 Kč více. Při současných podmínkách je provoz bateriobusů v daném případě velmi neekonomický.

### 3.4.2 Výhled do budoucnosti

Budme optimisté a pokusme se předpovědět do jakého prostředí se bateriobusy hodí.

Cena ropy je velmi nestabilní a je předpoklad, že bude opět růst a to z dnešních 20 Kč na dřívějších 25 Kč, ale klidně i více, např. 30 Kč. Přesně opačný stav doufejme, nastane s cenou trakčních baterií, potažmo celých bateriobusů. Sériová výroba a masivní odbyt by dokázaly cenu přiblížit dnešním autobusům. Docházím k tomuto závěru především z porovnání náročnosti a množství komponentů elektromotoru a moderního diesellového motoru splňujícího normu EURO 6. U elektromotoru není potřeba měnit žádné provozní kapaliny, což se také pozitivně projeví v provozních nákladech. Uvažuji proto pokles základní ceny bateriobusů o 30%, tj. na 8 mil. Kč. Snížení ceny infrastruktury je pravděpodobné, na druhou stranu její sdílení mezi několik bateriobusů v případě většího nasazení tolik neovlivní fixní náklady na jeden vůz. Předpokládejme tedy její cenu neměnnou, ale počet využívajících bateriobusů bude 5. Důležitým faktorem je i samotná spotřeba vozů. Účinnost spalovacích motorů je neustále zvyšována. Může proto dojít k dalšímu poklesu spotřeby pohonných hmot, řekněme o 2 litry. Příčinou může být i odlehčování vozů. Stejný fakt pravděpodobně nastane i u bateriobusů, kde uvažujeme pokles spotřeby na úroveň dnešních trolejbusů, tedy 1,9 kWh/km. Vyšší poptávku po elektrické energii reflektujeme její vyšší cenou, a to o stejný díl jako u nafty. Nárůst 25 % zvýší její cenu na 3,125 Kč/ kWh. [60]

**Tab. 3-X Pořizovací ceny 12m vozidel se shodnou výbavou [60]**

Druh vozidla	Autobus	Bateriobus
Pořizovací cena [mil. Kč] (12 m)	5	8

V tabulce 3-X jsou upravené ceny nových vozidel. [60]

Za 52 týdnů vozy celkově najedou (3.24):

$$52 \cdot 2685,5 = 139\,646 \text{ km} \quad (3.24)$$

## a) Autobus

Tab. 3-XI Náklady na dopravu autobusy

Amortizace vozů	0,833 mil. Kč
PHM	1,508 mil. Kč
Celkem	2,341 mil. Kč

Upravená spotřeba je 36 l / 100 km. Náklady na PHM jsou (3.25):

$$\frac{139\,646}{100} \cdot 36 \cdot 30 = 1\,508\,176 \text{ Kč} \quad (3.25)$$

Amortizace vozů je dána vztahem 3.26:  $\frac{5\,000\,000 \cdot 2}{12} = 833\,333 \text{ Kč}$  (3.26)

## b) Bateriobus

Tab. 3-XII Náklady na dopravu bateriobusy

Amortizace vozů	1,333 mil. Kč
Amortizace infrastruktury	0,1 mil. Kč
El. Energie	0,830 mil. Kč
Celkem	2,263 mil. Kč

Rychlonabíjecí zařízení stojí 6 mil. Kč a jeho životnost odhaduji na stejnou dobu jako u vozidel. Náklady na elektrickou energii jsou (3.27):

$$139\,646 \cdot 1,9 \cdot 3,125 = 829\,148 \text{ Kč} \quad (3.27)$$

Amortizace vozů je dána vztahem 3.28:  $\frac{8\,000\,000 \cdot 2}{12} = 1\,333\,333 \text{ Kč}$  (3.28)

Amortizace infrastruktury je dána vztahem 3.29:  $\frac{6\,000\,000}{12 \cdot 5} = 100\,000 \text{ Kč}$  (3.29)

