



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Matěj Stach

ALTERNATIVNÍ POHONY
REGIONÁLNÍCH AUTOBUSŮ PID

Bakalářská práce

2023



K612 **Ústav dopravních systémů**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Matěj Stach

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – DOS – Dopravní systémy a technika

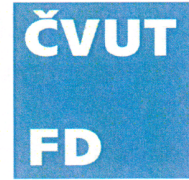
Název tématu (česky): **Alternativní pohony regionálních autobusů PID**

Název tématu (anglicky): Alternative drives for regional buses of PID

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- **Úvod**
- **Popis alternativních pohonů vozidel**
- **Výhody a nevýhody jednotlivých pohonů**
- **Provoz a ekonomika provozu včetně příkladů mimo PID**
- **Popis užití alternativních pohonů v PID**
- **Vztah alternativních pohonů a různých typů linek**
- **Vztah alternativních pohonů a pravidelnosti provozu**
- **Návrh vhodného provozního konceptu ve vybrané oblasti**
- **Závěr**



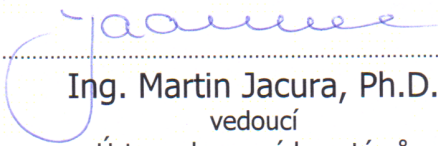
- Rozsah grafických prací: Stanoví vedoucí bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Integrovaná doprava v praxi: jedna jízdenka, jeden tarif, jeden jízdní řád, jedna síť. / Martin Jareš.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivo Novotný, Ph.D.**


Ing. Tomáš Padělek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **30. září 2022**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **7. srpna 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


Ing. Martin Jacura, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních systémů




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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


Matěj Stach

V Praze dne.....30. září 2022

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl velmi poděkovat panu Ivo Novotnému za odborné vedení práce a mnoho podnětných diskusí, jež se zrodily během našich společných konzultací. Děkuji svým drahým kolegyním a kolegům za vzájemnou soudržnost v uplynulých třech letech studia a z celého srdce pak především svým rodičům, kteří mne vždy bezmezně podporovali v mém nepomíjejícím nadšení do veřejné dopravy. Budiž tato práce i připomínkou všech společných chvil strávených v blízkosti železničních naspů, trolejbusových drah a autobusových nádraží.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

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

V Praze dne 3. srpna 2023

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

ALTERNATIVNÍ POHONY
REGIONÁLNÍCH AUTOBUSŮ PID

Bakalářská práce

srpen 2023

Matěj Stach

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je představení možností v oblasti zavádění alternativních pohonů na příměstských a regionálních linkách Pražské integrované dopravy. Její součástí je rovněž aplikace lokálně bezemisních vozidel v konkrétním provozním souboru s důrazem na provozní a ekonomickou stránku řešené problematiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

autobusová doprava, příměstské linky, regionální linky, alternativní pohony, životní prostředí, Pražská integrovaná doprava, trolejbusy, elektrobuses, trakční akumulátory

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

**ALTERNATIVE DRIVES
FOR REGIONAL BUSES OF PID**

Bachelor thesis

August 2023

Matěj Stach

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is the presentation of the possibilities in the field of introduction of alternative drives on suburban and regional lines of Prague Integrated Transport. It also includes the application of locally emission-free vehicles in a specific traffic set with an emphasis on the operational and economic aspects of the issue.

KEY WORDS

bus transport, suburban lines, regional lines, alternative drives, environment, Prague Integrated Transport, trolleybuses, electric buses, traction batteries

OBSAH

1	ÚVOD A VYMEZENÍ TÉMATU	9
2	POPIS ALTERNATIVNÍCH POHONŮ VOZIDEL.....	11
2.1	Čistá vozidla s lokálně nulovými emisemi	12
2.1.1	Trolejbus.....	12
2.1.2	Dvouzdrojový trolejbus	12
2.1.3	Elektrobus (Overnight Charging).....	14
2.1.4	Elektrobus s palivovými články (Fuel Cell).....	14
2.1.5	Elektrobus (Opportunity Charging).....	15
2.1.6	Elektrobus (kombinovaný).....	16
2.2	Čistá vozidla (částečně bezemisní)	17
2.2.1	Hybridní autobus	17
2.2.2	Plug-in-hybridní autobus	17
2.2.3	Mild-hybridní autobus.....	18
2.2.4	Autobus s pohonem na bioplyn.....	18
2.2.5	Autobus s pohonem na bionaftu	19
3	VÝHODY A NEVÝHODY JEDNOTLIVÝCH POHONŮ.....	20
3.1	Čistá vozidla s lokálně nulovými emisemi	20
3.1.1	Trolejbus.....	20
3.1.2	Dvouzdrojový trolejbus	20
3.1.3	Elektrobus (Overnight Charging).....	21
3.1.4	Elektrobus s palivovými články (Fuel Cell).....	21
3.1.5	Elektrobus (Opportunity Charging).....	21
3.1.6	Elektrobus (kombinovaný).....	22
3.2	Čistá vozidla (částečně bezemisní)	22
3.2.1	Hybridní autobus	22
3.2.2	Plug-in-hybridní autobus	22
3.2.3	Mild-hybridní autobus.....	23
3.2.4	Autobus s pohonem na bioplyn.....	23
3.2.5	Autobus s pohonem na bionaftu	23
4	PROVOZ A EKONOMIKA PROVOZU VČETNĚ PŘÍKLADŮ MIMO PID.....	24
4.1	Náklady na životní cyklus vozidel.....	24
4.2	Pořizovací cena vozidel.....	25
4.3	Provozní náklady a náklady na energii.....	27

4.4	Náklady na infrastrukturu.....	28
5	POPIS UŽITÍ ALTERNATIVNÍCH POHONŮ V PID	30
5.1	Hlavní město Praha.....	30
5.1.1	Elektrobusy.....	30
5.1.2	Trolejbusy.....	32
5.1.3	Další alternativní pohony	33
5.2	Středočeská města.....	33
5.3	Příměstské a regionální autobusové linky.....	34
5.4	Plány na zavádění alternativních pohonů do PID	35
6	VZTAH ALTERNATIVNÍCH POHONŮ A RŮZNÝCH TYPŮ LINEK.....	36
6.1	Linky příměstské.....	36
6.1.1	Provozně provázané s městskými linkami	36
6.1.2	Délky do 20 km.....	37
6.1.3	Délky do 50 km.....	37
6.1.4	Délky nad 50 km.....	37
6.2	Linky lokální zajišťované nízkokapacitními vozidly	38
6.3	Linky regionální.....	38
6.4	Linky dálkové.....	38
6.5	Shrnutí	38
7	VZTAH ALTERNATIVNÍCH POHONŮ A PRAVIDELNOSTI PROVOZU.....	40
7.1	Druhy dob zdržení.....	40
7.2	Zdržení externí.....	40
7.3	Zdržení interní.....	41
8	NÁVRH VHODNÉHO PROVOZNÍHO KONCEPTU VE VYBRANÉ OBLASTI.....	42
8.1	Parametry linek a jejich provoz.....	43
8.1.1	Linka č. 303.....	43
8.1.2	Linka č. 343.....	44
8.1.3	Linka č. 344.....	44
8.1.4	Linka č. 353.....	44
8.1.5	Tvorba kongescí a další provozní omezení	45
8.2	Výchozí oběhy vozidel a obsazenost obratišť.....	47
8.3	Stanovení spotřeby vozidel a modelových oběhů.....	49
8.4	Dvouzdrojový trolejbus.....	50
8.4.1	Návrh úseků s trolejovým vedením	50

8.4.2	Nabíjení a kapacita baterie.....	50
8.4.3	Energetická bilance na jednotlivých linkách	51
8.4.4	Úprava oběhů a výsledný počet vozidel	54
8.5	Elektrobus (Overnight Charging).....	54
8.5.1	Nabíjení a kapacita baterie.....	54
8.5.2	Energetická bilance na jednotlivých linkách	55
8.5.3	Úprava oběhů a výsledný počet vozidel	57
8.6	Elektrobus (Opportunity Charging).....	58
8.6.1	Návrh rozmístění nabíjecích stanic.....	58
8.6.2	Nabíjení a kapacita baterie.....	58
8.6.3	Energetická bilance na jednotlivých linkách	59
8.6.4	Úprava oběhů a výsledný počet vozidel	60
8.7	Elektrobus (kombinovaný).....	60
8.7.1	Výběr konkrétního řešení.....	60
8.7.2	Návrh rozmístění nabíjecích stanic.....	61
8.7.3	Nabíjení a kapacita baterie.....	61
8.7.4	Energetická bilance na jednotlivých linkách	61
8.7.5	Úprava oběhů a výsledný počet vozidel	61
8.8	Srovnání energetické bilance na referenčním oběhu	62
8.9	Odhad nákladů.....	63
9	ZÁVĚR	67
10	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	72
12	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	72
13	SEZNAM TABULEK.....	73
14	SEZNAM GRAFŮ.....	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CNG	stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)
DC	stejnoseměrný proud (Direct Current)
DPP	Dopravní podnik hl. n. Prahy
IDS JMK	Integrovaný dopravní systém Jihomoravského kraje
Kb	článekový autobus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
Kb+	dvoučlánekový autobus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
LNG	zkapalněný zemní plyn (Liquefied Natural Gas)
LTO	lithium-titanát oxidová baterie
Mn	minibus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
Md	midibus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
Md+	midibus plus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
NMC	lithium-nikl-mangan-kobalt oxidová baterie
PID	Pražská integrovaná doprava
PD	pracovní dny
ROPID	Regionální organizátor Pražské integrované dopravy
Sd	standardní autobus; kategorie definovaná Standardy kvality PID
Sd+	autobus délky cca 15 m; kategorie definovaná Standardy kvality PID
SONE	soboty, neděle a státní svátky
SORT	standardizované zkušební cykly (Standardized On Road Test Cycles)

1 ÚVOD A VYMEZENÍ TÉMATU

Poslední dekáda je spojená s výraznou akcelerací snah mezinárodních společenství, vedených Organizací spojených národů a Evropskou unií, snížit vypouštěné emise tzv. skleníkových plynů, které přispívají k oteplování planety a výkyvům klimatu. Vedle redukce emisí jsou zásadní také cíle v oblasti snižování energetické náročnosti dopravy.

Právě dopravní sektor patří historicky mezi největší znečišťovatele a obzvláště negativní je jeho role v sídlech městského typu, kde má na emitovaných škodlivinách dominantní podíl (v tuzemských podmínkách). Zásadní přitom není pouze vliv na životní prostředí, ale rovněž na zdraví obyvatel a kvalitu jejich života.

Jestliže má autobusová doprava přispět k plnění stanovených cílů, zdá se být přechod od spalovacích motorů k elektrickému pohonu nutností – především s ohledem na jeho vyšší účinnost. Na poli městské autobusové dopravy už v této souvislosti platí konkrétní regulace, jež při zadávání veřejných zakázek stanovuje minimální podíl čistých vozidel. Ten činí v současné době 41 % a od 1. ledna 2026 se dále zvýší na 60 %, přičemž minimálně polovina vozidel z tohoto podílu musí být zcela lokálně bezemisních. Autor je toho názoru, že stanovení podobných cílů v oblasti přinejmenším příměstské dopravy je otázkou nejbližších let. [1]

Zatímco na půdě Dopravního podniku hl. m. Prahy vznikla *Koncepce využití alternativních paliv* zahrnující veškeré městské linky a zároveň ty příměstské relace, jejichž obsluhu pražský vnitřní dopravce momentálně zajišťuje, systém Pražské integrované dopravy takový dokument, byť méně závažného jak koncepčního charakteru, nemá. [2]

Klimatický plán hl. m. Prahy do roku 2030 přitom ambicemi v oblasti zavádění alternativních pohonů v příměstské dopravě rozhodně nešetří, a na rozdíl od legislativy evropské stanovuje i konkrétní cíle. ROPID by podle tohoto dokumentu měl „v co nejvyšší míře od dopravců požadovat nasazování autobusů s nulovými emisemi (minimálně z 50%) a nízkými emisemi (do nejvýše 25 %).“ [3]

Autor touto prací nemá ambici suplovat neexistenci klíčového koncepčního dokumentu, ale chtěl by představit možnosti, které jsou s ohledem na současné technologické poznání dostupné. V hranicích, které evropští legislativci nastavili pro příbuzné městské autobusy, a se všemi limity, jež jsou nedílnou součástí alternativních pohonů.

Výstupem práce ovšem nebude pouze přehled alternativních pohonů. Autor se je bude snažit zasadit do ekonomického kontextu, který je podle jeho mínění v elektrifikačních projektech často ukryt pod rouškou čerpání „bezdných“ evropských dotací. Snahou bude rovněž stanovit alespoň základní kritéria pro vztahy alternativních pohonů a různých typů obsluhovaných linek a v neposlední řadě také shrnutí stávajícího stavu a připravovaných projektů.

Veškeré dílčí úkoly směřují k vrcholu v podobě návrhu využití lokálně zcela bezemisních vozidel v konkrétním provozním souboru Pražské integrované dopravy. Na této aplikaci chce autor názorně představit existující omezení při zavádění alternativních pohonů a upozornit na překážky, jež jsou typické pro hlavní město Prahu a Středočeský kraj.

2 POPIS ALTERNATIVNÍCH POHONŮ VOZIDEL

Požizování konvenčních autobusů se spalovacími motory pro potřeby zajištění příměstské anebo regionální dopravy příslušná evropská legislativa prozatím nereguluje. Musí být ovšem splněna podmínka, že se nejedná o vozidla kategorie M3 třídy I anebo A, což jsou autobusy primárně určené pro městský provoz. Nákup takových vozidel upravuje směrnice 2009/33/ES¹ o podpoře čistých a energeticky účinných silničních vozidel (v českém právním řádu zakotvená ve formě zákona č. 360/2022 Sb.) stanovující povinné podíly čistých vozidel.² [1]

Autorovi je známo, že především v okolí hlavního města Prahy dochází k prolínání provozu městských autobusů (kat. M3, třída I) do příměstské dopravy. Tuto skutečnost řeší rovněž výběrová řízení z let 2022 a 2023 na zajištění desetiletého provozu drtivé většiny příměstských linek Pražské integrované dopravy (s předpokládaným zahájením k 1. 12. 2024). Jestliže by se na dané smlouvy vztahovala ona evropská směrnice 2009/33/ES, jsou po dopravci vyžadována buď vozidla homologovaná jakožto meziměstská (kat. M3, třída II nebo B), anebo, a to v případě, že dopravce zařadí autobusy s homologací městskou, vozidla ekologicky čistá v odpovídajících podílech. Zařazení čistých vozidel může být ze strany zadavatelů výběrových řízení rovněž nařízeno v průběhu plnění smlouvy. [4]

Vyčerpávající technický popis fungování všech technologií a pohonů není pro potřeby práce nutný a tak autor přistoupil pouze k průřezu základními charakteristikami těch vozidel, které jsou dle zmíněné směrnice považovány za čisté a nejsou tedy poháněny výhradně fosilními palivy. Nad tento rámec je zmíněna dvojice hybridních technologií nepotřebujících externí dobíjení, která může směrnici vyhovět pouze při vybavení nadbytečnou zásuvkou dle standardu CCS-2. V případě jedné z nich přitom dochází k pozvolnému prosazování se v podmínkách tuzemské příměstské dopravy i v zahraničí.

¹ Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/33/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře čistých a energeticky účinných silničních vozidel, ve znění směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1161 ze dne 20. června 2019 upravuje prostřednictvím zákona č. 360/2022 Sb. minimální podíl nízkoemisních vozidel při zadávání veřejných zakázek podle zákona o zadávání veřejných zakázek a veřejných služeb podle zákona o veřejných službách v přepravě cestujících.

² Do 31. 12. 2025 činí minimální podíl čistých vozidel 41 %, z nichž polovina musí být lokálně bezemisních. Pro období mezi 1. 1. 2026 a 31. 12. 2030 je pro Českou republiku platný minimální podíl 60 % (z něž musí být polovina vozidel lokálně bezemisních).

2.1 ČISTÁ VOZIDLA S LOKÁLNĚ NULOVÝMI EMISEMI

2.1.1 Trolejbus

Trolejbus je v české legislativě zakotvený jakožto drážní vozidlo, tedy dopravní prostředek závislý na stanovené součásti dráhy. Jeho pohon zajišťuje zpravidla asynchronní elektromotor, což je stroj s obecně vyšší účinností (75 %), než jaké může dosáhnout motor spalovací (směrná hodnota účinnosti 30 %). Účinnost dále zvyšuje rekuperace, při níž přeměnou kinetické energie vzniká energie elektrická, jíž lze buď vrátit do sítě, anebo použít pro napájení systémů vozidla (v případě dvouzdrojového trolejbusu také baterií).

Konvenční trolejbus je závislý na trolejovém vedení. U nově budovaných trolejbusových systémů vč. toho pražského se počítá s napětím 750 V DC, jehož použití vede k dalšímu zvýšení účinnosti. Trolejbusy musí být na rozdíl od autobusů vybaveny dvojitou izolací.

2.1.2 Dvouzdrojový trolejbus

Dvouzdrojový nebo též tzv. parciální trolejbus není jako termín v české legislativě nijak zakotven, jde ale o označení trolejbusu s přídavným bateriovým pohonem, což je řešení, které v poslední dekádě zcela vytlačilo trolejbusy s pomocným dieselagregátem. V prostředí České republiky je provoz takového vozidla možný pouze pod dráhou, která se v úsecích bez trolejového vedení označuje za tzv. virtuální.



Obr. 1 Technologie tzv. parciálního trolejbusu v Pardubicích v praxi. Místo autobusů jezdí na lince 12 trolejbusy až do Úhřetic, které leží 9 km od centra města. (foto: Matěj Stach)

Vlastnosti trolejbusu se dvěma zdroji energie jsou obdobné jako u konvenčního trolejbusu, přičemž instalované baterie jsou zpravidla dimenzovány na dojezd 12–20 km mimo trolejové vedení (není ale problém osadit vozidlo většími akumulátory). Např.

Dopravní podnik hl. m. Prahy počítá při křížení trolejbusového systému s poměrem 1:1 jízdy pod trolejí a na baterie. Při optimálním rozložení úseků s dvoupólovým vedením je možné dosáhnout až poměru 1:3, velmi důležitý je přitom faktor doby jízdy pod vedením (na stejném úseku v obci se vozidlo dobije více, jelikož jej projede nižší rychlostí a tedy za delší dobu). V prostředí České republiky je parciální trolejbus v příměstské dopravě využíván ve městech Pardubicích (viz Obr. 1), Plzni, Teplicích a Zlíně.

Za speciální poddruh dvouzdrojového trolejbusu lze považovat trolejbus s vodíkovým prodlužovačem dojezdu, který mimo osazených baterií využívá palivových článků³ jakožto prostředku pro dobíjení baterií za jízdy mimo trolejové vedení. Dojezd takového vozidla může být až 150 km, což je příhodné pro regionální provoz. Tato technologie je zatím osazena pouze v 10 vozech Solaris Trollino 18,75 provozovaných v lotyšské Rize, v běžném provozu se ale nepoužívá, jelikož je pro městské linky naddimenzovaná. [5]

Další alternativní formou dvouzdrojového trolejbusu je řešení se spodním přívodem proudu, které se od roku 2020 testuje v rámci projektu EVolution Road na elektrické silnici ve švédském Lundu. Tento systém má umožňovat dobíjení baterií vyššími nabíjecími výkony (až 300 W), což má vést k možnosti jízdy v poměru 1:3 nad elektrickou silnicí ku bateriím. Značným nedostatkem je nemožnost vozidla vybočit z jízdního pruhu, jelikož v takovém případě dojde k přerušení napájení. Testovací provoz měl skončit v roce 2022, byl ale prodloužen. Prozatím celý nápad nelze i s ohledem na nedostupné výsledky považovat za relevantní technologii. [6]



Obr. 2 Elektrická silnice v Lundu vzniklá v rámci projektu EVolution Road. (foto: Matěj Stach)

³ Palivový článek je zařízení, v němž vzniká z chemické energie paliva energie elektrická. Účinnost reakce se pohybuje mezi 40 až 60 %. Jedinou odpadní látkou je voda.