Tab. 3-XIII Souhrn nákladů na dopravu Plzeň - Litice

Druh vozidla	Autobus	Bateriobus
Roční náklady [mil. Kč]	2,341	2,263

Náklady na provoz obou druhů dopravy v upraveném případě shrnuje tabulka 3-XIII. Provoz bateriobusů vychází o 3,33 % levněji. Dalšími pozitivy je tišší, lokálně bezemisní provoz a efektivnější nakládání s energií z důvodu vyšší účinnosti elektromotoru a možnosti rekuperace. Nyní je otázkou, zda se daný příklad bude alespoň částečně shodovat s realitou v následujících letech.

## Závěr

V práci jsem podrobně popsal alternativní zdroje, nosiče energie k dnes nejhojněji využívané ropě. Některé zmíněné možnosti se zcela nezbavují závislosti na ropě. Jedná se především o plyn LPG.

Dalším zdrojem je vodík, který je v současnosti také vyráběn převážně z ropy, a nedá se tedy považovat za obnovitelné a ekologické palivo. To však může změnit technologický a chemický vývoj, který umožní získávání vodíku z biopaliv nebo elektrolýzou vody. Podmínkou je získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Pro plnohodnotnou náhradu ropy je ještě zapotřebí vylepšit proces skladování, aby vodík z nádrží neunikal, a snížit jeho cenu. Vzhledem k nízké účinnosti spalování vodíku si myslím, že jeho využití v palivovém článku bude převažovat.

Elektřina je jako pohonná energie velmi využívaná především v nákladní a hromadné dopravě. Pohání lokomotivy, vlakové soupravy, metra, tramvaje, nadzemní dráhu, automobily, motocykly, bicykly, koloběžky, manipulační vozíky a mnoho dalších dopravních prostředků. Její obliba pramení z výborné regulace pohonných systémů, přetížitelnosti motorů, snadné reverzace, menších prostorových nároků, vysoké účinnosti, nízké hlučnosti, možnosti brzdění a rekuperace, výborných výkonových křivek a především kvůli provozu bez emisí. Ten je vzhledem k původu elektrické energie diskutabilní. Většina vozidel elektrické trakce je provozována jako závislá, tudíž musí být neustále připojena na zdroj elektrické energie. Nejčastěji se tak děje pomocí vrchního vedení zvaného trolejové. Nezávislý provoz je umožněn dieselaagregátem, nebo energetickým úložištěm ve formě akumulátorů nebo superkapacitorů. Jejich vysoká cena a parametry však jejich uplatnění omezují.

Řešením je polozávislý provoz, kdy vůz v průběhu jízdy vybité akumulátory vymění, nebo vhodným způsobem dobije. Existuje několik způsobů, kdy každý z nich je vhodný pro odlišné využití. Největší uplatnění v reálném provozu vidím u třech z nich. Trolejbusy vybavené trakční baterií a průběžně nabíjené, jsou následně schopny nezávislého provozu po omezenou vzdálenost, danou kapacitou baterie.

Odlišný přístup k elektrickému provozu mají bateriobusy, nebo také elektrobusy. Jak název vypovídá, jedná se o autobusy vybavené bateriemi pro dojezd v řádu desítek kilometrů. To není pro celodenní provoz dostatečné a musí být v průběhu dne dobíjeny. To se děje na konečných stanicích pomocí rychlonabíječek v řádu jednotek minut.

Poslední možností je superkapacitory vybavený autobus, který je na jedno nabití schopen urazit pouze stovky metrů, maximálně jednotky kilometrů. To dostačuje pro ujetí vzdálenosti mezi zastávkami. Na vybraných je umístěno dobíjecí zařízení, kontaktní nebo bezkontaktní, které superkapacitory vysokým výkonem v krátkém čase nabije. Bohužel se naráží na vysokou cenu superkapacitorů a potřebné infrastruktury, a tak je tento způsob zatím velmi ojedinělý.