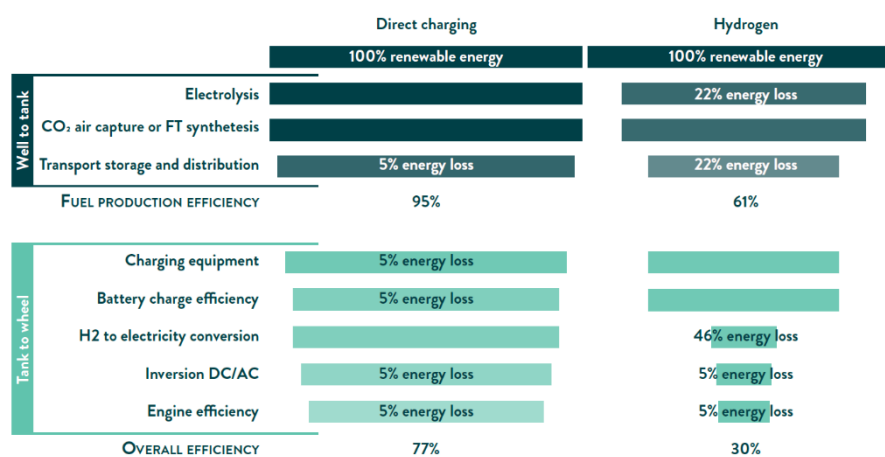
2.1.3 Elektrobuses (Overnight Charging)

Elektrický autobus je silniční vozidlo, které se nabíjí pouze staticky. Pohon zůstává plně elektrický a je založený na elektromotoru se směrnou účinností 75 %, přičemž je v provozu shodně jako u trolejbusu využíváno rekuperace. Na začátku rozmachu elektrobuses bylo časté jejich vybavování naftovým topením, což devalvovalo jejich ekologický přínos. Postupně se ale standardem stalo řešení s topením elektrickým, čehož jsou důkazem i poslední výběrová řízení na elektrobuses v České republice.

Režim provozu elektrobuses s tzv. nočním nabíjením (Overnight Charging) stojí na nabíjení v garážích dopravce typicky přes standardizovanou zásuvku, a to při nočním odstavení vozidla nebo při delších prostojích (např. mezi přepravními špičkami). To může vést k nutnosti zvýšit počet vozidel nasazených na linku. Přes rapidní vývoj v oblasti baterií z posledních let stále platí, že hmotnost bateriových packů použitých pro takovéto vozidlo bude nejvyšší ze všech druhů lokálně bezemisních vozidel. Délka dojezdu vozidla je značně závislá na klimatických i dopravních podmínkách a zvoleném druhu baterií.

2.1.4 Elektrobuses s palivovými články (Fuel Cell)

Vodíkovému pohonu založenému na nejrozšířenějším prvku ve vesmíru je obecně věštěna velká budoucnost. V praktickém použití se ovšem nejedná o spalování vodíku přímo v motoru, což by nebylo energeticky účinné, nýbrž o doplnění elektrobuses vodíkovými palivovými články.



Obr. 3 Rozpad účinnosti elektrické energie a vodíku při použití v silniční dopravě. (zdroj: UITP)

Existují dva přístupy, které se označují jako vodíkový elektrobuses a elektrobuses s vodíkovým prodlužovačem dojezdu. Rozdíl spočívá v podílu elektrické energie vyrobené v palivových člancích, přičemž v prvním případě slouží baterie hlavně pro umožnění

nepřetržitě výroby elektrické energie palivovým článkem a ukládání energie získané při rekuperaci. Oproti výchozímu stavu představenému v bodě 2.1.3 je snížena kapacita a hmotnost ve vozech osazených akumulátory, které nahrazují právě palivové články.

Je nutné si uvědomit, že v tuto chvíli se jedná o technologii rozvojovou. Není vyřešena přeprava vodíku (který je ve směsi s kyslíkem vznětlivý), poměrně citlivá je zároveň i jeho výroba, která v největší míře probíhá z fosilních paliv, což je výraznou kaňkou na jeho celkovém ekologickém přínosu. Do budoucna se očekává rozvoj výroby tzv. zeleného vodíku elektrolýzou z vody, přičemž energetická účinnost tohoto procesu se pohybuje zhruba mezi 60 a 80 %. Účinnost palivového článku je poté cca 50 %, což technologii z pohledu celkové energetické účinnosti v porovnání s konvenčním elektrobusem prozatím diskvalifikuje (viz Obr. 3). [7]

2.1.5 Elektrobuses (Opportunity Charging)

Elektrické autobusy s příležitostným nabíjením jsou technologií využívající čtyř- až pětipólové nabíjení prostřednictvím pantografu (viz Obr. 4). Ten může být instalovaný na vozidle, anebo na nabíjecím stojanu, z něhož se spouští dolů.



Obr. 4 Dvojice elektrobuses VDL Citea a dvě rychlonabíječky v přístavní části Kodaně. (foto: Matěj Stach)

Tyto systémy umožňují proti Overnight Charging zásadně zvýšit nabíjecí výkony, což snižuje dobu nutnou pro dobití vozidla a tím také kapacitu osazených baterií. S výstavbou stanice se zpravidla počítá na každé konečné zastávce. Je však nutné mít na paměti, že rychlé nabíjení je závislé na výstavbě rychlonabíjecích stanic a s ní související rezervací dostatečného příkonu u dodavatele energie a má rovněž zvýšené nároky na vlastnosti baterií. Průběžně nabíjené elektrobuses Solaris Urbino 12 electric v tuzemsku zajišťují příměstské výkony na Ostravsku.

2.1.6 Elektrobus (kombinovaný)

Poměrně zásadní je z provozního hlediska mezistupeň mezi oběma představenými řešeními elektrobusů. Ten může nabývat několika podob, které mají specifické vlastnosti. Oproti verzi Opportunity Charging rozdíl spočívá ve vyšší instalované kapacitě baterií a redukci počtu nabíjecích stanic. Pro potřeby této práce je autor pojmenoval podle praktických aplikací.

Model Kladno je varianta kombinující příležitostné nabíjení s nabíjením pomalým nočním. Podle vyjádření dopravce má toto řešení díky použití baterií o vyšší kapacitě umožnit překlenout ranní špičku bez průběžného nabíjení vozidel. To by mělo mít pozitivní efekt v podobě eliminace rizika nedostatečného nabití vlivem zpoždění (v ranní špičce mají autobusy obecně nejkratší oběžnou dobu) a odpadnutí nutnosti nasazení dalšího vozidla navíc. Zároveň se zde nabízí možnost snížit počet vybudovaných rychlonabíjecích stání a ponížít také nároky na energetickou síť. [8]

Model Praha využívá v provozu pomalé noční nabíjení a nabíjení dvoupólové z trolejbusového vedení. Využita je tak příležitost plynoucí z existence dalších povrchových elektrických módů dopravy, především tramvají a nově také trolejbusů. Tato skutečnost snižuje proti základnímu řešení Overnight Charging nutnou instalovanou kapacitu baterií ve vozidle a tím i jejich hmotnost, resp. při stejné instalované kapacitě baterií zvyšuje dojezd vozidla. Při využití dvoupólového nabíjení je pro zajištění bezpečnosti nutné (elektrobus na rozdíl od trolejbusu nemá dvojitou izolaci) užít galvanického oddělovače⁴ v podobě DC/DC měniče, který je standardně osazován na vozidlo. [9]

Další variantou je tzv. elektrobus s dynamickým dobíjením, což je vozidlo na pomezí elektrobusu a trolejbusu. Toto řešení nazývané též jako „supertrolejbus“ nabízí proti standardnímu dvouzdrojovému trolejbusu dvoj- až trojnásobný dojezd mimo trolejové vedení. Vozidlo kombinuje bateriové články určené pro nabíjení vysokým výkonem s trolejbusovými sběrači. Fyzicky se ale jedná o elektrobus pouze s jednoduchou izolací, takže je kvůli nabíjení z dvoupólového trolejového vedení nutné použít DC/DC měnič. Využití takovéto technologie má smysl uvažovat pouze v lokalitách se zavedeným trolejbusovým provozem. [10]

⁴ Galvanický oddělovač je zařízení, které umožňuje přenos elektrické energie mezi oddělenými částmi obvodu, a to na principu elektromagnetické indukce. Toto zařízení může být instalováno buď v nabíjecím místě, anebo na vozidle (tzv. DC/DC měnič).

2.2 ČISTÁ VOZIDLA (ČÁSTEČNĚ BEZEMISNÍ)

2.2.1 Hybridní autobus

Vozidla disponující hybridním pohonem (viz Obr. 5) v sobě snoubí spalovací motor s elektromotorem. Podle provedení se dělí na paralelní a sériové hybridy. K dobíjení baterií v tomto případě dochází zpravidla pouze rekuperací při brzdění.



Obr. 5 Celkem dva hybridní autobusy Volvo 7900 LH provozují Kroměřížské technické služby. Celkem v tuzemsku jezdí pouze tři autobusy využívající klasickou hybridní technologii. (foto: Matěj Stach)

Spotřeba paliva má být dle SORT⁵ 1 a 2 nižší o 20–40 %, rozdíl ve spotřebě oproti konvenčnímu diesellovému vozidlu ale do značné míry závisí na reliéfu a povaze linky, velký vliv má také jízdní styl řidiče.

Aby hybridní autobus vyhověl směrnici 2009/33/ES, musí zahrnovat „alespoň jedno neperiferní elektrické zařízení jakožto měnič energie s elektricky dobíjeným systémem ukládání energie, který je možno dobít externě.“ To je ovšem záležitost, kterou v příměstském a regionálním provozu za splnění na počátku vyřčených podmínek není nutné řešit. [11]

2.2.2 Plug-in-hybridní autobus

Dobíjecí hybridní autobusy mají na rozdíl od konvenčních hybridních autobusů fungovat převážně v elektrickém módu, což s sebou nese nutnost vybudovat příslušnou dobíjecí

⁵ Zkratka SORT vychází z anglického Standardized On Road Test Cycles a představuje jednotný přístup k hodnocení spotřeby autobusů zaštitěný mezinárodním sdružením provozovatelů veřejné dopravy UITP. SORT 1 se týká provozu ve městě, SORT 2 smíšeného provozu a SORT 3 poté příměstské dopravy. Existuje rovněž varianta pro elektrická vozidla nazvaná E-SORT.

infrastrukturu. Jedná se o řešení kombinující elektrobus a autobus, což výsledné vozidlo prodraňuje. I z tohoto důvodu v tuto chvíli na trhu není žádný výrobce, který by jej nabízel.

2.2.3 Mild-hybridní autobus

Zatímco výše zmíněné hybridní technologie mají svůj vrchol spíše za sebou, velmi oblíbeným řešením se v posledních letech stalo mild-hybridní provedení diesellových anebo plynových autobusů. To spočívá v instalaci malého elektromotoru, zpravidla superkondenzátorů pohlcujících energii z brzdění získanou rekuperací a zařízení START-STOP. Důležitá je v tomto případě skutečnost, že elektromotor standardně není používán pro pohon vozidla. Přesto je možnost taková vozidla např. ve Spolkové republice Německo zaregistrovat jako hybridní. [12]

Úspora spotřeby paliva samozřejmě není tak vysoká jako u standardního hybridního pohonu, dosahuje hodnoty vyšších jednotek procent. Mild-hybridní vozidla jsou v příměstské dopravě v České republice provozována v rámci integrovaných systémů PID a IDS JMK. Je však nutné si uvědomit, že bez zásuvky dle standardu CCS-2 (byť zcela zbytečné) takováto vozidla neplní podmínky vycházející ze směrnice 2009/33/ES.

2.2.4 Autobus s pohonem na bioplyn

Autobusy poháněné bioplymem (viz Obr. 6) využívají zážehový motor, který má nižší účinnost jak motor vznětový. Jedná se v každém případě o v západní Evropě běžný způsob, jakým lze snížit emise autobusů na stlačený zemní plyn (CNG) bez nutnosti jakéhokoliv technického zásahu. Jestliže má být vozidlo dle směrnice 2009/33/ES považováno za čisté, pak nesmí být bioplyn směřován s plynem fosilním.



Obr. 6 Za zavedené palivo se dá bioCNG považovat na Skandinávském poloostrově. Snímek autobusu s MAN s pohonem na CNG pochází ze švédského Lundu. (foto: Matěj Stach)

Spíše skepticky pak lze hledět na bioLNG, tedy zkapalněný bioplyn. Ten je výhodný svým malým objemem, který přináší vozidlu v porovnání s (bio)CNG výrazně delší dojezd. Problematická je však v případě tohoto alternativního paliva skutečnost, že pro zkapalnění a následné držení plynu v tekuté podobě je nutné využít enormní množství energie, což značně snižuje ekologický přínos takového řešení a odporuje i snahám o snížení energetické náročnosti dopravy. [13]

2.2.5 Autobus s pohonem na bionaftu

Vozidla poháněná bionaftou 2. generace (pro vyhovění směrnici 2009/33/ES) jsou vybavena vznětovým motorem, který však musí být pro provoz na 100% bionaftu uzpůsoben.

3 VÝHODY A NEVÝHODY JEDNOTLIVÝCH POHONŮ

Pro hodnocení kladů a záporů jednotlivých pohonů není stanovena žádná všeobecná srovnávací rovina, neboť ji autor v tomto výčtu shledal jako nepotřebnou. S ohledem na fakt, že je práce zasazena do prostředí Pražské integrované dopravy, je ve výčtech hodnocena i vzájemná kompatibilita řešených technologií s těmi, které jsou v současné době používány nebo plánovány v Praze jakožto v centru systému.

3.1 ČISTÁ VOZIDLA S LOKÁLNĚ NULOVÝMI EMISEMI

3.1.1 Trolejbus

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">– vysoká energetická účinnost (elektromotor a rekuperace brzdě energie)– rozložení odběru elektrické energie v čase (po celou dobu jízdy)– vysoká efektivita elektrifikace velmi zatížených přepravních směrů– kompatibilita s infrastrukturou budovanou, resp. plánovanou v Praze	<ul style="list-style-type: none">– nutná výstavba nabíjecí infrastruktury (trolejového vedení a měníren)– 100% závislost na infrastruktuře (minimální operativnost provozu)

3.1.2 Dvouzdrojový trolejbus

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">– vysoká energetická účinnost (elektromotor a rekuperace brzdě energie)– rozložení odběru elektrické energie v čase (během jízdy pod trolejí)– vysoká efektivita elektrifikace velmi zatížených přepravních směrů– kompatibilita s infrastrukturou budovanou, resp. plánovanou v Praze	<ul style="list-style-type: none">– použití klimatizace nebo topení ovlivňuje dojezd vozidla (pouze při jízdě na baterii)– nutná výstavba nabíjecí infrastruktury (trolejového vedení a měníren, ale pouze v části trasy)– nutnost výměny baterií v průběhu životnosti vozidla– vyšší závislost na infrastruktuře– mírně snížená obsaditelnost vozidla s ohledem na povolené nápravové tlaky (záleží na kapacitě baterií)

3.1.3 Elektrobús (Overnight Charging)

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">– vysoká energetická účinnosť (elektromotor a rekuperace brzdné energie)– bez extrémních nároků na energetickou síť– velká konkurence na trhu (nižší pořizovací cena vozidel)	<ul style="list-style-type: none">– použití klimatizace nebo topení značně ovlivňuje dojezd vozidla– nutná výstavba nabíjecí infrastruktury– nutnost výměny baterií v průběhu životnosti vozidla– snížená obsaditelnost vozidla s ohledem na povolené nápravové tlaky (záleží na kapacitě baterií)

3.1.4 Elektrobús s palivovými články (Fuel Cell)

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">– vyšší energetická účinnosť (rekuperace brzdné energie)– bez extrémních nároků na energetickou síť– dojezd srovnatelný s dieselovým autobusem	<ul style="list-style-type: none">– vysoké pořizovací i provozní náklady (až čtyřnásobně)– nutná výstavba nabíjecí infrastruktury– nedořešená otázka přepravy vodíku (neexistence produktovodů)– snížená obsaditelnost vozidla s ohledem na povolené nápravové tlaky (záleží na kapacitě baterií)

3.1.5 Elektrobús (Opportunity Charging)

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">– vysoká energetická účinnosť (elektromotor a rekuperace brzdné energie)– menší kapacita baterií a díky tomu vyšší obsaditelnost oproti jiným druhům elektrobúsů– velká konkurence na trhu (nižší pořizovací cena vozidel)	<ul style="list-style-type: none">– nutnost průběžného nabíjení– použití klimatizace nebo topení značně ovlivňuje dojezd vozidla– nutná výstavba nabíjecí infrastruktury– nutnost výměny baterií v průběhu životnosti vozidla– extrémní nároky na energetickou síť– nekompatibilita s infrastrukturou budovanou, resp. plánovanou v Praze

- mírně snížená obsaditelnost vozidla s ohledem na povolené nápravové tlaky (záleží na kapacitě baterií)

3.1.6 Elektrobuses (kombinovaný)

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – vysoká energetická účinnost (elektromotor a rekuperace brzděné energie) – bez extrémních nároků na energetickou síť – kompatibilita s infrastrukturou budovanou, resp. plánovanou v Praze – velká konkurence na trhu (nižší pořizovací cena vozidel) 	<ul style="list-style-type: none"> – nutnost průběžného nabíjení – použití klimatizace nebo topení značně ovlivňuje dojezd vozidla – nutná výstavba nabíjecí infrastruktury – nutnost výměny baterií v průběhu životnosti vozidla – snížená obsaditelnost vozidla s ohledem na povolené nápravové tlaky (záleží na kapacitě baterií)

3.2 ČISTÁ VOZIDLA (ČÁSTEČNĚ BEZEMISNÍ)

3.2.1 Hybridní autobus

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – dojezd srovnatelný s dieselovým autobusem – vyšší energetická účinnost (rekuperace brzděné energie) – není třeba budovat infrastrukturu – snížení hlukové zátěže a vibrací 	<ul style="list-style-type: none"> – snížení spotřeby paliva a tedy emitovaných emisí závislé na typu linky a jízdním stylu řidiče (automaticky nepřináší úsporu)

3.2.2 Plug-in-hybridní autobus

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – vyšší energetická účinnost (rekuperace brzděné energie) – snížení hlukové zátěže a vibrací 	<ul style="list-style-type: none"> – snížení spotřeby paliva a tedy emitovaných emisí závislé na jízdním stylu řidiče a okolních podmínkách – nutná výstavba nabíjecí infrastruktury

- nekompatibilita s infrastrukturou budovanou, resp. plánovanou v Praze

3.2.3 Mild-hybridní autobus

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – dojezd srovnatelný s dieselovým autobusem – nízké pořizovací náklady 	<ul style="list-style-type: none"> – malé snížení spotřeby paliva a tedy emitovaných emisí

3.2.4 Autobus s pohonem na bioplyn

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – možnost využití bioCNG ve stávajících vozidlech dopravců – využití stávající infrastruktury – dojezd srovnatelný s dieselovým autobusem – nízké pořizovací náklady 	<ul style="list-style-type: none"> – nižší energetická účinnost – hluk a vibrace – malé snížení emitovaných emisí

3.2.5 Autobus s pohonem na bionaftu

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> – možnost využití stávající infrastruktury – dojezd srovnatelný s dieselovým autobusem – nízké pořizovací náklady 	<ul style="list-style-type: none"> – značně omezená nabídka vozidel na trhu – hluk a vibrace – malé snížení emitovaných emisí

4 PROVOZ A EKONOMIKA PROVOZU VČETNĚ PŘÍKLADŮ MIMO PID

4.1 NÁKLADY NA ŽIVOTNÍ CYKLUS VOZIDEL

Náklady na životní cyklus budou v případě zcela lokálně bezemisních i částečně čistých autobusů povětšinou vyšší jak u srovnatelného vozidla spalujícího motorovou naftu (výjimkou budou např. mild-hybridní autobusy). Obecně se dá říct, že čím méně vypustí vozidlo emisí v místě jeho provozu, tím vyšší jsou jeho pořizovací náklady a cena přidružené infrastruktury. Elektrifikaci veřejné dopravy je však nutné vnímat nejen v rovině ekonomické, nýbrž také v jejím ekologickém rozměru a pozitivním vlivu na lidské zdraví, které se opět odráží i v oné ekonomické rovině.

Jako určitý mezistupeň mezi autobusem poháněným výhradně spalovacím motorem a lokálně zcela bezemisním vozidlem slouží autobusy částečně bezemisní, které mají všechny srovnatelný dojezd s konvenčními autobusy (náhrada v poměru 1:1). Nejmarkantnější redukci vypuštěných škodlivin lze očekávat od full-hybridních vozidel obou typů, jež zároveň budou mít nejvyšší pořizovací náklady z této kategorie. Předmětem této práce je však primárně provozní aplikace lokálně zcela bezemisních vozidel.

Jak ve své bakalářské práci uvádí Emanuel Hadjikan z Berner Fachhochschule, nejefektivnější z provozního i ekonomického hlediska jsou obecně elektrická vozidla poháněná bateriemi. Autobus vybavený vodíkovými palivovými články má celkově vyšší energetickou náročnost, což se nepříznivě projevuje na ekonomice jeho provozu. Celý řetězec včetně výroby tzv. zeleného vodíku obecně dosahuje nižší účinnosti, což odporuje rovněž cílům v oblasti snižování energetické náročnosti dopravy. V podmínkách příměstské a regionální dopravy nemá z ekonomického pohledu smysl se zabývat ani konvenčními trolejbusy, jejichž zavádění by si vyžádalo značné investice do infrastruktury, jejíž výstavba navíc i s ohledem na špatnou komunikaci naráží na odpor dotčených obyvatel. [14]

Bezesporu největším nákladem je v průběhu životnosti vozidla výměna akumulátorů. Jejich cena se odvíjí od použitého typu (chemického složení) baterií a instalované kapacity. Za účelem dosažení co nejdelší životnosti se v provozu využívá pouze 60–70 % kapacity (baterie se zcela nevybíjí a ani nenabíjí do plna), přesto se články musí jednou až třikrát v průběhu provozu vyměnit. Totéž platí pro palivové články v případě vodíkových elektrobusů, resp. elektrobusů s vodíkovým prodlužovačem dojezdu. [15]

4.2 POŘIZOVACÍ CENA VOZIDEL

Náklady na pořízení jednoho vozidla s alternativním pohonem se v čase zásadním způsobem nemění a jsou odvislé především od otevřenosti dotčeného výběrového řízení. Konkurenční boj v posledních letech zásadním způsobem promluvil především do naceňování trolejbusů, jejichž trh byl v České republice dlouhodobě v podstatě monopolizovaný. Zatímco v tuzemském prostředí se ceny trolejbusů (viz Tab. 1) se v minulých letech pohybovaly dokonce na nižší úrovni jak ceny elektrobusů, v západní Evropě toto neplatí a trolejbusy jsou s ohledem na uzavřenější trh dražší.

Poslední tendry ale ukazují opětovné podražení nejen tuzemských trolejbusů, které se cenově vrací na úroveň elektrobusů (viz Tab. 2). S určitou dávkou opatrnosti se tak dá tvrdit, že lze všechna bateriová vozidla s výjimkou vodíkových elektrobusů pořídit za obdobné množství financí, byť samozřejmě vždy záleží na instalované kapacitě akumulátorů.

Většina uvedených údajů je s ohledem na nedostatek informací nekompletní. Mnoho tendrů převážně z území Spolkové republiky Německa a dalších západoevropských států není ve výčtu uvedeno vůbec, a to s ohledem na nedostupnost jakýchkoliv údajů o pořizovací ceně vozidel. [16] [17] [18] [19]

Tab. 1 Přehled cen trolejbusů v Evropě v letech 2021–2023.

Podpis smlouvy (popř. vyhlášení vítěze)	Typ vozidla	Město	Stát	Cena za kus (bez DPH) [mil. Kč]	Počet kusů	Kategorie	Dojezd na 1 nabití [km]	Kapacita baterií [kWh]
12/2021	Škoda 36 Tr T'CITY	Ostrava	CZ	11,27	18	Sd	15	
3/2022	SOR TNS 12	Zlín a Otrokovice	CZ	10,13	4	Sd		
4/2022	Škoda 32 Tr	Pardubice	CZ	12,10	10	Sd		
5/2022	SOR TNS 12	Szeged	HU	11,50	6	Sd		
5/2022	SOR TNS 12	Bratislava	SK	11,40	11	Sd		
10/2022	SOR TNS 12	Prešov	SK	11,32	4	Sd	12	
10/2022	Van Hool A12T	Esslingen	DE	27,10*	12	Sd		
12/2022	Škoda 26 Tr	Plzeň	CZ	16,10	33	Sd		
5/2023	Škoda 32 Tr	Vilnius	LT	13,80	91	Sd	20	
7/2023	Škoda 32 Tr	Pardubice	CZ	14,46	10	Sd	12	
12/2021	Solaris Trollino 18	Milán	IT	20,40	50	Kb	15	45
1/2022	SOR TNS 18	Praha	CZ	14,55	15	Kb	12	

2/2022	HESS lighTram 19 DC	Neuchâtel a La Chaux-de-Fond	CH	25,00	30	Kb		
3/2022	Škoda 27 Tr	Bratislava	SK	13,23	39	Kb		
10/2022	Van Hool A18T	Esslingen	DE	27,10*	34	Kb		
10/2022	Škoda 27 Tr	Ústí nad Labem	CZ	20,35**	33	Kb		
12/2022	HESS lighTram 19 DC	Lyon	FR	20,83	250	Kb		57
12/2022	Škoda 27 Tr	Plzeň	CZ	20,20	20	Kb		
1/2023	Solaris Trollino 18	Gdyně	PL	18,50	2	Kb		
1/2022	HESS lighTram 25 DC	Nancy	FR	25,00	25	Kb+		
2/2022	Solaris Trollino 24	Praha	CZ	31,16***	20	Kb+	11	

*průměrná cena za vozidlo z jednoho výběrového řízení na Sd i Kb trolejbusy

**dvoumotorový trolejbus

***včetně 4 stacionárních nabíječek

Tab. 2 Přehled cen elektrobusů v Evropě v letech 2021–2023.

Podpis smlouvy (popř. vyhlášení vítěze)	Typ vozidla	Město	Stát	Cena za kus (bez DPH) [mil. Kč]	Počet kusů	Kategorie	Denní dojezd [km]	Kapacita baterií [kWh]
---	-------------	-------	------	---------------------------------	------------	-----------	-------------------	------------------------

elektrobus (Overnight Charging):

3/2021	Irizar ie bus 12	Burgas	BG	14,11	34	Sd		
4/2021	Irizar ie bus 12	Madrid	ES	13,47*	30	Sd		
4/2021	BYD K9UB	Madrid	ES	13,47*	20	Sd		
7/2022	Scania Citywide LF BEV	Daugavpils	LV	10,83	6	Sd		
7/2021	Škoda 36 BB E'CITY	Budapešť	HU	12,78	80	Sd		
1/2022	SOR EBN 8	Rovinari	RO	12,23	3	Mn		172
4/2022	BYD K9UB	více měst	HU	8,90	48	Sd		
7/2022	SOR EBN 8	Prešov	SK	8,83	5	Mn		
9/2022	Yutong E12	Białystok	PL	17,05***	20	Md+		
12/2022	Karsan e-ATA 12	Bukurešť	RO	14,50	100	Sd	200	
3/2023	MIP Modulo C86e	Dunajská Streda	SK	10,98	2	Mn		
6/2023	Solaris Urbino 18 electric	Aarhus	DK	15,50	56	Kb		450+

elektrobus s palivovými články (Fuel Cell):

10/2021	Solaris Urbino 12 hydrogen	Ústí nad Labem	CZ	15,18	20	Sd		
12/2021	Solaris Urbino 12 hydrogen	Bratislava	SK	15,65	40	Sd	350	
11/2022	Solaris Urbino 12 hydrogen	Benátky	IT	15,34	4	Sd	350	

elektrobus (Opportunity Charging):

3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Ostrava	CZ	10,98	24	Sd	350	
6/2021	Irizar ie tram 12	Zaragoza	ES	17,35*	51	Sd		
6/2021	Irizar ie tram 18	Zaragoza	ES	17,35*	17	Kb		

8/2021	Solaris Urbino 8,9 LE	Martorell	ES	12,24***	2	Md		90
12/2021	Mercedes-Benz eCitaro G	Wrocław	PL	24,09	11	Kb	80**	

elektrobus (kombinovaný):

2/2021	Škoda 36 BB E'CITY	Praha	CZ	12,25	14	Sd	100**	
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Iasi	RO	13,86	20	Sd		
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Sibiu	RO	13,93	9	Sd		
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Sighetu Marmetiei	RO	13,77	7	Sd		
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Suceave	RO	13,35	15	Sd		
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Târgu Mures	RO	13,67***	32	Sd		
3/2021	Solaris Urbino 12 electric	Pitești	RO	13,40	40	Sd		
12/2021	Ebusco 2.2	Berlín	DE	17,70***	90	Sd	290	525
10/2022	Irizar ie bus 12	Krakov	PL	17,99	7	Sd		
10/2022	Solaris Urbino 18 electric	Krakov	PL	22,82	21	Kb		
11/2022	SOR NS 12 electric	Kladno	CZ	11,38	8	Sd	330	
11/2022	SOR NS 18 electric	Kladno	CZ	17,63	8	Kb	330	

*průměrná cena za vozidlo z jednoho výběrového řízení na Sd i Kb elektrobusy

**dojezd na jedno nabití

***včetně nabíječek

Referenční ceny pro výpočet odhadu nákladů v kapitole 8.9 byly určeny jako průměr uvedených cen, přičemž zahrnuty byly hodnoty pro vozidla kategorií Md+ a Sd. U všech technologií s výjimkou Opportunity Charging nebyla zohledněna nejnižší a nejvyšší cena. Průměr ceny pro elektrobus ve verzi Opportunity Charging byl udělán pouze ze dvou dostupných hodnot.

Tab. 3 Referenční pořizovací ceny lokálně bezemisních vozidel.

Vozidlo	Stanovená pořizovací cena [mil. Kč]
dvouzdrojový trolejbus	12,74
elektrobus (Overnight Charging)	13,19
elektrobus s palivovými články (Fuel Cell)	15,39
elektrobus (Opportunity Charging)	14,17
elektrobus (kombinovaný)	13,99

Kdyby bylo přistoupeno k pořízení libovolného z vozidel, bude jeho cena vždy určena výsledkem výběrového řízení a jeho konkrétní konfigurací. Proto je stanovené ceny nutné vnímat pouze jako orientační.

4.3 PROVOZNÍ NÁKLADY A NÁKLADY NA ENERGII

Podle Emanuela Hadjikana činí údržbové náklady na kilometr v případě dvouzdrojového trolejbusu i všech provedení elektrobusů vyjma těch vodíkových 0,23 CHF, tedy zhruba 5,6 Kč. České zdroje uvádějí hodnotu 3–3,5 Kč, resp. až 6 Kč v případě vodíkového elektrobusu.

Průměrná spotřeba vozidel by opět měla být napříč vozidly s vyloučením těch užívajících palivových článků shodná, a pohybovat se okolo hodnoty 1,5 kWh/km. Pro určení nákladů by byla důležitá znalost cen elektrické energie, které se mohou dramaticky měnit podle způsobu dobíjení a nabíjecího výkonu. Nákupy energií napříč dopravními podniky ale fungují na principu předpokládaného objemu energie spotřebované, a tak náklady na jednu kWh energie není možné vyčíslit, jelikož je cenotvorba v těchto velkých objemech nezohledňuje. [16]

4.4 NÁKLADY NA INFRASTRUKTURU

Cena jednotlivých položek je rozepsána v Tab. 4. Vzhledem k nedostatku tuzemských dat budou tyto hodnoty použity také pro odhad nákladů v kapitole 8.9.

Tab. 4 Přehled nákladů na standardní vozidlo přepočtený do CZK. (zdroj: bakalářská práce Emanuela Hadjikana; originál v Příloze č. 1)

Standardní vozidlo (převod z CHF do CZK)			kurz: 24,46														
			Dvoudrožový trolejbus		Elektrobus (Opportunity Charging)		Elektrobus (kombinovaný)		Elektrobus (Overnight Ch.)								
Vozidlo	Karoserie	Pořizovací náklady (bez baterie)	Kč/ks	Kč	20 177 850	Kč	15 286 250	Kč	18 221 210	Kč	17 707 592						
		Odpisová doba	počet roků		20		15		15		20						
		Úroková sazba	%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%						
		Náklady na údržbu	Kč/vůz/km	Kč		5,63	Kč		5,63	Kč		5,63					
		Fixní náklady (personál)	Kč/rok/vůz	Kč		733 740	Kč		733 740	Kč		733 740					
		Průměrná spotřeba energie	kWh/km		1,5		1,5		1,5		1,5						
		Roční proběh	km/rok/vůz		65 000		65 000		65 000		52 000						
		Počet vozidel	ks														
		Náklady na vozidlo															
		Baterie	Bateriová technologie	NMC/LTO													
Instalovaná kapacita	kWh			75		150		480		900							
Životnost	počet roků			10		6		6		9							
Náklady na LTO (2030)	Kč/kWh			13 109		13 109		13 109		13 109							
Náklady na NMC (2030)	Kč/kWh			8 291		8 291		8 291		8 291							
Náklady na baterie																	
Energie	Špičková spotřeba energie (průměr)	kWh		240		240		360		120		360		300		750	
	Množství energie	kWh		292 500		97 500		312 000		78 000		195 000		195 000		390 000	
	Nabíjení (v depu/liniově/bodově)	%		75%		25%		80%		20%		50%		50%		100%	
	Specifické náklady na energii	Kč/kWh															
	Specifické náklady v síti (výkon)	Kč/kW															
	Specifické náklady v síti (energie)	Kč/kWh															
Náklady na elektrickou energii																	
Infrastruktura	Nabíjecí stanice / Trolejové vedení	Fixní náklady	Kč/rok	Kč	489 160	Kč	–	Kč	244 580	Kč	24 458	Kč	244 580	Kč	24 458	Kč	24 458
		Pořizovací náklady (depní nabíječky, nabíjecí stanice)	Kč/ks	Kč	24 458 000	Kč	14 674 800	Kč	22 256 780	Kč	2 078 930	Kč	22 256 780	Kč	2 078 930	Kč	2 078 930
		Odpisová doba	počet roků		30		30		15		15		15		15		15
		Úroková sazba	%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%
		Náklady na údržbu	Kč/rok/ks	Kč	391 328	Kč	48 916	Kč	293 496	Kč	103 947	Kč	293 496	Kč	103 947	Kč	103 947
		Množství nových	ks nebo km														
		Množství stávajících	ks nebo km														
Náklady na nabíjecí infrastrukturu																	
Měničny / Transformátory	Měničny / Transformátory	Fixní náklady (přípojky, servisní vozidlo)	Kč/rok	Kč	489 160	Kč	244 580	Kč	244 580	Kč	20 545	Kč	244 580	Kč	51 362	Kč	128 405
		Pořizovací náklady	Kč/ks	Kč	20 789 300	Kč	20 789 300	Kč	12 229 000	Kč	12 229 000	Kč	12 229 000	Kč	12 229 000	Kč	12 229 000
		Odpisová doba	počet roků		35		35		30		30		30		30		30
		Úroková sazba	%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%
		Náklady na údržbu	Kč/rok/ks	Kč	195 664	Kč	195 664	Kč	97 832	Kč	–	Kč	97 832	Kč	–	Kč	–
		Množství nových	ks nebo km														
		Množství stávajících	ks nebo km														
Náklady na energetickou síť																	
			Trolejové vedení	Nabíjecí místo	Příležitostné nabíjení	Nabíjení na provozovně	Příležitostné nabíjení	Nabíjení na provozovně	Nabíjení na provozovně								

5 POPIS UŽITÍ ALTERNATIVNÍCH POHONŮ V PID

5.1 HLAVNÍ MĚSTO PRAHA

5.1.1 Elektrobusesy

Provozní zkušenosti s moderními elektrobusesy sbírá Dopravní podnik hl. m. Prahy nárazově od počátku roku 2010. Tehdy vyjely na linku č. 292 z Malostranského náměstí k Nemocnici pod Petřínem dva elektrobusesy Breda Menarinibus Zeus M 200E (viz Obr. 7), které byly velikostním ekvivalentem minibusů. Vozy se v provozu ovšem udržely pouze po dobu necelých dvou let, načež byly v listopadu 2011 pro vysokou poruchovost odstaveny a následně odprodány zpět výrobci.



Obr. 7 Minielektrobus značky Breda Menarinibus na Malostranském náměstí. (foto: Matěj Stach)

Technologie dvoupólového dobíjení byla v pražských podmínkách poprvé otestována už v lednu 2014, a to na lince č. 216 výchozí z Bořislavky, na níž byl zkoušen elektrobus Siemens Rampini Alé electric z Vídně. Na něj v následujícím měsíci navázal SOR EBN 8 uzpůsobený pouze pro pomalé noční dobíjení.

Zásadním milníkem se stal pro pražské elektrobusesy až následující rok 2015. K 1. září Dopravní podnik spustil dvouletý zkušební provoz elektrobusem SOR EBN 11,1, jehož příznivé provozní výsledky bezesporu ovlivnily cestu, jíž se dnes hlavní město při elektrifikaci autobusových linek za pomoci elektrobusesů ubírá. Vůz byl během pracovních dnů nasazován na linku č. 213 (Želivského – Jižní Město; od 29. 4. 2017 prodloužena až na Nádraží Uhřetěves), zatímco o víkendech byl spjatý s linkami č. 163 a 188. V obratišti Želivského došlo za účelem testování elektrobusem k vybudování dvoupólového vedení

trolejbusového typu napájeného ze zařízení „Dobudka“ sloužícího pro nezbytné galvanické oddělení. Zkušební provoz byl ukončen na konci srpna 2017, přičemž do té doby stihl elektrobus v metropoli najezdit 144 tisíc kilometrů.

Po ukončení zkušebního provozu se celá nabíjecí technologie přesunula do terminálu Palmovka, kde začala sloužit rovněž trolejbusům a zároveň dalšímu testovanému elektrobusu SOR NS 12 electric, jenž jezdil na lince č. 109 do Dolních Počernic a VÚ Běchovice. Tam mu mezi květnem a zářím 2019 sekundoval vůz EBN 11,1 z předchozího odstavce, jenž následně na lince 109 osiřel. Vůbec naposledy na „stodevítku“ vyjel elektrobus dne 10. 12. 2021, načež došlo k navrácení vozu EBN 11,1 výrobcí SOR Libchavy.

Dopravní podnik hl. m. Prahy historicky počítal s plošnou elektrifikací autobusové linky č. 207, jejíž trasa mezi Staroměstskou a Florencí vede starobylým městským centrem. S ohledem na majetkoprávní problémy na Ohradě a odpor památkářů na druhé koncové zastávce Staroměstská se ale finální působiště prvních 14 elektrických autobusů přesunulo na jihovýchod, a to konkrétně na linku 154 (nyní *Sídliště Libuš – Háje – Strašnická*) a již prezentovanou 213, které ve dnech pracovního klidu doplňuje ještě linka č. 124 na Zelený pruh. V této souvislosti došlo k obnovení nabíjecí stopy na Želivského, vybudování trolejového vedení v obratišti Strašnická a také v garážích Vršovice. [9]



Obr. 8 Jeden z nových pražských elektrobusů Škoda 36 BB E'CITY na zkušební jízdě. (foto: Matěj Stach)

První ze 14 nových elektrobusů Škoda 36 BB E'CITY vyjel s cestujícími do ulic dne 17. 1. 2022, a to právě na „pokusnou“ linku 213. Následně s ním byl zahájen ověřovací provoz, který o měsíc později vyvrcholil zahájením běžného nasazování těchto vozidel na linky. Od začátku provozu se ovšem vozy potýkají se značným množstvím závad. Další elektrický přírůstek v podobě vodíkového autobusu Škoda 36 BB H'CITY zahájil pod

hlavičkou Dopravního podniku hl. m. Prahy zkušební provoz na lince č. 170 (*Jižní Město – Pražská čtvrť*) v červenci 2023. [20] [21]

Na konci května 2023 DPP zároveň vypsal soutěž na dodání až 100 elektrobuseů standardní délky okolo 12 metrů, požadováno je opět provedení s dvupólovým nabíjením z troleje.

Vedle pražského Dopravního podniku provozuje v hlavním městě Praze elektrobusey také společnost ARRIVA CITY. Ta trojici vozidel SOR EBN 9,5 nasazuje na linky BB1 a BB2 zajišťující kyvadlovou dopravu z Budějovické do multifunkčního areálu Brumlovka.

5.1.2 Trolejbusy

Pražská elektrifikace autobusové dopravy nestojí pouze na elektrobusech, její pomyslnou druhou nohou jsou trolejbusy. Ty v hlavním městě poprvé zahájily provoz už 28. 8. 1936. První linka K spojila Střešovice s Bořislavkou a Svatým Matějem, druhá, označená jako W, poté Smíchov s Jinonicemi a Waltrovou továrnou. Po velkém poválečném rozmachu z konce 40. let a počátku let 50. byla síť od roku 1959 postupně likvidována. Poslední trolejbus zatáhl do vozovny v noci z 15. na 16. října 1972.