Veřejná doprava v Plzni je velmi pokroková a plná moderních technologií. Obsahuje dvě elektrické trakce a jednu dieselovou. Ve svém vozovém parku má hybridní autobus, 2 bateriobusy, trolejbusy, tramvaje a autobusy. Podíl elektrické trakce je téměř dvoutřetinový. V práci jsem navrhnul některá řešení pro jeho navýšení. Jednak vznik nových tramvajových tratí v lokalitách Vinice a Bory, ale také trolejbusových linek, např. u OC Plzeň, FN Lochotín, Borská pole nebo do přilehlých obcí. Podrobnější návrh, technické a ekonomické zhodnocení jedné možnosti jsem zpracoval v kapitole 3.3.1.

Provoz trolejbusů do obcí mimo dosah trolejového vedení je umožněn díky trakční baterii. Ta se nabíjí z trolejového vedení v době, kdy vůz slouží jako normální trolejbus. Spočítal jsem, že nakupované parciální trolejbusy jsou z technického hlediska schopny trasu do obce Štěnovice překonat. Z hlediska nákladů se tato varianta umístila před klasickými trolejbusy, které doplatily především na vysoké náklady potřebné infrastruktury. Naopak za ekonomicky výhodnější variantu bych označil klasické autobusy, těžící především z výrazně nižší ceny oproti elektricky poháněným vozidlům a také v současné době levné motorové naftě.

Zavedení bateriobusů se jeví jako alternativa k současným autobusům. Naráží ale především na vyšší cenu vozů i infrastruktury ve formě rychlonabíječek, vysokou hmotnost akumulátorů a omezený dojezd. Přesto se na několik linek v plzeňské dopravě hodí. Výpočet ekonomické rentability, se současnými cenami, nedopadl pro bateriobusy v porovnání s autobusy nijak příznivě. Roční náklady na provozování tohoto druhu dopravy na vybrané lince mi vyšly téměř dvojnásobné. Následně jsem upravil ceny s výhledem do budoucnosti. Pořádí se v tu chvíli obrátilo. Bateriobus k ekologickému a tichému provozu přidává i nižší celkové provozní náklady. Vyplní-li se moje prognóza s novými cenami energií, vozidel městské hromadné dopravy a technologickým pokrokem, jsou bateriobusy vhodnou alternativou dnešním autobusům vybavených spalovacím motorem.

Práce prohloubila mé znalosti z oblasti elektrické trakce a elektromobility, umožnila mi nahlédnout do společnosti PMDP, a.s. a přiučít se mnohému od jejích odborníků. Děkuji.

## Seznam literatury

- [1] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5.
- [2] RWE CNG: Z historie plynu v dopravě [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/historie-130/>
- [3] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohon automobilů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0127-6.
- [4] RWE CNG: Bioplyn [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-125/>
- [5] RWE CNG: Propan butan – LPG [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-119/>
- [6]auta na plyn: LPG [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/slovník/lpg>
- [7] Wikipedia: Oktanové číslo [online]. 25.1.2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oktanové\\_číslo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oktanové_číslo)
- [8] CNGplus: Mapa CNG stanic v ČR [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/cerpaci-a-plnici-stanice.html>
- [9] Česká republika, ráj čerpacích stanic v Evropě [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/ekonomika/1016577-ceska-republika-raj-cerpacich-stanic-v-evrope>
- [10] CNGplus: Ceny CNG v České republice [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/ceny-cng.html>
- [11] CCS: VÝVOJ CEN POHONNÝCH HMOT [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.ccs.cz/phm>
- [12] RWE CNG: Daně [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/dane/>
- [13] RWE CNG: Výhody CNG [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/vyhody-cng/>
- [14] RWE CNG: Ekologie [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/626/>
- [15] Arnika: Látky znečišťující ovzduší [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://arnika.org/latky-znecistujici-ovzdusi>
- [16] CNGplus: Definice [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/o-cng/definice.html>