Na návrat trolejbusů si Praha musela počkat dlouhých 45 let. Symbolicky dne 15. 10. 2017 došlo k otevření zkušební tratě mezi zastávkami Kundratka a Kelerka v ulici Prosecké. Dvouzdrojové nebo tzv. parciální trolejbusy s alternativním bateriovým pohonem pod troleje vyjely na testovací lince č. 58, jejíž provoz byl ukončen k 20. 2. 2021. Za tu dobu se na ní vystřídala vozidla SOR TNB 12, Škoda 30 Tr, Ekova Electron 12T a také trolejbus Škoda 24 Tr zakoupený z Plzně.



Obr. 9 Trolejbus Škoda 30 Tr zapůjčený do Prahy z Hradce Králové ve společnosti vozu SOR TNS 12 představujícím budoucí podobu pražských článkových vozů. (foto: Matěj Stach)

V lednu 2022 byla zahájena stavba trolejbusové tratě v ulici Tupolevova, jež byla do provozu uvedena 15. 10. 2022. Při té příležitosti vznikla také nabíjecí stopa v Čakovicích. Plnohodnotný provoz linky č. 58 z Palmovky do Miškovic (náhrada 140) by měl být s 15 trolejbusy SOR TNS 18 spuštěn v průběhu letošního roku.

Zkraje roku 2024 mají trolejbusy vyjet také na linku č. 59, která namísto 119 spojí Nádraží Veleslavin s Letištěm Václava Havla. Pro linku jsou objednány dvě desítky tříčlánkových trolejbusů od sdružení Škoda-Solaris (Trollino 24). Kromě tohoto tandemu pilotních trolejbusových linek Dopravní podnik hl. m. Prahy aktivně připravuje elektrifikaci dalších relací. V první etapě má dojít ke spuštění provozu trolejbusů na linkách 131, 137, 176 a 191 jezdících na levém břehu řeky Vltavy a lince č. 201 propojující Nádraží Holešovice s Černým Mostem. Na dalších až 12 velmi zatížených linkách, mezi nimiž nechybí „stodvanáctka“ do ZOO nebo např. část linky 136, má být spuštěn provoz trolejbusů v etapě druhé.

5.1.3 Další alternativní pohony

Vedle elektrobuses začaly v únoru 2022 jezdit na městských linkách v Praze také autobusy vybavené mild-hybridním systémem. Čtveřici vozidel MAN Lion's City 12C vybavených technologií EfficientHybrid provozuje ve východní části města ARRIVA CITY.

Počátkem dubna 2022 vypsala tendr na dodání až 140 článkových hybridních autobusů také Dopravní podnik hl. m. Prahy. S ohledem na podmínky soutěže bylo možné kritériím vyhovět také s mild-hybridními vozidly doplněnými o nabíječku odpovídající standardu CCS-2, čehož využil vítězný uchazeč v podobě italského Iveca Bus. Smlouva je pojata jako rámcová a platí po dobu pěti let. S dodáním prvních autobusů se počítá v roce 2024. [22]

Na rozdíl od Středočeského kraje (viz 5.2 a 5.3) se na pražské půdě neprosadily plynové autobusy, což jistě souvisí také s nemožností svého času čerpat v rámci hlavního města evropské dotace. Aktuálně jediný plynový autobus nasazovaný na pražské autobusové linky vlastní živnostník Jaroslav Štěpánek, který vozidlo TEDOM C 12G vypravuje v rámci subdodávky pro společnost ČSAD Střední Čechy na linky č. 110 a 171.

5.2 STŘEDOČESKÁ MĚSTA

Nejenom v hlavním městě Praze, ale rovněž napříč okresními sídly ve Středočeském kraji se prosazují alternativní pohony. Vedle plynových autobusů, které však proti vozidlům poháněným motorovou naftou přinášejí pouze drobné úspory některých emitovaných škodlivin, dochází rovněž k rozšiřování provozu elektrobuses.

Elektrické autobusy zajišťují hlavní linky MHD v Kutné Hoře (č. 801 a 802), na kterých slouží celkem 5 vozidel společnosti ARRIVA autobusy. Největší středočeské město Kladno, byť momentálně nepatří mezi integrální součásti systému PID, zatím křížuje dvojice elektrobuseů od ČSAD MHD Kladno, jež jezdí na lince č. 610. Se začátkem roku 2024 k nim má přibýt 16 dalších vozů, z nichž bude polovina článkových. Nově pořízené elektrobusey budou spjaté s linkami č. 603 a 606. [8]

Kladno vede také žebříček městských provozů s plynovými autobusy. Pro obsluhu tamní MHD je vyčleněno celkem až 45 autobusů poháněných CNG. Plyn jako pohonné médium se v posledních letech rozšířil v rovněž nezaintegrované Mladé Boleslavi. Dopravní podnik Mladá Boleslav aktuálně vlastní 21 plynových autobusů Iveco Urbanway a dalších 17 nakoupí v příštích letech. Ke konci roku 2023 město počítá s úplným přechodem na bioCNG, které bude odebírat z vlastní bioplynové stanice. [23]

5.3 PŘÍMĚSTSKÉ A REGIONÁLNÍ AUTOBUSOVÉ LINKY

Mimo městské provozy se v podmínkách Pražské integrované dopravy zatím prosadily pouze pohon na CNG, jehož přínos je značně diskutabilní, a v malé míře také autobusy vybavené mild-hybridním systémem.



Obr. 10 Mild-hybridní autobus od společnosti MAN na pražském Opatově. Po konci zkušebního provozu vůz odkoupila společnost ČSAD POLKOST, která jej nasazuje na Černokostecku. (foto: Matěj Stach)

Co se týče vozidel poháněných stlačeným zemním plynem, jezdí jich na regionálních linkách v celém Středočeském kraji 192. Nejvíce rozšířené jsou takové autobusy u firem ČSAD MHD Kladno (98 kusů) a ČSAD Střední Čechy (81 kusů), v případě zbylých společností ČSAD Česká Lípa, Lutan, Kokořínský SOK a OAD Kolín jde o pouhé jednotky vozidel.

V rámci snižování emisí se zde ve střednědobém horizontu nabízí možnost částečně přejít na bioCNG, a to i s ohledem na skutečnost, že více než polovina vozidel ještě nepřesáhla ani polovinu plánované životnosti.

Mladá mild-hybridní technologie je zatím rozšířena na třech autobusech, z nichž jeden patří společnosti STENBUS, druhý dopravci ČSAD POLKOST (viz Obr. 10) a třetí firmě JARMES (subdodavatel dopravce ČSAD Střední Čechy). [24]

5.4 PLÁNY NA ZAVÁDĚNÍ ALTERNATIVNÍCH POHONŮ DO PID

Na rozdíl do hlavního města Prahy Středočeský kraj zatím systematicky nerozvíjel možnost zavádění alternativních pohonů v podmínkách příměstské a regionální autobusové dopravy. V tuto chvíli jsou v pokročilé fázi uvádění v život dva ostrovní projekty – elektrifikace linky č. 375 do Brandýsu nad Labem-Staré Boleslavi za pomoci trolejbusů a spuštění provozu desítky vodíkových autobusů v okolí Mníšku pod Brdy.

Záměr elektrifikace příměstských linek č. 375 a 377 (Letňany – Veleň – Kostelec nad Labem) pomocí trolejbusů byl oznámen na podzim roku 2019. Zatímco příprava zavedení trolejbusové dopravy na lince č. 377 byla pro odmítavý postoj obcí ležících po trase zastavena v říjnu 2021, trolejbusy do Brandýsu nad Labem získávají stále jasnější obrysy. Trasa linky 375 z Českomoravské měří 22,2 kilometru, přičemž trolejové vedení má být vybudováno na 12,65 km ve směru z Prahy a 11,54 km směrem do hlavního města. Očekávané náklady na vybudování infrastruktury jsou asi 700 milionů Kč. [25]

Memorandum o zahájení provozu vodíkových autobusů na Mníšecku bylo podepsáno v červnu 2022. Projekt počítá s pořízením deseti vozidel standardní délky (okolo 12 m), které má provozovat účelově založená společnost MARTIN UHER bus. V Mníšku pod Brdy má v té souvislosti vyrůst první česká stanice na 100% zelený vodík v tuzemsku, do níž bude elektřinu dodávat vodní elektrárna Vrané nad Vltavou. Předpokládaná hodnota projektu činí 242,2 milionu Kč, přičemž se počítá s dotací z ITI Pražské metropolitní oblasti. Provoz má být spuštěn na konci roku 2024. [26]

6 VZTAH ALTERNATIVNÍCH POHONŮ A RŮZNÝCH TYPŮ LINEK

Zavádění alternativních pohonů do provozu s sebou přináší mnoho nových výzev, a to speciálně v situacích, kdy se zůstane v rovině lokálně bezemisních čistých vozidel. Zatímco plánování oběhů autobusů vybavených spalovacími motory je s ohledem na jejich v podstatě neomezený denní dojezd ovlivněno především mantinely vycházejícími ze zákoníku práce, čistá vozidla s lokálně nulovými emisemi vyžadují opačný přístup, tedy dimenzování oběhů podle vlastností autobusů.

Dlouhodobé zkušenosti ukazují, že v případě volby elektrobusů ve variantě Opportunity Charging došlo k náhradě 1 dieselového autobusu zhruba 1,2–1,5 elektrobusy. V případě řešení s pomalým nočním dobíjením (Overnight Charging) může jít až o 2 elektrobusy. Při volbě dvouzdrojového trolejbusu nebo elektrobusu s palivovými články (Fuel Cell) se předpokládá poměr náhrady 1:1, přičemž toho se dá dosáhnout také u kombinovaných elektrobusů (příkladem budiž Praha). Také tato skutečnost je důvodem, proč je vedle omezení daných vlastnostmi vozidel velmi důležité také ekonomické srovnání. Systém musí být funkční a robustní, zároveň je ale žádoucí co nejméně navýšit náklady na provoz. [15]

6.1 LINKY PŘÍMĚSTSKÉ

Pro potřeby této práce vymežeme příměstské linky jako ty, které jsou výchozí z území hlavního města Prahy, případně jiných velkých měst ve Středočeském kraji (typicky Kladno), kde lze o synergickém efektu s lokálními sítěmi alespoň uvažovat. Skutečnost, že v daném sídle vybraná provozní řešení čistých vozidel existují, anebo se blíží do realizace, v žádném případě nemusí determinovat výběr konkrétního řešení pro příměstskou dopravu. Jednoduše proto, že takové řešení nemusí být v příměstské dopravě použitelné.

6.1.1 Provozně provázané s městskými linkami

Specifickou kategorií příměstských linek tvoří takové, jež jsou provozovány ve svazcích s městskými linkami. Pověštinou se jedná o vnitroměstské spoje zajišťující obsluhu nejbližších obcí, vzdálených od hranic města do zhruba pěti kilometrů. Aplikovat lze všechny verze elektrobusů, stejně tak jako dvouzdrojový trolejbus. Nutnou podmínkou je každopádně zachovat provozní provázanost s městskými linkami tak, aby nedošlo ke snížení efektivity provozu.

6.1.2 Délky do 20 km

Krátké příměstské linky do 20 km délky sahají zhruba do úrovně přechodu mezi 2. a 3. tarifním pásmem (v případě Prahy). Jedná se o pestrou směs linek s krátkými špičkovými intervaly. Provoz vedle standardních autobusů zajišťují často také článková vozidla.

Také u těchto linek se dá s ohledem na jejich ukončení ve větších terminálech využít synergického efektu s vnitroměstskou infrastrukturou. Pro relace obsluhované v krátkém intervalu článkovými vozidly se nabízí využití dvouzdrojových trolejbusů, obecně je ale přípustné jakékoliv provedení elektrobuseů, které by zde neměly narážet na svoje limity.

6.1.3 Délky do 50 km

Linky sahající do zhruba 6. tarifního pásma (od Prahy) obecně jezdí v delších intervalech jak linky dříve vydělené, především už ale nejdou obsloužit všemi typy elektrobuseů. Základní řešení by mělo spočívat buď v elektrobusech s pomalým nabíjením (Overnight Charging), anebo ve vozidlech vybavených palivovými články. Alternativně se nabízí použití elektrobuseu dobíjeného např. z dvoupólového vedení trolejbusového typu, které by ale v některých aplikacích muselo být zřízeno na obou koncích linky.

Elektrobus ve verzi Opportunity Charging nemá dostatečný dojezd, resp. by bylo nutné zřizovat ekonomicky velmi nákladné nácestné rychlonabíječky, což by navíc mělo negativní vliv na celkovou délku jízdních dob. Dvouzdrojový trolejbus by se ani při uvážení výstavby trolejového vedení na zhruba 25 % délky linky nevyplatil, jelikož četnost spojů v koncových úsecích bývá příliš malá. Jestliže má být vystavěno co nejméně nákladného dvoupólového vedení, poté ale musí být např. ve všech stoupáních bez ohledu na traťové intervaly v daném úseku.

6.1.4 Délky nad 50 km

Narůstající délka linky redukuje množství přípustných řešení. Pro dlouhé linky nad 50 km se dá uvažovat buď nad elektrobusem s palivovými články, anebo – ovšem s rizikem extrémního nárůstu počtu vozidel obsluhujících linku – nad elektrobusem s pomalým nabíjením (Overnight Charging). Elektrifikace těchto linek bude s ohledem technologické limity (buť se stále posunující) patřit mezi nejnáročnější a lze s ní počítat ve středně- až dlouhodobém horizontu.

6.2 LINKY LOKÁLNÍ ZAJIŠŤOVANÉ NÍZKOKAPACITNÍMI VOZIDLY

Specifická kategorie linek obsluhovaných autobusy kategorií Mn a Md není z hlediska volby alternativního pohonu složitá, neboť paleta přípustných řešení je stanovena nabídkou výrobců. Pro midibusové linky lze uvažovat o elektrobusech ve verzi Overnight anebo Opportunity Charging (případně kombinaci těchto přístupů), zatímco minibusy jsou dostupné pouze ve verzi pro pomalé noční nabíjení. S ohledem na nižší kilometrické délky oběhů by elektrifikace těchto linek neměla představovat větší problém.

6.3 LINKY REGIONÁLNÍ

Na rozdíl od linek příměstských zde neuvažujeme využití synergického efektu s městskou infrastrukturou pro vozidla s alternativními pohony, neboť předpokládáme, že se ve výchozích bodech linek žádná taková infrastruktura zkrátka nenachází.

Elektrifikace těchto linek by měla být založena na elektrobusech, přičemž přípustné jsou všechny varianty (Opportunity Charging, Overnight Charging, různé mezistupně i verze s palivovými články). Pro šejdrové oběhy dlouhé do zhruba 200 km by měla být nejlepší volbou pomalu nabíjená vozidla, neboť takové řešení nevyvíjí extrémní nároky na energetickou síť. Obecně lze vycházet z kapitoly 6.1.

6.4 LINKY DÁLKOVÉ

Nejproblematictější místo bezesporu představují linky dálkové, reprezentované v prostředí PID linkami mezikrajskými, zpravidla částečně provozovanými po dálnici. Omezujícím kritériem pro provoz lokálně bezemisních čistých vozidel v dálkové dopravě není pouze jejich dojezd, nýbrž také vysoké rychlosti, které jej značně negativně ovlivňují.

Zavádění alternativních pohonů v dálkové dopravě přijde na řadu jako poslední. S ohledem na aktuální technické možnosti lze uvažovat v podstatě pouze o elektrobusech s vodíkovými palivovými články, neboť ostatní řešení nemají dostatečnou kapacitu energie na celodenní obsluhu dálkových relací.

6.5 SHRNUŤÍ

Stanovit obecně platná kritéria pro způsob výběru konkrétního alternativního pohonu nelze. Alespoň částečně lze ovšem charakterizovat silné a slabé stránky jednotlivých vozidel, o což se snaží přiložené Tab. 5 a Tab. 6 dle následujícího schématu. Jako referenční je použitý dieselový autobus.

● pozitivní vztah k parametru (silná stránka)

● neutrální vztah k parametru

● negativní vztah k parametru (slabá stránka)

– žádný vztah k parametru

Tab. 5 Vztah alternativních pohonů a vlastností linek.

		Dieselový autobus	Trolejbus	Dvouzdrojový trolejbus	Elektrobus (Overnight Charging)	Elektrobus s palivovými články (Fuel Cell)	Elektrobus (Opportunity Charging)	Elektrobus (kombinovaný)
linka délky	do 20 km	●	●	●	●	●	●	●
	do 50 km	●	●	●	●	●	●	●
	nad 50 km	●	●	●	●	●	●	●
nízký interval (linkový i traťový)		●	●	●	●	●	●	●
kategorie vozidel	Mn	●	●	●	●	●	●	●
	Md	●	●	●	●	●	●	●
	Sd (Md+)	●	●	●	●	●	●	●
	Kb (Sd+)	●	●	●	●	●	●	●
	Kb+	●	●	●	●	●	●	●
provoz oběhu	na 1 lince	●	●	●	●	●	●	●
	ve svazku linek	●	●	●	●	●	●	●
	na různých linkách	●	●	●	●	●	●	●
nepříznivé sklonové poměry	●	●	●	●	●	●	●	
provoz po rychlostních komunikacích	●	●	●	●	●	●	●	
malý podíl celodenních oběhů (kvůli možnosti dobití)	–	–	–	●	●	●	●	
omezená podjezdová výška	●	●	●	●	●	●	●	

Tab. 6 Vlastnosti vozidel s alternativními pohony.

dojezd na jedno nabití	–	–	●	●	●	●	●
denní dojezd	●	●	●	●	●	●	●
závislost na infrastruktuře	●	●	●	●	●	●	●
zásadní ovlivnění nepravidelnostmi v provozu	–	–	●	●	●	●	●
nároky na kapacitu obratišť	●	●	●	●	●	●	●

7 VZTAH ALTERNATIVNÍCH POHONŮ A PRAVIDELNOSTI PROVOZU

Nedílnou součástí provozu jsou zdržení. Ta jsou pro plánování oběhů čistých vozidel s lokálně nulovými emisemi důležitá opět především s ohledem na jejich omezený dojezd a v některých případech i ve vztahu k nutnosti zajistit dostatečné nabití akumulátorů před dalším spojem.

7.1 DRUHY DOB ZDRŽENÍ

Podle přednášky Ing. Steffena Dutsche z TU Dresden se doby zdržení dělí podle směru na podélné a příčné, dle dopravního prostředku na externí a interní, dále dle pravidelnosti zdržení na náhodná a relativně pravidelná a konečně podle druhu světelné signalizace. Zatímco poslední jmenovaný druh není pro řešenou úlohu relevantní (počítá se s ním v jízdách), zbytek může v různých kombinacích hrát při zavádění alternativních pohonů zásadní roli. [27]

7.2 ZDRŽENÍ EXTERNÍ

Především podélné směrové zdržení je každodenní součástí provozu nejen ve městech, ale rovněž v extravilánu. Na půdě Pražské integrované dopravy vznikají největší kongesce na území hlavního města Prahy – v ranní a odpolední špičce na komunikacích vedoucích z, resp. do Středočeského kraje, v období mezi nimi poté v širším centru sídla a na městských okruzích. Obdobně vypadá situace i v jiných menších městech.

Tato zdržení se řadí mezi pravidelná a v některých relacích přes pracovní týden pravidelně dosahují vyšších hodnot desítek minut. Provozní koncept počítající se zahrnutím alternativních pohonů musí být vůči takovému zdržení robustní, a to i za cenu nárůstu počtu vypravených vozidel ve špičkách.

Při zavádění dvouzdrojových trolejbusů je vhodné úseky vybavené trolejovým vedením lokalizovat do míst, která jsou častým zdrojem zdržení. Důvodem je především kapacita použité baterie, která je u tzv. parciálních trolejbusů s ohledem na její cenu i hmotnost nízká.

V případě elektrobusů kombinovaných a ve verzi Opportunity Charging je nutné vozidlo do místa zdržení dostat s adekvátní zásobou elektrické energie. Zároveň by se po dojetí dotčeného spoje mělo počítat s dostatečně dlouhou přestávkou na dobití elektrobusu, která bude obsahovat rezervu odpovídající očekávanému zdržení (v příměstském

provozu se zdá být nutností). Elektrobusy nabíjené pomalu anebo vybavené palivovými články nejsou na podobné problémy náchylné, jelikož se nenabíjí průběžně.

Náhodná zdržení nelze predikovat, což znamená, že by musí být pokryta rezervou v kapacitě baterie.

7.3 ZDRŽENÍ INTERNÍ

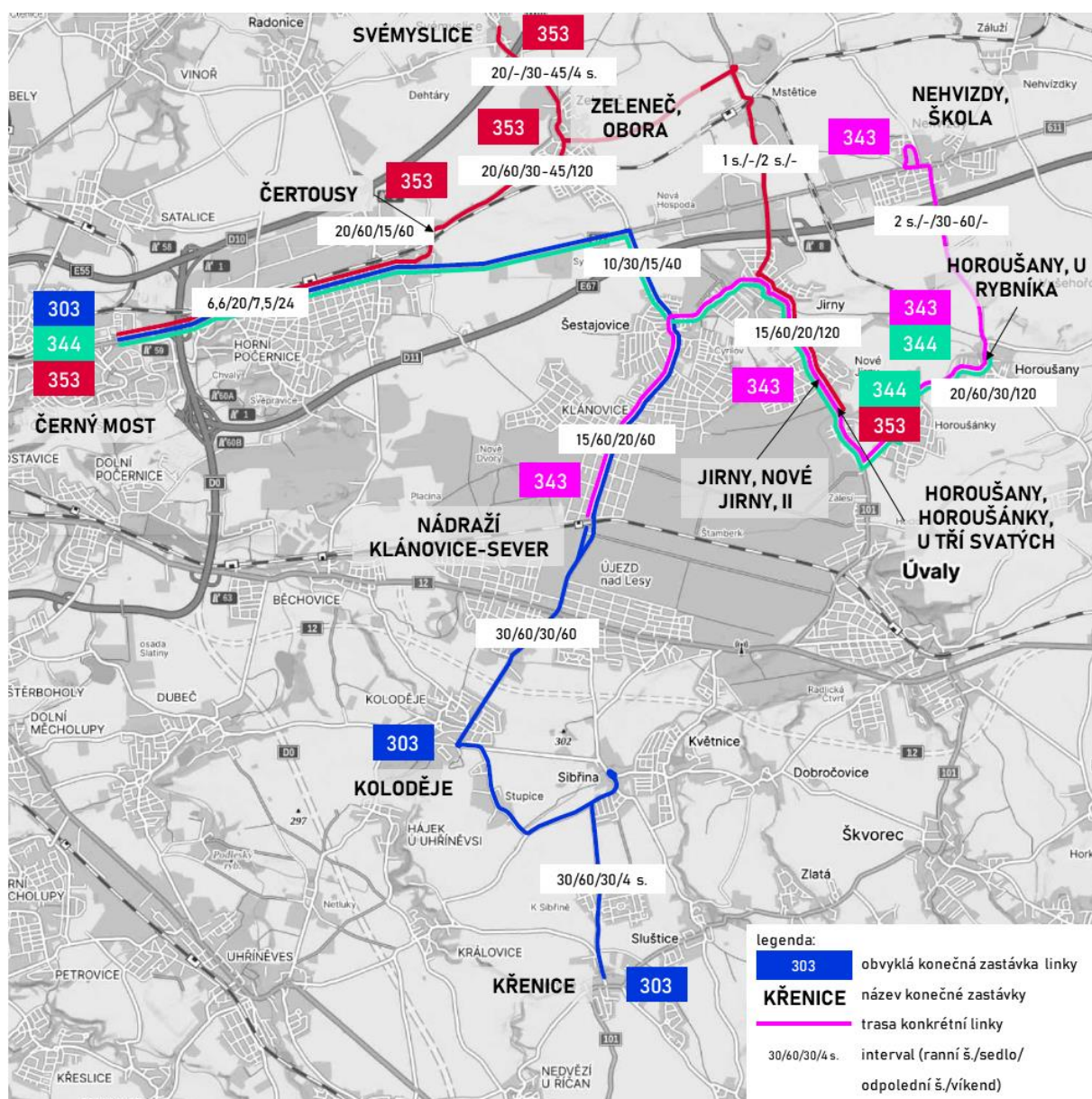
Aplikace čistých, lokálně bezemisních vozidel může přinášet také zdržení interní, způsobená jinými vozidly hromadné dopravy.

Dvouzdrojové trolejbusy mohou být ovlivněny zdržením v podélném směru, což souvisí s odbavováním cestujících předními dveřmi (na území hl. m. Prahy pouze ve směru z centra). Lze ovšem předpokládat, že tato zdržení mezi vozidly vypravenými na různých linkách se budou pohybovat maximálně v řádu desítek sekund.

Při užití elektrobusů s průběžným nabíjením je nutné tuto infrastrukturu dostatečně dimenzovat tak, aby v provozu nedocházelo ke zpoždění z důvodu čekání vozidla na uvolnění nabíjecího místa, což by bylo nepřípustné.

8 NÁVRH VHODNÉHO PROVOZNÍHO KONCEPTU VE VYBRANÉ OBLASTI

Zakončení celé práce spočívá v aplikaci čistých, lokálně bezemisních vozidel v konkrétním provozním souboru v rámci systému Pražské integrované dopravy. Za tímto účelem byly zvoleny linky č. 303, 344 a 353 výchozí z Černého Mostu na východě Prahy, které jsou provozovně provázány ještě s linkou č. 343. V pracovní dny provoz linek zajišťuje 16 kmenových vozidel kategorie 5d, o víkendu poté čtvrtina autobusů z tohoto počtu. Linky vesměs plní kritéria z kapitoly 6.1.2 a jsou tedy vhodné pro elektrifikaci jakýmkoliv druhem bateriového vozidla včetně tzv. parciálních trolejbusů.



Obr. 11 Řešené linky a souhrnné intervaly zakreslené do mapového podkladu. (zdroj: mapy.cz, zákres: Matěj Stach)

Posuzovány budou 4 varianty, přičemž vedle trolejbusu s bateriovým pohonem půjde o elektrobus ve verzi Overnight Charging, Opportunity Charging a kombinovaný. S ohledem na závěry učiněné v kapitole č. 4 nebude posuzována varianta vodíkového elektrobusu, resp. elektrobusu s vodíkovým prodlužovačem dojezdu a ani klasického trolejbusu.

8.1 PARAMETRY LINEK A JEJICH PROVOZ

Autobusové linky č. 303, 344 a 353 jsou denní příměstské autobusové linky, které spojují obce na východ od Prahy s Horními Počernicemi a terminálem Černý Most. V současné době jejich provoz zajišťuje společnost ARRIVA CITY, kterou má od 1. prosince 2024 vystřídat dopravce ČSAD POLKOST. Ten ovládl výběrové řízení v oblasti D6, do níž všechny dotčené linky spadají (smlouva zatím podepsána nebyla). [28]

Výše jmenované linky jsou v provozu celodenně a celotýdenně, přičemž je doplňuje linka č. 343, která je v provozu pouze ve špičkách pracovních dnů a dále plní roli linky školní.

Vypsané provozní parametry odpovídají referenčním jízdním řádům, které byly přílohou zadávací dokumentace k výběrovému řízení na oblast D6. Uvedené trasy nejsou vyčerpávajícím výčtem všech existujících variant daných linek, nýbrž pouze nejčastějšími verzemi spojů. Tučně jsou vyznačeny případné základní varianty tras. [4]

8.1.1 Linka č. 303

trasa: Černý Most – Nádraží Horní Počernice – Na Kovárně – Šestajovice, Za Stodolami – Nádraží Klánovice / Nádraží Klánovice-sever – Újezd nad Lesy – Koloděje (– Sibřina – Křenice)

délka trasy (tam)	23,2 km / 47 minut (Černý Most – Křenice) 16,7 km / 35 minut (Černý Most – Koloděje)
délka trasy (zpět)	22,9 km / 46 minut (Křenice – Černý Most) 16,4 km / 34 minut (Koloděje – Černý Most)
interval	20–30/60/30 minut (PD) 60 minut (SONE)
vypravenost	11 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; PD) 4 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; SONE)

8.1.2 Linka č. 343

trasa 1: *Nádraží Klánovice-sever – Jirny – Jirny, Nové Jirny, II*

trasa 2 (pouze školní spoje): *(Jirny, Nové Jirny, II – Horoušany, Horoušánky, U Tří svatých) – Horoušany, U Rybníka – Nehvizdy, Škola*

délka trasy 1 (tam)	6,4 km / 14 minut
délka trasy 1 (zpět)	6,4 km / 14 minut
délka trasy 2 (tam)	3,3 km / 7 minut
délka trasy 2 (zpět)	3,4 km / 7 minut
interval	trasa 1: 30–50/–/60 minut (PD) trasa 2: 2 s./ –/30–60 minut (PD) - (SONE)
vypravenost	8 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; PD)

8.1.3 Linka č. 344

trasa: *Černý Most – Nádraží Horní Počernice – Na Kovárně – Šestajovice, Za Stodolami – Jirny – Jirny, Nové Jirny, II – Horoušany, Horoušánky, U Tří svatých (– Horoušany, U Rybníka)*

délka trasy (tam)	16,1 km / 32 minut (Černý Most – Horoušany, U Rybníka) 12,7 km / 26 minut (Černý Most – H., H., U Tří svatých)
délka trasy (zpět)	16,3 km / 32 minut (Horoušany, U Rybníka – Černý Most) 12,9 km / 26 minut (H., H., U Tří svatých – Černý Most)
interval	10–27/60/30 minut (PD) 120 minut (SONE)
vypravenost	12 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; PD) 3 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; SONE)

8.1.4 Linka č. 353

trasa: *Černý Most – Nádraží Horní Počernice – Na Kovárně – Čertousy (– Zeleneč – Zeleneč, Obora – Svémyslice) / (– Zeleneč – Jirny, Nové Jirny, II – Horoušany, Horoušánky, U Tří svatých (pouze školní spoje))*

délka trasy (tam)	5,3 km / 12 minut (Černý Most – Čertousy) 9,5 km / 20 minut (Černý Most – Svémyslice) 8,1 km / 18 minut (Černý Most – Zeleneč, Obora) 15,7 km / 30 minut (Černý Most – H., H., U Tří svatých)
délka trasy (zpět)	5,5 km / 13 minut (Čertousy – Černý Most)

	9,6 km / 22 minut (Svémyslice – Černý Most) 8,2 km / 19 minut (Zeleneč, Obora – Černý Most) 15,9 km / 31 minut (H., H., U Tří svatých – Černý Most)
interval	20/60/15–30 minut (PD) 60 minut (SONE)
vypravenost	6 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; PD) 3 Sd (s přejezdy na ostatní řešené linky; SONE)

8.1.5 Tvorba kongescí a další provozní omezení

Řešené linky č. 303, 344 a 353 projíždějí ulicí Náchodská (pokračování silnice II/611) v Praze – Horních Počernicích, kde dochází v ranní i odpolední špičce k tvorbě kongescí, jak ukazují také Tab. 7 a Tab. 8.

Tab. 7 Navýšení zpoždění linek mezi zastávkami Na Kovárně a Černý Most v ranní špičce.

Spoj	Odjezd	Zpoždění		Příjezd	Zpoždění		Navýšení zpoždění		
		12.10.2022	19.04.2023		12.10.2022	19.04.2023	12.10.2022	19.04.2023	
353/1012	6:49	0:05:40	0:00:39	6:59	0:13:33	0:02:20	0:07:53	0:01:41	
344/1016	6:52	0:03:27	0:05:38	7:02	0:10:36	0:07:09	0:07:09	0:01:31	
303/1014	7:04	0:04:43	0:06:54	7:14	0:10:27	0:08:46	0:05:44	0:01:52	
353/1014	7:09	0:04:48	0:03:40	7:19	0:10:13	0:05:36	0:05:25	0:01:56	
344/1020	7:12	0:03:17	0:08:40	7:22	0:08:18	0:10:03	0:05:01	0:01:23	
344/1022	7:22	0:03:03	0:04:52	7:32	0:06:45	0:07:00	0:03:42	0:02:08	
303/1018	7:24	0:06:40	0:08:24	7:34	0:10:48	0:14:13	0:04:08	0:05:49	
353/1018	7:29	0:05:41	0:01:57	7:39	0:07:01	0:06:19	0:01:20	0:04:22	
344/1024	7:32	0:01:47	0:05:55	7:42	0:04:54	0:11:14	0:03:07	0:05:19	
303/1020	7:44	0:10:54	0:11:14	7:54	0:17:06	0:19:02	0:06:12	0:07:48	
353/1022	7:44	0:15:30	0:02:48	7:54	0:26:37	0:07:11	0:11:07	0:04:23	
353/1020	7:49	0:04:56	0:05:05	7:59	0:13:05	0:09:07	0:08:09	0:04:02	
344/1026	7:59	0:03:00	0:08:14	8:09	0:06:11	0:12:38	0:03:11	0:04:24	
303/1022	8:14	0:00:25	0:01:19	8:24	0:11:40	0:03:39	0:11:15	0:02:20	
353/1026	8:14	0:00:13	0:00:15	8:24	0:11:26	0:01:29	0:11:13	0:01:14	
344/1028	8:29	0:03:28	0:04:31	8:39	0:11:19	0:08:21	0:07:51	0:03:50	
353/1028	8:39	0:06:03	0:01:08	8:49	0:09:13	0:04:18	0:03:10	0:03:10	
303/1024	8:44	0:08:13	0:02:31	8:54	0:10:55	0:04:18	0:02:42	0:01:47	
353/1030	8:59	0:00:16	0:01:56	9:09	0:02:43	0:03:01	0:02:27	0:01:05	
344/1030	9:14	0:03:56	0:02:21	9:24	0:08:09	0:04:37	0:04:13	0:02:16	
							průměr:	0:05:45	0:03:07
							maximum:	0:11:15	0:07:48
							minimum:	0:01:20	0:01:05

Tab. 8 Navýšení zpoždění linek mezi zastávkami Černý Most a Na Kovárně v odpolední špičce.

Spoj	Odjezd	Zpoždění		Příjezd	Zpoždění		Navýšení zpoždění	
		12.10.2022	19.04.2023		12.10.2022	19.04.2023	12.10.2022	19.04.2023
344/1025	13:20	0:00:56	0:00:14	13:30	0:03:25	0:02:34	0:04:21	0:02:48
303/1035	13:30	0:02:33	0:01:35	13:40	0:02:55	0:02:54	0:05:28	0:04:29
353/1039	13:43	0:01:58	0:00:48	13:53	0:04:23	0:01:58	0:06:21	0:01:10
344/1027	13:50	0:01:35	0:03:30	14:00	0:04:31	0:07:13	0:06:06	0:03:43

303/1037	14:00	0:01:34	0:02:30	14:10	0:05:20	0:02:08	0:06:54	0:04:38	
353/1041	14:13	0:00:35	0:00:54	14:20	0:03:23	0:02:08	0:03:58	0:03:02	
344/1029	14:20	0:00:33	0:00:09	14:30	0:06:16	0:06:51	0:06:49	0:06:42	
303/1039	14:30	0:00:52	0:00:25	14:40	0:04:55	0:02:46	0:05:47	0:02:21	
353/1043	14:43	0:02:01	0:00:41	14:53	0:00:51	0:03:16	0:02:52	0:02:35	
344/1031	14:50	0:02:11	0:00:22	15:00	0:09:20	0:02:30	0:07:09	0:02:52	
303/1041	15:00	0:01:00	0:00:34	15:10	0:05:13	0:02:33	0:04:13	0:03:07	
353/1045	15:13	0:01:37	0:00:50	15:23	0:03:26	0:02:12	0:05:03	0:01:22	
344/1033	15:20	0:00:23	0:01:08	15:30	0:08:07	0:02:33	0:08:30	0:03:41	
353/1047	15:28	0:01:34	0:00:39	15:38	0:03:01	0:02:45	0:04:35	0:02:06	
303/1043	15:30	0:00:13	0:00:00	15:40	0:04:31	0:02:15	0:04:44	0:02:15	
353/1049	15:43	0:00:58	0:00:52	15:53	0:02:47	0:02:46	0:01:49	0:01:54	
344/1035	15:50	0:00:00	0:01:59	16:00	0:03:36	0:03:19	0:03:36	0:05:18	
353/1051	15:58	0:00:47	0:00:32	16:08	0:04:44	0:02:30	0:05:31	0:03:02	
303/1045	16:00	0:00:28	0:00:46	16:10	0:04:12	0:05:22	0:03:44	0:04:36	
353/1053	16:13	0:01:39	0:00:13	16:23	0:03:24	0:02:08	0:05:03	0:01:55	
344/1037	16:20	0:01:15	0:02:31	16:30	0:09:21	0:02:08	0:08:06	0:04:39	
353/1057	16:28	0:01:31	0:00:52	16:38	0:02:41	0:03:31	0:04:12	0:04:23	
303/1047	16:30	0:01:04	0:03:11	16:40	0:02:53	0:03:54	0:03:57	0:00:43	
353/1059	16:43	0:00:35	0:01:02	16:53	0:05:44	0:02:20	0:06:19	0:03:22	
344/1039	16:50	0:00:04	0:00:47	17:00	0:06:11	0:05:24	0:06:07	0:06:11	
353/1061	16:58	0:01:54	0:00:31	17:08	0:02:59	0:03:11	0:04:53	0:02:40	
303/1049	17:00	0:00:11	0:00:03	17:10	0:07:12	0:04:37	0:07:01	0:04:34	
353/1063	17:13	0:01:09	0:00:59	17:23	0:03:59	0:03:55	0:05:08	0:04:54	
344/1041	17:20	0:02:46	0:01:05	17:30	0:02:38	0:03:39	0:05:24	0:04:44	
353/1065	17:28	0:02:13	0:00:22	17:38	0:04:44	0:02:42	0:06:57	0:03:04	
303/1051	17:30	0:00:33	0:00:45	17:40	0:03:35	0:01:57	0:04:08	0:01:12	
353/1067	17:43	0:00:45	0:00:56	17:53	0:02:53	0:02:17	0:03:38	0:03:13	
344/1043	17:50	0:01:42	0:02:40	18:00	0:04:27	0:06:24	0:06:09	0:03:44	
303/1053	18:00	0:00:00	0:01:26	18:10	0:05:53	0:02:12	0:05:53	0:03:38	
353/1069	18:13	0:01:50	0:01:12	18:23	0:02:56	0:03:52	0:04:46	0:02:40	
344/1045	18:20	0:00:13	0:02:21	18:30	0:07:49	0:00:19	0:07:36	0:02:40	
							průměr:	0:05:21	0:03:20
							maximum:	0:08:30	0:06:42
							minimum:	0:01:49	0:00:43

V ranní špičce nabraly spoje v úseku Na Kovárně – Černý Most v průměrnou říjnovou (12. 10. 2022) a dubnovou středu (19. 4. 2023) zpoždění zhruba 4,5 minuty. Vybraná vozidla se v úseku zdržela až o 11 minut navíc oproti jízdnímu řádu.

Odpolední špička znamenala pro spoje mezi Černým Mostem a zastávkou Na Kovárně na okraji zástavby Horních Počernic nabytí okolo 4,3 minuty zpoždění. Některé autobusy úsekem projely pouze s mírným navýšením zdržení, nejvyšší hodnoty poté dosáhly 7–8 minut. Alarmující je skutečnost, že 45 ze 72 autobusů odjelo z terminálu Černý Most s předstihem (červené hodnoty v Tab. 8), z nichž některé o více jak nepřijatelné 0:59.

Autorovi je dále známo, že se na trase linky č. 353 v ulici Bártlova i po rekonstrukci železniční tratě č. 231 nachází železniční most s podjezdnou výškou 3,1 m (dle osazeného

SDŽ), který znemožňuje nasazení jakéhokoliv vozidla s elektrickým pohonem. Pro potřeby práce se počítá s nutností jeho přestavby, neboť jím neprojedou ani vybrané diesellové autobusy s klimatizací.

8.2 VÝCHOZÍ OBĚHY VOZIDEL A OBSAZENOST OBRATIŠŤ

Pro potřeby této práce budou využity vozové jízdní řády, které byly 2. přílohou zadávací dokumentace pro oblast D6 a vychází z referenčního jízdního řádu.