- [17] EkoBonus: Proč jezdit na CNG [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/proc-jezdit-na-cng--1>
- [18] BusPress: Pádne důvody, proč využívat zemní plyn CNG/LNG v dopravě! [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.buspress.eu/padne-duvody-proc-vyuzivat-zemni-plyn-cnglng-v-doprave/>
- [19] HYBRID.CZ: LNG má v dopravě během 20 let významně růst [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/lng-ma-v-doprave-behem-20-let-vyznamne-rust>
- [20] BusPress: Prodej aut a autobusů na zemní plyn (CNG) v ČR má 100% nárůst [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.buspress.eu/prodej-aut-a-autobusu-na-zemni-plyn-cng-v-cr-ma-100-narust/>
- [21] Wikipedia: Vodík [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodík>
- [22] NÁDRAZSKÝ, Pavel. Budoucí zdroje paliv pro pohon automobilů. 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Mgr. Eduard Ščerba, Ph.D.
- [23] Science in school: Vodík: zdroj zelené energie v budoucnosti? [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.scienceinschool.org/node/3565>
- [24] Wikipedie: Elektrolýza [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrolýza>
- [25] H2 shop: SKLADOVÁNÍ VODÍKU [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=17>
- [26] BMW 7 Series Hydrogen 7 [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.bmwarchive.org/e-code/e68.html>
- [27] Autoweb: BMW Hydrogen 7 [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.autoweb.cz/bmw-hydrogen-7/>
- [28] RWE CNG: Vodík / palivové články [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-123/>
- [29] BMW Hydrogen 7 [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.hydrogen-motors.com/bmw-hydrogen-7.html>
- [30] Tzbinfo: Získávání energeticky významných prvků z oceánů (II): Vodík Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/2649-ziskavani-energeticky-vyznamnych-prvku-z-oceanu-ii-vodik> [online]. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2649-ziskavani-energeticky-vyznamnych-prvku-z-oceanu-ii-vodik>
- [31] DOLEŽEL, Ivo. Elektrochemie. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-708-2410-7.



- [32] DVOŘÁK, Karel. Elektrochemické zdroje pro elektromobily. 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Jiří Dejmeš.
- [33] EkoBonus: Vodíková auta - budoucnost nebo slepá cesta? [online]. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/ekologicka-doprava/elektromobilita/vodikova-auta-budoucnost-nebo-slepa-cesta>
- [34] JANSÁ, F. Elektrická zařízení hnacích vozidel MHD. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1986.
- [35] KASENČÁK, Petr. Chytrá a zdravá městská veřejná doprava: Alternativní pohony nekolejových vozidel MHD [online]. 2011 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.konference2011.pmdp.cz/cz/ke-stazeni/>
- [36] HUSAIN, Iqbal. Electric and hybrid vehicles: design fundamentals. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2011. ISBN 14-398-1175-X.
- [37] SLAVÍK, Jakub. E-mobilita v MHD: Situace a vývojové trendy v elektrických autobusech pro městskou dopravu [online]. Říčany, 2015 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie2015.pdf>
- [38] POHL, Jiří. SIEMENS, S.R.O. Elektrobuses pro městská centra. 2014. Konference Czechbus Praha 2014, získáno od konzultanta.
- [39] PILAŘ, Jiří. SOLARIS CZECH. Bezemisní městská doprava – zkušenosti z provozu elektrobuses. Czechbus Elektromobilitas Praha 2015, získáno od konzultanta.
- [40] Elektrické vozy Renault: RENAULT FLUENCE Z.E.[online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.rpz.cz/renault/nove-vozy/elektricke-vozy/>
- [41] DVOŘÁK, Karel. Elektrochemické zdroje v silniční dopravě. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Michal Kubík, Ph.D.
- [42] DVOŘÁK, Petr. ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE, FEKT VUT V BRNĚ. Obnovitelná energie: Superkondenzátory [online]. 2010 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>
- [43] Maxwell technologies: SUPERKAPACITORY[online]. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf>
- [44] SRB, Luďek. Elektrické Vozy: Superkapacitory: budoucnost napájení elektromobilů? [online]. 2013 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://elektrickevozy.cz/clanky/superkapacitory-budoucnost-napajeni-elektromobilu/>
- [45] HAMILTON, Tyler. Technology review: Next Stop: Ultracapacitor Buses [online]. 2009 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/415773/next-stop-ultracapacitor-buses/>