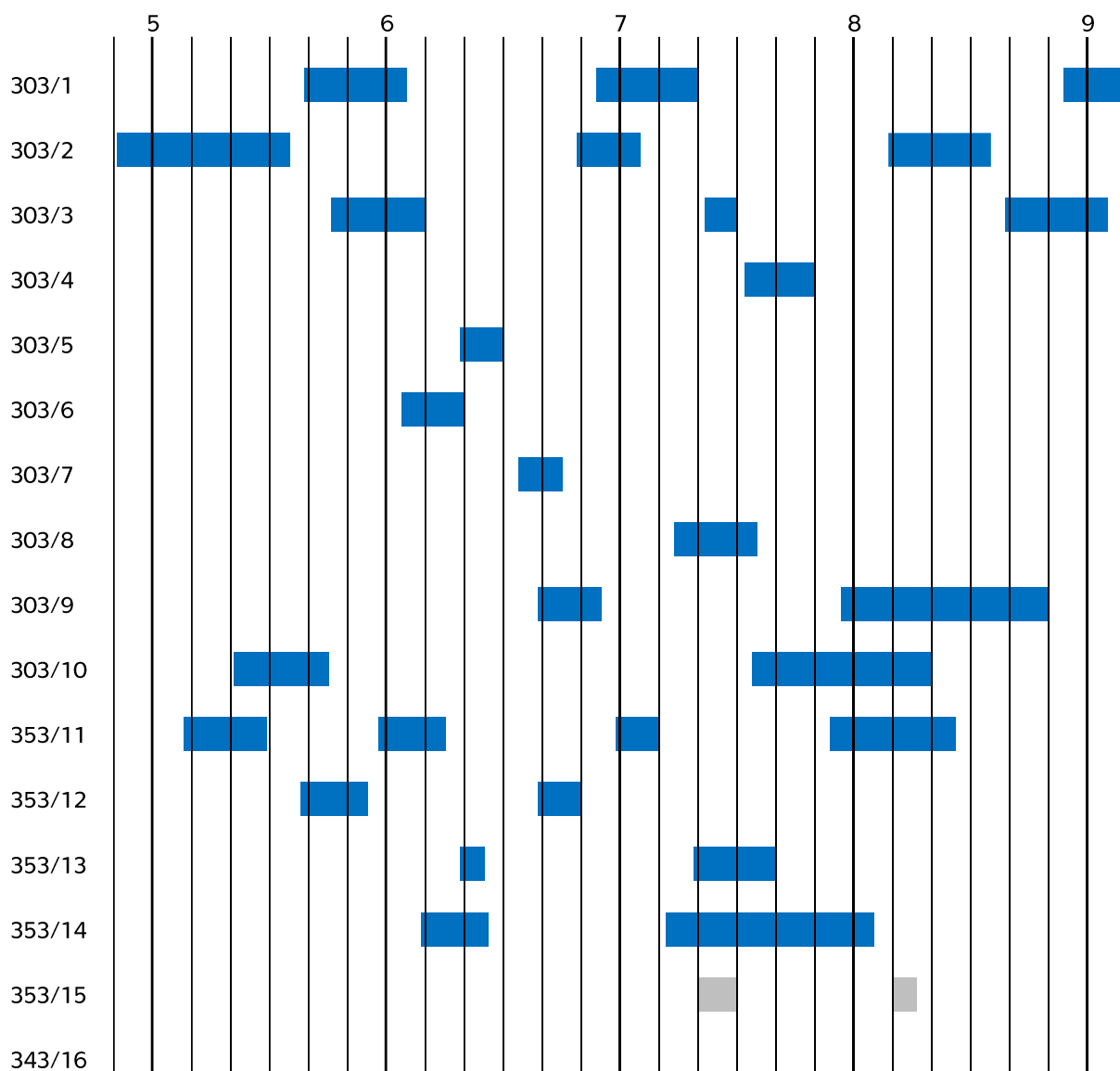
Tab. 9 Seznam výchozích oběhů vozidel.

Oběh	Ranní část	Odpolední část	Denní proběh	Přejezdy na linky
	[km]	[km]	[km]	
pracovní dny:				
303/1	167,140	248,980	416,120	303, 343, 344
303/2	184,190	230,480	414,670	303, 343, 344
303/3	193,460	232,200	425,660	303, 343, 344
303/4	172,37		172,37	303, 344
303/5	205,09		205,09	303, 343, 344
303/6	193,01		193,01	303, 343, 344
303/7	173,56		173,56	303, 343, 344
303/8	166,35		166,35	303, 344
303/9	163,24		163,24	303, 344, 353
303/10	106,49		106,49	303, 344
353/11	127,57	173,32	300,89	353
353/12	133,85		133,85	353
353/13	101,96		101,96	353
353/14	151,79		151,79	303, 344, 353
353/15	121,23		121,23	343, 344, 353, 484
343/16	146,82		146,82	343
soboty:				
303/1	211,2	210,64	421,84	303, 344, 353
303/2	178,43	179,66	358,09	303, 344, 353
303/3	166,23	161,68	327,91	303, 344, 353
303/4	99,9	134,4	234,3	303
neděle:				
303/1	211,2	210,64	421,84	303, 344, 353
303/2	178,43	179,66	358,09	303, 344, 353
303/3	166,23	161,68	327,91	303, 344, 353
303/4	244,9		244,9	303, 354

S ohledem na povahu pořadí 353/15, které zajišťuje převážně spoje na lince 484 (Úvaly – Horoušany – Úvaly), není uvažována elektrifikace tohoto oběhu. Výsledný počet řešených pořadí tedy bude 15 v pracovní dny, resp. 4 o víkendu.

Velmi důležitá je ve vztahu k výstavbě nabíjecí infrastruktury znalost obsazenosti obratišť v průběhu dne. Zatímco mimo území Prahy se v nich vozidla nesetkávají (anebo k tomu dochází velmi výjimečně), situace v terminálu Černý Most – výchozím bodě linek č. 303, 344 a 353 – se značně liší.

Během ranní špičky (viz Obr. 12) se v obratišti může sjet až pět vozidel najednou, odpoledne jde poté o čtyři autobusy. V obou případech jsou to krátkodobé překryvy v řádu jednotek minut, které při zvážení doby odbavování cestujících, zahrnutí výstupu pasažérů a zároveň doby manipulace v rámci terminálu zaniknou. Maximálně se tak na odstavné ploše sjedou čtyři vozidla, z nichž ovšem s ohledem na délky pobytů bude nutné nabíjet nejvýše tři. [4]



Obr. 12 Pobyt vozidel v obratišti Černý Most v průběhu ranní špičky na časové ose.

8.3 STANOVENÍ SPOTŘEBY VOZIDEL A MODELOVÝCH OBĚHŮ

Pro určení potřebné kapacity baterií a dobíjecích dob je nutné stanovit spotřebu vozidla, přičemž všechny výpočty musí být dimenzovány na nejhorší možný stav. Vůbec nejvyšší spotřebu elektrické energie má přitom vozidlo vytápěné elektrickým topením, jehož využití se bez výjimek předpokládá (viz 2.1.3).

Tuto úlohu je třeba zjednodušit a vyjít z existujících dat, která ukazují, že spotřeba v takovém provozním režimu osciluje okolo hodnoty 2,5 kWh/km. Správnější by bylo stanovit spotřebu v přepočtu na čas, a to s ohledem na kongesce a obecně delší cestovní doby v intravilánu, to ale pro absenci dat není možné. Při aktivním odstavení se počítá se spotřebou 0,75 kWh/min. [29]

Pro všechny další výpočty je rovněž nutné si uvědomit, že v provozu není možné využít 100 % kapacity baterie. Spodních 20 % kapacity musí zůstat jako rezerva např. kvůli náhodným zdržením, přičemž svou roli zde hrají i vlastnosti samotného akumulátoru. Ze stejného důvodu se ostatně baterie nedobíjí do 100 %, nýbrž pouze do 80–90 %. Kapacita baterie využitelná v provozu tak činí jen 60–70 %, což je nutné zohlednit při dimenzování vlastností vozidel a následně i plánování jejich oběhů. Ve výpočtech bude operováno s využitím 60 % kapacity baterie.

Pokud není stanoveno jinak, počítají grafy průběhu nabití vozidla v následujících kapitolách s průměrnými koly jednotlivých linek, která zahrnují v případě linky č. 303 21 minut pauzy, 9 minut v případě 343, 15 minut v případě 344, 1 minutu v rámci kombinovaného oběhu 344 s přejezdem na 343 a konečně 10, resp. 7 minut pro linku 353 ukončenou v Čertousech, resp. Svémyslicích. Vyobrazeny jsou nejčastější varianty dotčených linek.

Jako referenční pro všechny varianty byl vybrán oběh celodenní 303/2 pro pracovní dny, který má proběh 414,67 km a řadí se tak mezi trojici pořadí s nejvyšším kilometrickým nájezdem (součást Přílohy č. 2). Ranní výtah je počítán z terminálu Černý Most, jelikož lokace provozovny budoucího dopravce je v tuto chvíli neznámá.

8.4 DVOUZDROJOVÝ TROLEJBUS

8.4.1 Návrh úseků s trolejovým vedením

Základem trolejbusové tratě by měl být úsek výchozí z terminálu Černý Most, jenž je sdílený všemi hlavními linkami určenými k elektrifikaci (tj. 303, 344 a 353, resp. dále 303 a 344). Dále se předpokládá jeho doplnění o prodloužení ke klánovickému nádraží, kam v souběhu jezdí linky č. 303 a 343. Celková délka tratě mezi stanovištěm č. 15 na Černém Mostě a obratištěm Nádraží Klánovice-sever je ve směru tam 12 km, ve směru opačném se počítá s výstavbou vedení pouze po světelně řízenou křižovatku Ocelkova x sjezdová rampa Chlumecká v délce 11,6 km tak, aby nedošlo ke vzniku složitých trolejových konstrukcí. Počítá se s výstavbou měničny Sychrov a použitím měničny Metro.

Dotčený úsek pokrývá z obou směrů stoupání do Horních Počernic, kde vozidlo při jízdě z Černého Mostu musí překonat 37 výškových metrů, resp. o 2 metry méně ve směru opačném ze Šestajovic. Zároveň zahrnuje celou délku ulice Náchodská v Horních Počernicích, kde dochází k časté tvorbě kongescí (viz 8.1.5) a tím zhodnocuje klady technologie tzv. parciálního trolejbusu. Doba navíc strávená v úseku pod trolejovým vedením znamená vyšší nabití baterie.

Na Černém Mostě se počítá s vybudováním trojice nabíjecích stop na odstavné ploše terminálu, přičemž tento počet je maximální možný a po dalším prověření může klesnout. Důvodem je fakt, že stacionární dobíjení bude nutné pouze u vybraných přechodů mezi linkami (např. 2 kola linky 303 za sebou) při nepříznivých klimatických podmínkách. Stopy budou napojeny sjezdovou výhybkou a přímo svedeny do trolejbusové tratě výchozí z terminálu. Jedna separátní stopa by poté měla vzniknout také v prostoru obratiště Nádraží Klánovice-sever, a to s ohledem na vozidlo jezdící na oběhu 343/16.

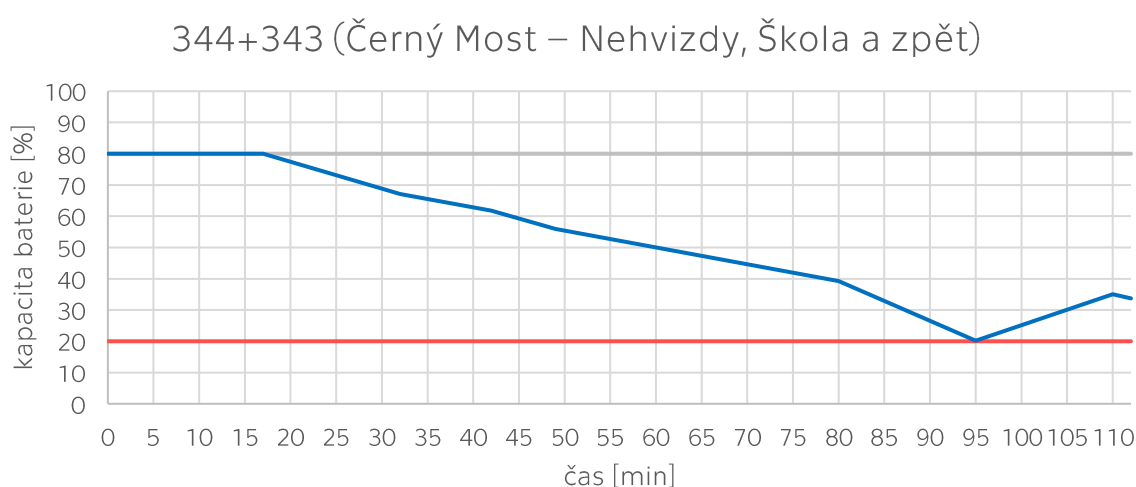
Natrolejovací stříšky by měly vzniknout v zastávce Na Kovárně (do centra), Šestajovice, Za Stodolami (do centra), Šestajovice, Balkán (směr Klánovice), Nádraží Klánovice-sever a na všech nabíjecích stopách.

8.4.2 Nabíjení a kapacita baterie

Stejně jako v případě budovaného trolejbusového systému v Praze se počítá s využitím napětí 750 VDC, které umožňuje dosažení lepších nabíjecích výkonů a přináší menší ztráty.

Během jízdy lze počítat až s proudem 600 A, což znamená výkon 450 kW (7,5 kW/min). Jeho část je ovšem při jízdě pod trolejovým vedením používána pro pohon a další periferní zařízení, navíc do výpočtu vstupuje i omezení výše nabíjecích proudů pro baterii. S ohledem na kolísání velikosti proudu v trolejích lze počítat se nabitím 1,9–3,1 kWh za minutu, což v průměru dělá 2,5 kWh/min.

Při stání je situace jiná, jelikož nabíjení ovlivňuje omezení velikosti proudu, který může procházet skrz botku sběrače. Tato hodnota je maximálně 120 A, což při uvažovaném napětí 750 V dělá hodinový výkon zhruba 90 kW (1,5 kW/min). Na baterii z toho zbyde polovina, tj. 0,75 kW/min. [15]



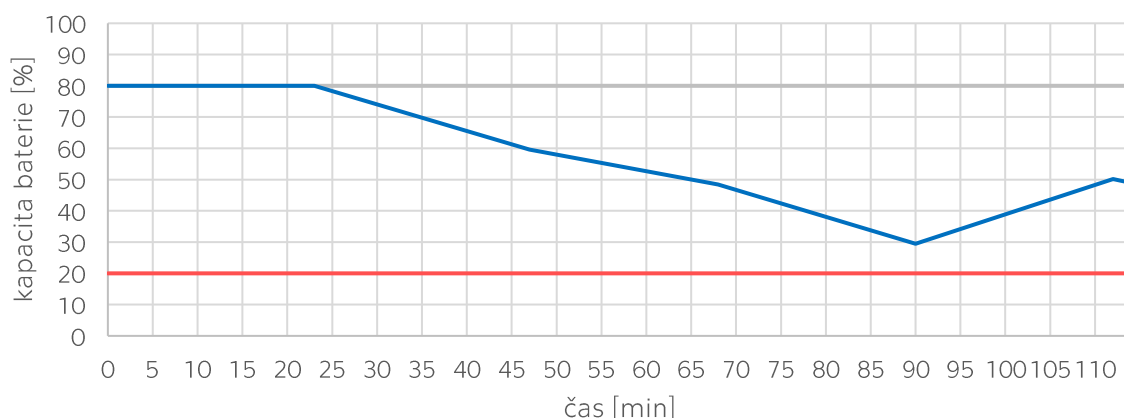
Graf 1 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase při energeticky nejnáročnějším oběhu.

Kapacita baterie byla v tomto případě stanovena dle množství energie nutné pro odjetí energeticky nejnáročnějšího kola. To u dvouzdrojového trolejbusu zahrnuje spoj linky č. 344 v 11:35 z Černého Mostu, navazující kolo linky 343 do Nehvizd a spoj 344 zpět. Oběh celkem trvá 1:59 a vozidlo v rámci něj ujede 39,1 kilometru. Prostojí přitom 41 minut a spotřebuje až $39,1 \cdot 2,5 + 41 \cdot 0,75 = 128,5$ kWh energie (viz Graf 1). Na ujetí souvislého úseku bez trolejového vedení je vynaloženo 83,75 kWh energie. Výsledná kapacita baterie tedy bude 140 kWh, z nichž bude využitelných 84 kWh. Počítá se s využitím článků LTO, které jsou ideální pro časté nabíjení a vybíjení.

8.4.3 Energetická bilance na jednotlivých linkách

Vozidlo na lince č. 303 ujede ve směru do Křenice 50,9 % trasy pod trolejovým vedením, ve směru opačném poté 50,7 %. Při běžném kole definovaném v kapitole 8.3 trolejbus na Černý Most dojde s úbytkem energie ve výši -43,5 kWh, což dělá 31 % kapacity baterie.

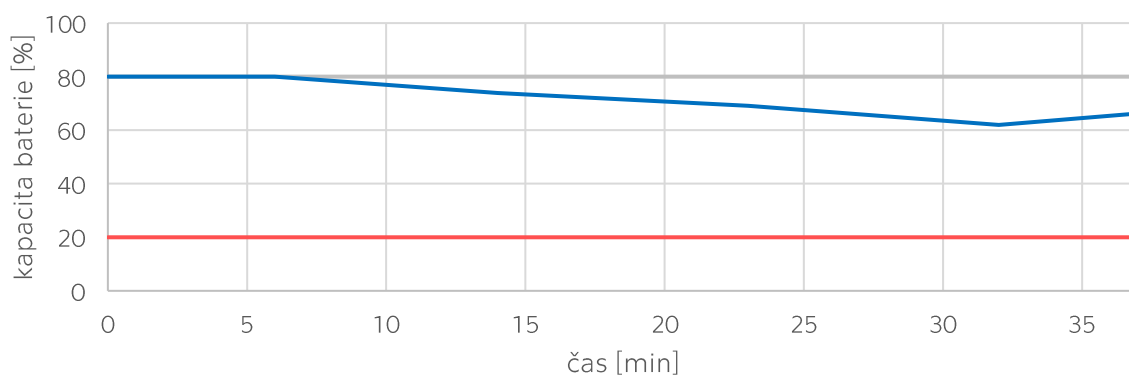
303 (Černý Most – Křenice a zpět)



Graf 2 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

Linka č. 343 v základní verzi trasy 1 (viz 8.1.2) jede ve směru Jirny 46,8 % trasy pod trolejemi, cestou zpět poté 37,5 %. Úbytek energie je -19,25 kWh, což činí 14 % kapacitu akumulátoru.

343 (Nádraží Klánovice-sever – Jirny, Nové Jirny, II a zpět)

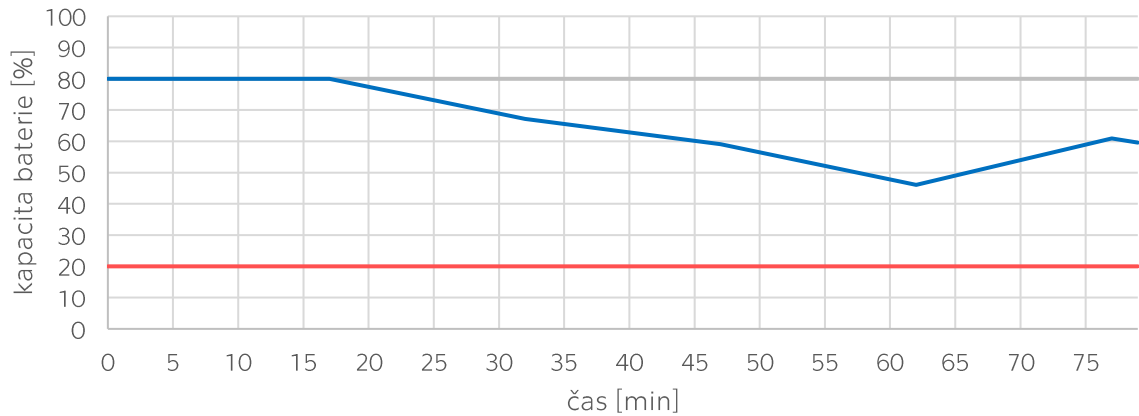


Graf 3 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

Linka č. 344 ve směru do Horoušan, U Rybníka jede 55,3 % trasy pod trolejovým vedením, cestou zpět se poté jedná o 50,9 %. Úbytek energie je činí -28,5 kWh, tedy 20 % kapacity akumulátoru.

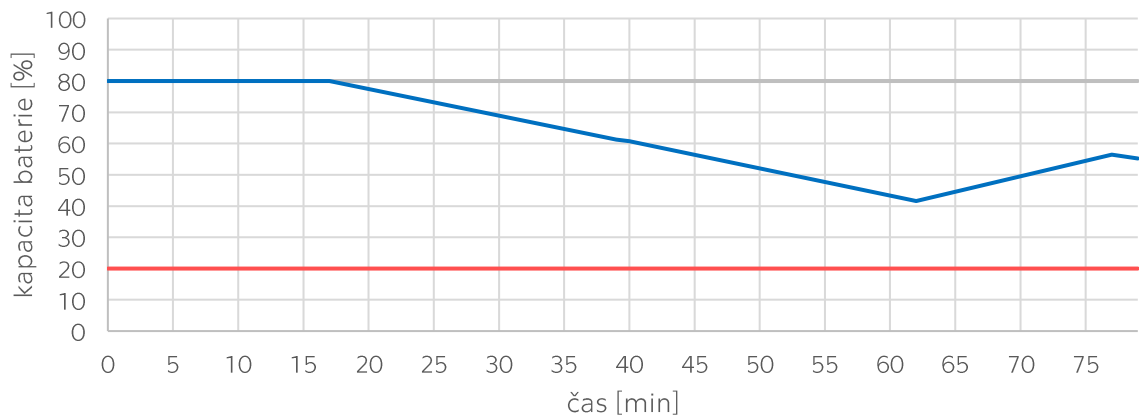
Kombinace linky č. 344 s navazujícím školním oběhem 343 do Nehvizd znamená 45,9 % jízdy pod trolejovým vedením ve směru tam a 42,1 % poté ve směru zpět. Úbytek energie je -34,75 kWh, což činí 25 % kapacity baterie (viz dole).

344 (Černý Most – Horoušany, U Rybníku a zpět)



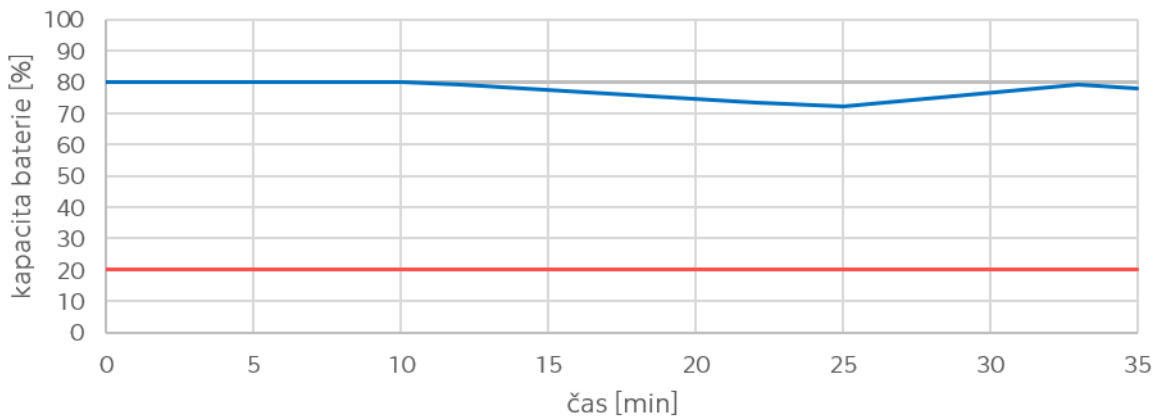
Graf 4 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

344+343 (Černý Most – Nehvizdy, Škola a zpět)



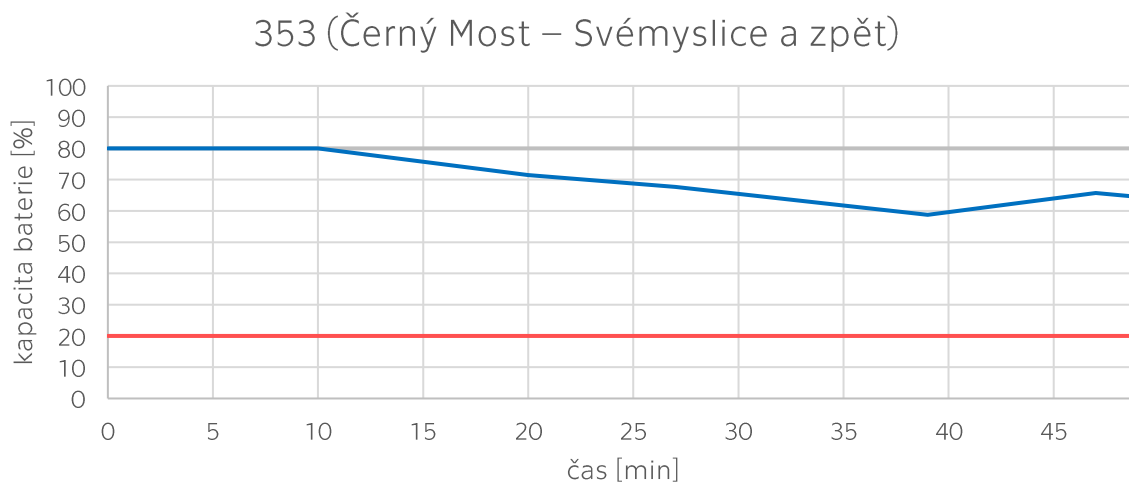
Graf 5 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

353 (Černý Most – Čertousy a zpět)



Graf 6 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

Trolejbus na lince č. 353 jede při krátkém spoji do Čertous 88,7 % trasy pod trolejí, při jízdě zpět jde o 70,9 %. Úbytek energie je -3,25 kWh, tedy pouhá 2 % (viz Graf 6). Dlouhý spoj linky do Svémyslic je po trolejovým vedením trasován z 49,5 %, resp. 40,6 % ve směru opačném. Množství energie klesne o -21,75 kWh (16 %).



Graf 7 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus).

8.4.4 Úprava oběhů a výsledný počet vozidel

Při aplikaci tzv. parciálních trolejbusů je možná náhrada stávajících vozidel v poměru 1:1, není tedy nutné jakkoliv upravovat oběhy. Provozní potřeba v pracovní dny by činila 15 vozidel, což při započtení 20 % záloh dělá 18 trolejbusů s bateriovým pohonem.

8.5 ELEKTROBUS (OVERNIGHT CHARGING)

8.5.1 Nabíjení a kapacita baterie

Základem elektrobuse ve verzi Overnight Charging je pomalé nabíjení v nočních hodinách. To se může uskutečňovat různými způsoby, pro které je společným jmenovatelem výkon do 150 kW (2,5 kWh/min). Jelikož se výkon při zahřátí snižuje, je ve výpočtech kalkulováno s výkonem 100 kW (1,66 kWh/min). Vzhledem ke značně limitovanému dojezdu se počítá s nabíjením také během poledních přestávek, které je provozní nutností. [14]

Při nepříznivých klimatických podmínkách se dá dojezd dále zvýšit průběžným nabíjením. Jelikož příměstský provoz nabízí dostatečně dlouhé pauzy mezi spoji, počítá autor také s touto možností a výstavbou až trojice nabíječek CCS-2 v prostorách terminálu Černý Most (viz 8.2). Ty mohou sloužit pro nabíjení vozidel rovněž během pauz mezi ranní a odpolední špičkou. Tento princip sice jde proti duchu elektrobuse v tomto konkrétním

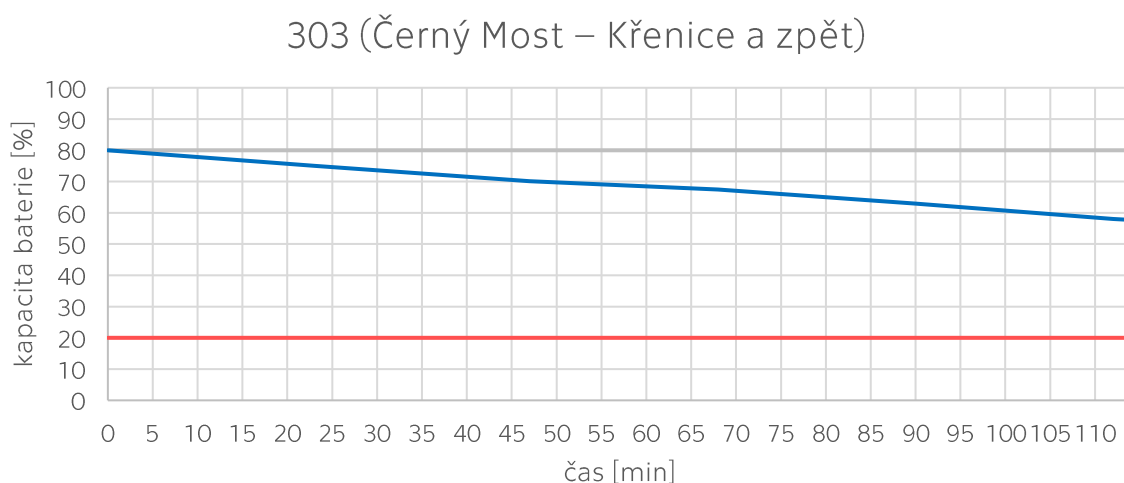
provedení, jde ale o poměrně levný způsob, jakým je možné dále prodloužit dojezd elektrobuse, jehož pořizovací náklady s takto velkou baterií by měly být nejvyšší ze všech posuzovaných variant. Druhou, ale s ohledem na jeho ekonomiku již dříve vyloučenou možností, by bylo použití vodíkového prodlužovače dojezdu.

Maximální kapacita baterie je v tomto případě určena nabídkou na trhu a činí 588 kWh, což je kapacita nabízená Mercedesem-Benz u jeho modelu eCitaro. Použity jsou NMC baterie. Limitující je v tomto případě hmotnost článků, jejichž kapacita se dále může zvýšit pouze při zvýšení energetické hustoty.

Využitelná kapacita baterie je 352,8 kWh, jež by měla při zanedbání pauz pro představu postačovat na ujetí asi 141 kilometrů (při spotřebě 2,5 kWh/km).

8.5.2 Energetická bilance na jednotlivých linkách

Ujetí jednoho průměrného kola linky č. 303 znamená úbytek -131 kWh energie (22 %).



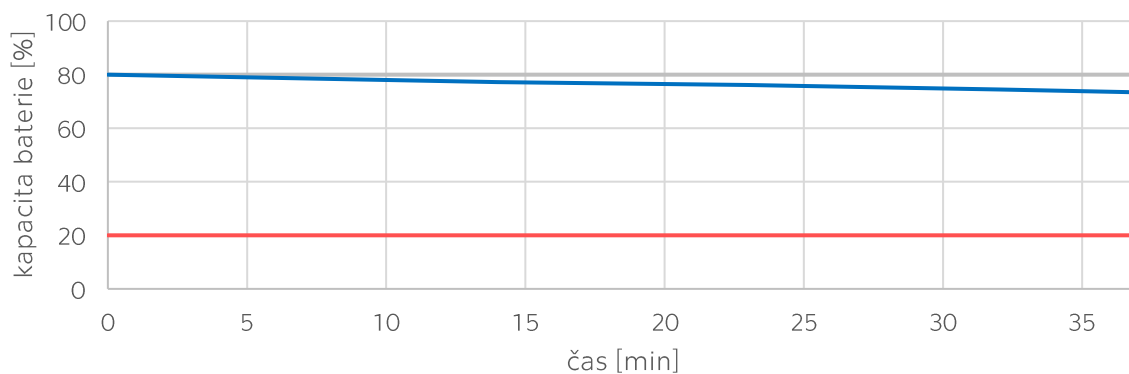
Graf 8 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobuse bez průběžného nabíjení).

Vozidlo na lince č. 343 spotřebuje za jedno kolo -38,75 kWh, tedy 7 % celkové kapacity, což ukazuje i Graf 9.

Linka č. 344 znamená pro elektrobuse úbytek -92,25 kWh energie, což je 16 % kapacity akumulátorů (viz Graf 10).

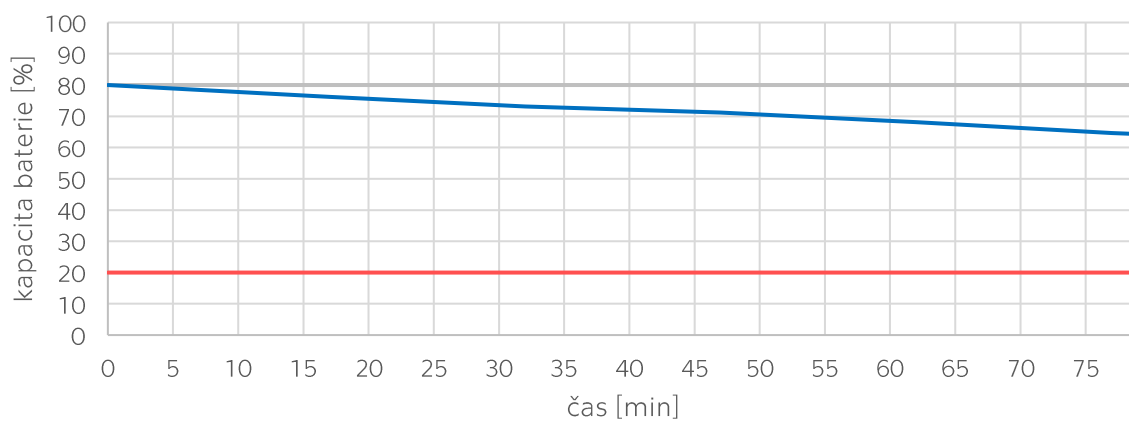
Tandem 344 a 343 z Černého Mostu až do Nehvizd a zpět představuje -98,5 kWh energie, tj. úbytek 17 % kapacity baterie, jak je naznačeno i v Graf 11.

343 (Nádraží Klánovice-sever – Jirny, Nové Jirny, II a zpět)



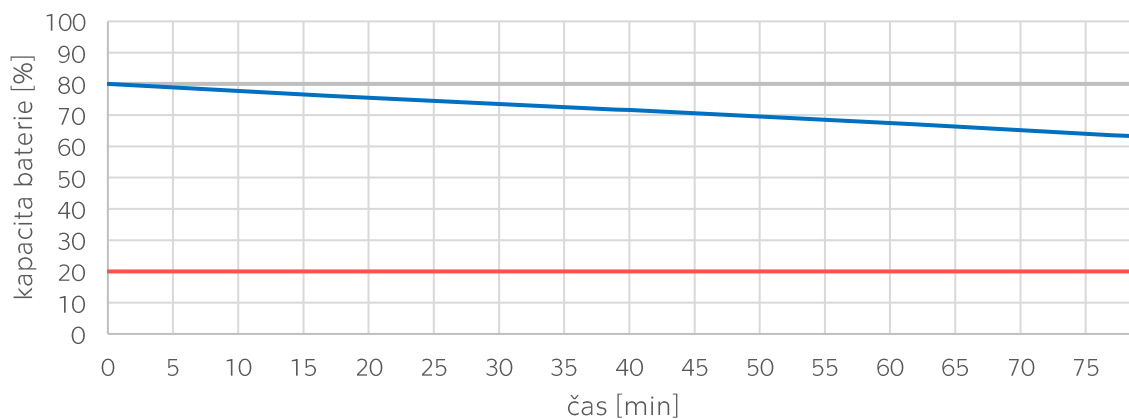
Graf 9 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).

344 (Černý Most – Horoušany, U Rybníku a zpět)



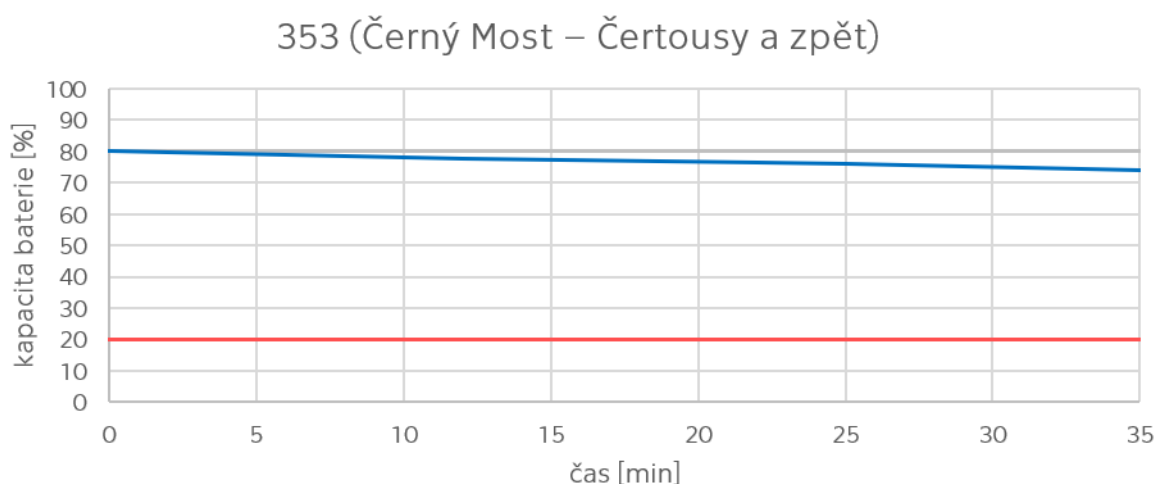
Graf 10 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).

344+343 (Černý Most – Nehvizdy, Škola a zpět)

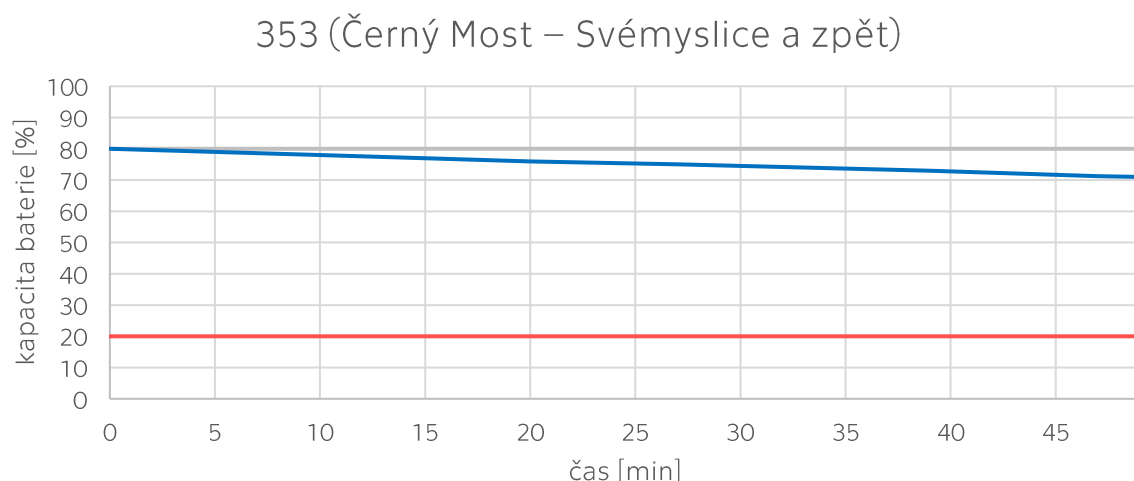


Graf 11 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).

Jedno kolo na lince č. 353 do Čertous znamená úbytek -34,5 kWh energie (6 % kapacity), v případě oběhu Černý Most – Svěmyslice a zpět jde o -53 kWh (9 %).



Graf 12 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobuse bez průběžného nabíjení).



Graf 13 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobuse bez průběžného nabíjení).

8.5.3 Úprava oběhů a výsledný počet vozidel

Vzhledem k limitovanému dojezdu vozidel je nutné každé ze čtyř celodenních pořadí obsloužit dvěma elektrobusey, což zvyšuje provozní potřebu vozidel v pracovní dny až na 19, resp. 23 strojů včetně záložních vozů. Stejný provozní model se předpokládá o víkendech. Po komplexní přestavbě oběhů tento počet může klesnout.

Tab. 10 Výčet provedených úprav v obězích pro pracovní dny.

Pořadí	Změny
303/1	9:35–15:09 a od 21:00 jede jiný vůz (1)

303/2	10:35–16:24 a od 22:00 jede jiný vůz (2)
303/3	9:05–14:39 a od 20:00 jede jiný vůz (3)
303/5	od 19:00 jede jiný vůz (4)
303/9	12:05–13:54 jede jiný vůz (4)
353/11	14:43–18:17 jede jiný vůz (4)

Změny ve směnách řidičů se nepředpokládají, v praxi by tedy řidič za den vystřídal více vozidel. Úpravy dle Tab. 10 si nevyžádají vytvoření žádných směn navíc, kladou ale zvýšené nároky na manipulační jízdní personál.