- [46] PECHMAN, Ondřej. Energeticko - ekonomická bilance trolejbusové dopravy. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Jiří Polívka.
- [47] DANZER, Jiří. Elektrická trakce I. Plzeň: Tiskové středisko ZČU, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
- [48] LOSOS, Ludvík. Městská doprava v Plzni: Pevná trakční zařízení. Praha: Nakladatelství dopravy a turistiky - NADATUR, 2004, s. 57. ISBN 80-7270-021-9.
- [49] LENZ, Erik. VOSSLOH KIEPE. Pohonné systémy moderních elektrobusů. E-bus Hamburg 2014, získáno od konzultanta.
- [50] LASKE, Andreas. SIEMENS AG. E-Bus, ja klar, aber wie?. 2014. E-Bus Konferenz 2014, získáno od konzultanta.
- [51] Volvo Developing a Plug-in Hybrid Bus [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://electriccarsreport.com/wp-content/uploads/2011/08/Volvo-Plug-in-Bus.jpg>
- [52] HORČÍK, Jan. Daimler zkouší Bčko plug-in hybrid s indukčním nabíjením [online]. 2011 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/daimler-zkousi-bcko-plug-hybrid-s-indukcnim-nabijenim>
- [53] PRIMOVE true e-mobility: Change the way to charge[online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://primove.bombardier.com/products/charging.html>
- [54] FIGASZEWSKI, Mateusz. SOLARIS. Solaris Electric Buses: experience and further development. 2014. Elektromobilita AMPER 2014, získáno od konzultanta.
- [55] Elektrobus v Bruggách: indukční dobíjení využívá energetickou síť pro tramvaj [online]. 2015 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://proelektrotechniky.cz/elektromobilita/200.php>
- [56] Wireless Bruges [online]. 2015 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.busandcoachbuyer.com/wireless-bruges/>
- [57] Electric buses with wireless charging set for UK runs in Milton Keynes [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://techxplore.com/news/2014-01-electric-buses-wireless-uk-milton.html>
- [58] SlideIn: Welcome to Slide In! [online]. [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.slidein.se/en/about-the-project/>
- [59] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj. TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKY. Projekt Slide In: trolejbus s prodlouženým dojezdem. 2014. CZECHBUS 2014, získáno od konzultanta.
- [60] interní informace PMDP, a.s. od Ing. Jiřího Kohouta, Ph.D., 2016

- [61] PÁTER, Marcel a Michal ZAHŘÁDKA. SCHUNK.KONTAKTNÍ SYSTÉMY PRO NABÍJENÍ BATERIOVÝCH VOZIDEL MHD. 2015. Czechbus Elektromobilita 2015, získáno od konzultanta.
- [62] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj. POLITECHNIKA GDAŃSKA PKT GDYNIA (DOPRAVNÍ PODNIK). DOBÍJENÍ EBUSU Z TRAMVAJOVÉ A TROLEJBUSOVÉ SÍTĚ – PRO A PROTI. Czechbus Elektromobilita 2015, získáno od konzultanta.
- [63] Historická vozidla: Trolejbus Škoda 9TrHT28 č. 358 [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.dpmp.cz/historicka-vozidla/>
- [64] PROELEKTROTECHNIKY.CZ/. ELEKTROMOBILITA V MHD: Nová koncepce pro nabíjení elektrobusů [online]. 2015 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [http://proelektrotechniky.cz/pdf/Newslettery/Newsletter4\\_SDP\\_listopad2015.pdf](http://proelektrotechniky.cz/pdf/Newslettery/Newsletter4_SDP_listopad2015.pdf)
- [65] KUŽELKA, Miroslav. ABB. Řešení rychlého dobíjení elektrobusů. 2015. Czechbus Elektromobilita 2015, získáno od konzultanta.
- [66] CHARIOT MOTORS. ULTRA CAPACITORS ELECTRIC BUS: No Range limit – No Pollution – No Batteries. E-bus Hamburg 2014, získáno od konzultanta.
- [67] VEJBOR, Jan. ŠKODA ELECTRIC. TRENDY V OBLASTI E-MOBILITY. 2014. Elektromobilita AMPER 2014, získáno od konzultanta.
- [68] VEŘEJNÁ DOPRAVA. Dostupné také z: [www.svsmp.cz/download.aspx?dontparse=true&FileID=2470](http://www.svsmp.cz/download.aspx?dontparse=true&FileID=2470)
- [69] KOHOUT, Jiří. PLZEŇSKÉ MĚSTSKÉ DOPRAVNÍ PODNIKY, A. S. Vize Plzně jako vzorového města elektromobility. 2013. Dostupné také z: [http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/smart-city/prezentace/kohout\\_jiri.pdf](http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/smart-city/prezentace/kohout_jiri.pdf)
- [70] PMDP: Vozový park [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://seznam-autobusu.cz/dopravce/pmdp>
- [71] NEUMAN, Jan. Hybridní autobus Škoda H12 Solaris[online]. 2012 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/autobusy-hybridni-autobus-skoda-h12-solaris\\_41404.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/autobusy-hybridni-autobus-skoda-h12-solaris_41404.html)
- [72] reklamní materiály získané od společnosti Škoda Electric a.s. na Veletrhu pracovních příležitostí v Plzni, 2016.
- [73] Karosa měří spotřebu městských autobusů dle evropských norem SORT [online]. 2005 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=1375&secid=7>
- [74] Zelené město: Aktuality / News [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.zeeus.zelene-mesto.eu/zeeus/aktuality/>

- 
- [75] Mladá Fronta DNES: Plzeňské elektrobuses se nebojí ani kopců. 2015, 2015(9.12.). ISSN 1210-1168.
- [76] Plzeňské trolejbusy: Vozový park [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.plzensketrolejbusy.cz/vozy/>
- [77] Jízdní řády: Dlouhodobé zastávkové jízdní řády [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://jizdnirady.pmdp.cz/LinesList.aspx>
- [78] 82 opatření pro lepší pohyb městem.: Plzeň má Plán mobility do roku 2025. [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.mobilita-plzen.cz/>
- [79] VEŘEJNÁ DOPRAVA: rok 2009. Dostupné také z: [http://www.svsmp.cz/Files/svs/dopravni\\_pruzkumy/doprava\\_2009/04-R9\\_03MHD.pdf](http://www.svsmp.cz/Files/svs/dopravni_pruzkumy/doprava_2009/04-R9_03MHD.pdf)
- [80] Mladá Fronta DNES: Plzeň brázdí tramvaj na baterie. 2015, 2015(15.4.). ISSN 1210-1168.
- [81] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj. POLITECHNIKA GDAŃSKA PKT GDYNIA. Optimalizace spotřeby trakční energie v MHD pomocí nových technologií. 2014. Elektromobilita AMPER 2014, získáno od konzultanta.
- [82] Interaktivní plán dopravy [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://gis.plzen.eu/IPD/>

## **Seznam příloh**

**PŘÍLOHA A – SCHÉMA NAPÁJENÍ TRAKČNÍHO VEDENÍ VEŘEJNÉ DOPRAVY V PLZNI..... I**

**PŘÍLOHA B – PŘEPRAVNÍ VÝKONY TRAM. LINEK V ROCE 2009 V PRACOVNÍ DNY .....II**



**Příloha B – Přepravní výkony tram. linek v roce 2009 v pracovní dny**

Počty přepravovaných osob na tramvajových linkách v roce 2009 - pracovní den