8.6 ELEKTROBUS (OPPORTUNITY CHARGING)

8.6.1 Návrh rozmístění nabíjecích stanic

Průběžně nabíjené elektrobusesy získávají energii z nabíjecích stanic umístěných zpravidla na každé konečné zastávce. V tomto případě se počítá s instalací trojice nabíjecích stanic v prostorách terminálu Černý Most (viz 8.2), z nichž jedna bude v nástupní zastávce. Ty dále doplní nabíječka v Křenici, Horoušanech, U Rybníku a v obratišti Nádraží Klánovice-sever (linky 303, 343 a 344). Na lince č. 353 se s ohledem na její nízké kilometrické proběhy a střídající se konečné zastávky Čertousy, Zeleneč, Obora a Svémyslice nepočítá s výstavbou nabíječek. Vozidla jí obsluhující tedy budou odkázána pouze na nabíjení v terminálu Černý Most.

Jelikož je v zastávce Nádraží Klánovice-sever zavedena čekací doba na vlaky linek S, může vozidlo jedoucí na lince č. 303 směrem na Černý Most využít nabíječku zřízenou primárně pro linku č. 343. V modelových situacích se s jejím využitím ale nepočítá, jelikož je doba pobytu v zastávce příliš krátká.

8.6.2 Nabíjení a kapacita baterie

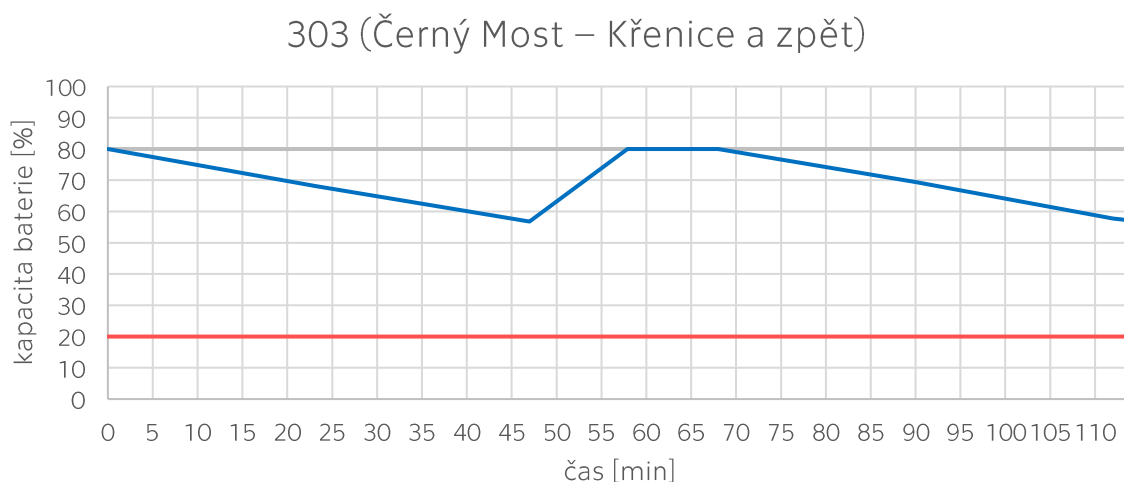
Nabíjecí stanice pro příležitostné nabíjení počítá s nabíjecími výkony až 450 kW. Využití uvedeného maxima se předpokládá i v této práci, jelikož nižší nabíjecí výkony prodlužují nabíjecí doby.

Zásadním rozdílem proti nočnímu dobíjení je fakt, že se předpokládá nabíjení během aktivního odstavení zahrnujícího provoz topení nebo klimatizace. Na provoz těchto agregátů je spotřebováváno zhruba 30 kW výkonu, dalších 20 kW jsou ztráty. Skutečný nabíjecí výkon pak opět souvisí se stavem nabití baterie a v praxi klesá až k 320 kW, což je výchozí hodnota pro všechny následující výpočty.

Kapacita LTO baterie byla stanovena na 250 kWh, z nichž využitelných je 150 kWh (dojezd cca 60 km). Toto řešení s dostatečnou rezervou pokryje nejnáročnější oběh, kterým je jedno kolo linky č. 303 do Křenice bez pauzy a tedy bez možnosti dobití. Vozidlo v rámci něj ujede 46,1 km a spotřebuje maximálně 115,25 kWh energie. K větší rezervě v baterii bylo přistoupeno s ohledem na tvorbu kongescí v Horních Počernicích, které by především v ranní špičce snižovaly dobu na nabití. [14]

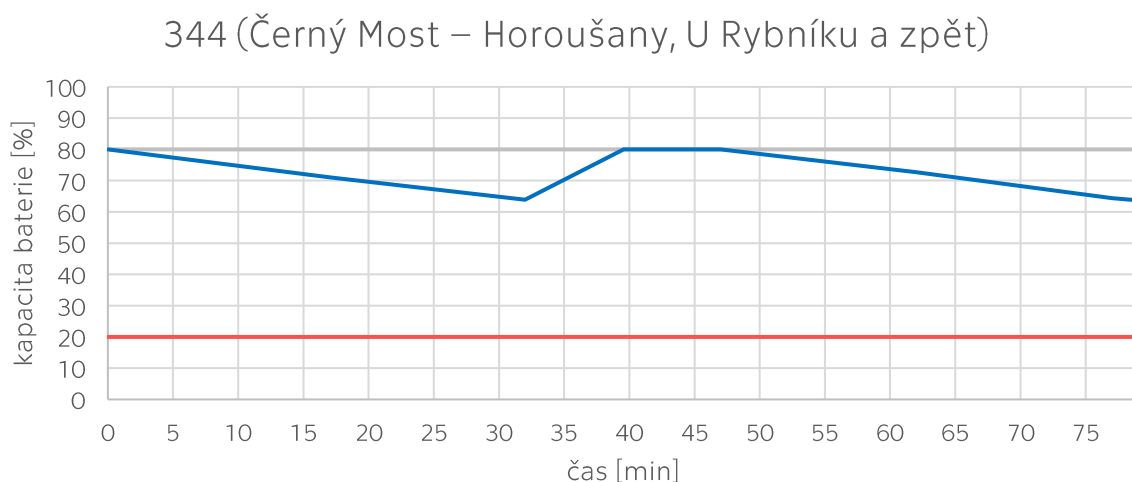
8.6.3 Energetická bilance na jednotlivých linkách

Jedno průměrné kolo linky č. 303 znamená s ohledem na průběžné nabití ve Křenicích (viz Graf 14) úbytek -57,25 kWh (23 % kapacity baterie).



Graf 14 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobuse s průběžným nabíjením).

Oběh linky 344 do Horoušan, kde proběhne nabití, představuje úbytek -40,75 kWh (16 %).



Graf 15 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobuse s průběžným nabíjením).

Na zbylých obězích nedochází k průběžnému nabíjení mimo terminál Černý Most a průběh nabití jsou tak shodné s grafy uvedenými v kapitole 8.5.2. Liší se pouze podíl úbytku energie na celkové kapacitě baterie, který činí pro linku č. 343 16 %, pro tandem 344 a 343 39 %, pro linku č. 353 do Čertous 14 % a konečně pro „dlouhé“ spoje do Svémyslic 21 %.

8.6.4 Úprava oběhů a výsledný počet vozidel

Vzhledem k dostatečně dlouhým pauzám je možné vykrýt provoz během pracovních dní v poměru 1:1 ke stávajícím autobusům. Provozní potřeba by činila 15 vozidel, resp. 18 se započtením záložních elektrobusů.

Ve dnech pracovního klidu se v případě nepříznivých klimatických podmínek pokládá za nutné zaparkovat do terminálu Černý Most rezervní elektrobus, který bude s ohledem na krátké doby na nabíjení vykrývat vybrané spoje.

8.7 ELEKTROBUS (KOMBINOVANÝ)

8.7.1 Výběr konkrétního řešení

Pro potřeby této úlohy autor vybral řešení založené na průběžném rychlém nabíjení v kombinaci s větší kapacitou baterie (popsán v kapitole 2.1.6 jako model Kladno). Kdyby bylo zvoleno provedení s dobíjením z dvoupólového vedení trolejbusového typu užívané běžně v Praze, vedlo by v podmínkách řešených linek k nevyhnutelnému nárůstu počtu potřebných vozidel.



Obr. 13 Ve variantě s kombinovaným elektrobusem se na rozdíl od verze s průběžným nabíjením nepočítá s výstavbou nabíječky v Křenici. (foto: Matěj Stach)

8.7.2 Návrh rozmístění nabíjecích stanic

Tato verze počítá s výstavbou pouze třech nabíjecích stání (viz 8.2), která budou umístěna v terminálu Černý Most. Jedno z nich by mělo být lokalizováno do nástupní zastávky. Jelikož některá pořadí nebude nutné vůbec průběžně dobít (stačí nabití během pauzy mezi ranní a odpolední špičkou), mohl by počet nabíjecích míst po dalším prověření klesnout. Vozidlo z pořadí 343/16 obsluhujícího výhradně linku č. 343 bude rovněž dobíto během polední pauzy v provozovně dopravce.

8.7.3 Nabíjení a kapacita baterie

Způsob a rychlost nabíjení jsou totožné s kapitolou 8.6.2.

Kapacita baterie LTO byla stanovena na 400 kWh tak, aby představovala průměr z kapacity použité u elektrobusů Overnight Charging a Opportunity Charging.

8.7.4 Energetická bilance na jednotlivých linkách

Míra nabití v čase je shodná s grafy v kapitole 8.5.2. Jiný je ovšem podíl spotřebované energie na celkové kapacitě akumulátorů, který v případě modelového kola linky č. 303 činí 33 %, u kola 343 33 %, 23 % u oběhu na lince 344 a 25 % při jízdě z Černého Mostu do Nehvizd a zpět na linkách 344 a 343. Jedno kolo linky č. 353 do Čertous představuje úbytek 9 % energie, zatímco svémyslické kolo 13 %.

8.7.5 Úprava oběhů a výsledný počet vozidel

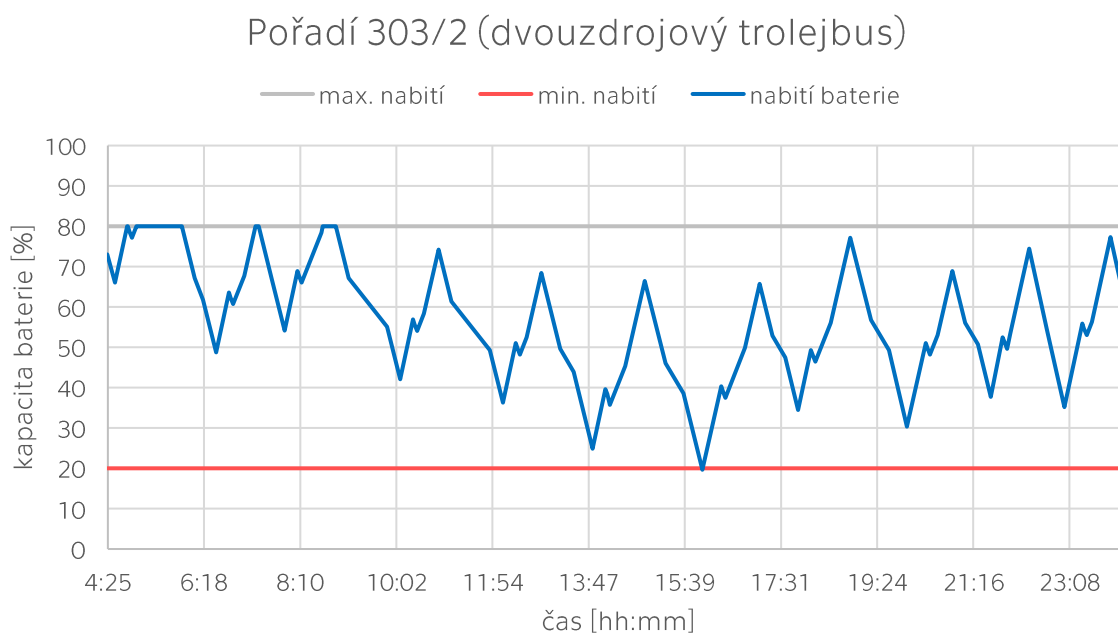
Především v sedle a večer nejsou na terminálu Černý Most dostatečně dlouhé pauzy na nabití vozidel. Z toho důvodu je nutné přistoupit ke změně oběhů a vystřídání elektrobusů jinými vozidly. Tato změna si nevyžádá vypravení vozidel navíc (viz Tab. 11), pouze opět klade zvýšené nároky na manipulační řidiče.

Tab. 11 Výčet provedených úprav v obězích pro pracovní dny.

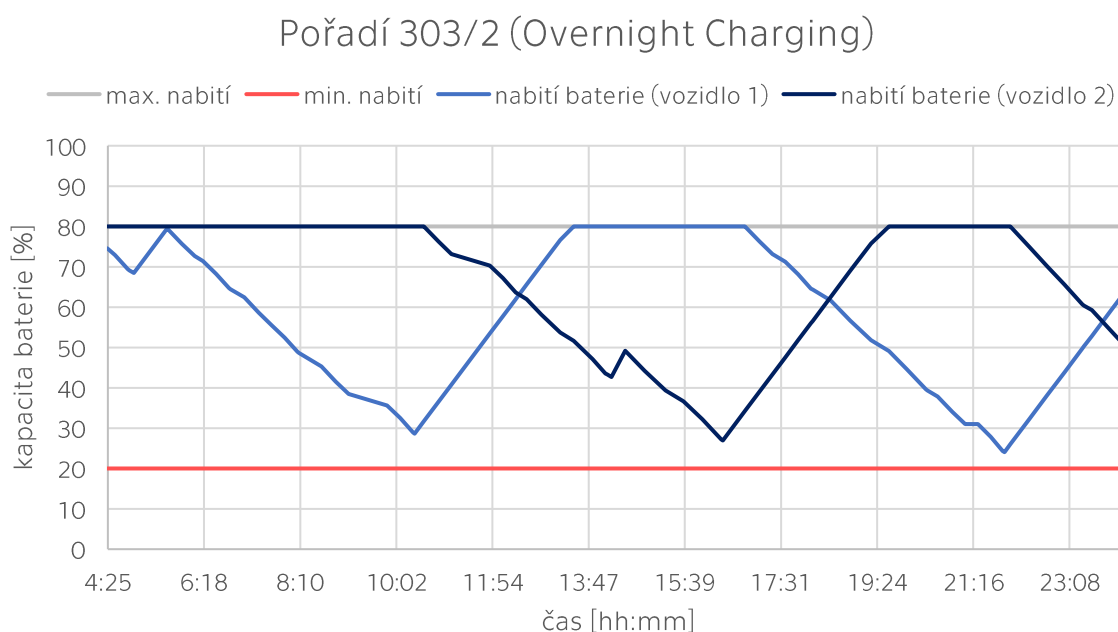
Pořadí	Jede navíc	Nejede
303/1	–	13:50–15:09 a 22:35–0:56
303/2	22:35–0:56 (303/1)	12:35–14:09 a 22:00–0:18
303/3	22:00–0:18 (303/3)	11:05–12:54 a 20:00–22:53
303/4	20:00–22:53 (303/4)	–
303/9	–	10:05–11:54
303/10	11:05–12:54 (303/3) a 13:50–15:09 (303/1)	–
353/13	10:05–11:54 (303/9) a 12:35–14:09 (303/2)	–

Ve dnech pracovního klidu se v případě nepříznivých klimatických podmínek pokládá za nutné, ostatně stejně jako v případě průběžně nabíjených elektrobusů, zaparkovat do terminálu Černý Most rezervní vůz, který bude s ohledem na krátké doby na nabíjení vykrývat vybrané spoje.

8.8 SROVNÁNÍ ENERGETICKÉ BILANCE NA REFERENČNÍM OBĚHU

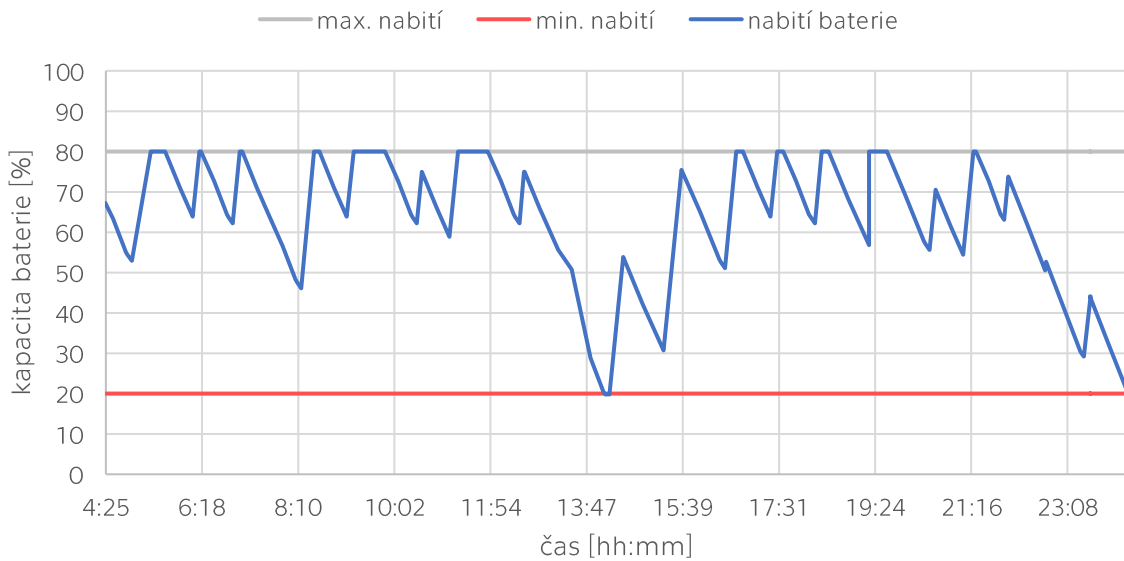


Graf 16 Míra nabití akumulátoru tzv. parciálního trolejbusu na referenčním oběhu.



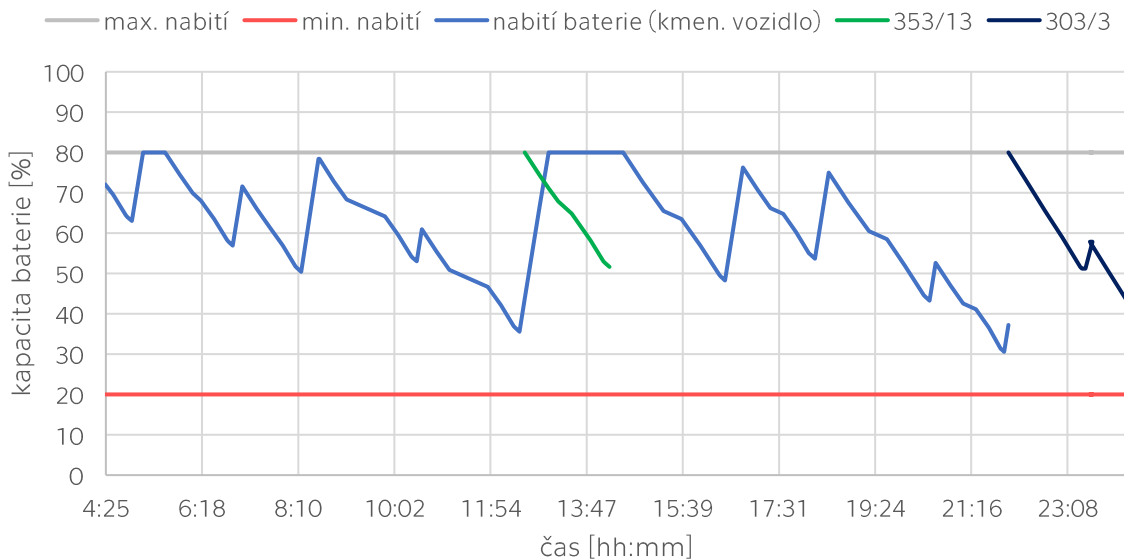
Graf 17 Míra nabití akumulátoru elektrobusu ve verzi Overnight Charging na referenčním oběhu.

Pořadí 303/2 (Opportunity Charging)



Graf 18 Míra nabití akumulátoru elektrobusu ve verzi Opportunity Charging na referenčním oběhu.

Pořadí 303/2 (kombinovaný elektrobus)

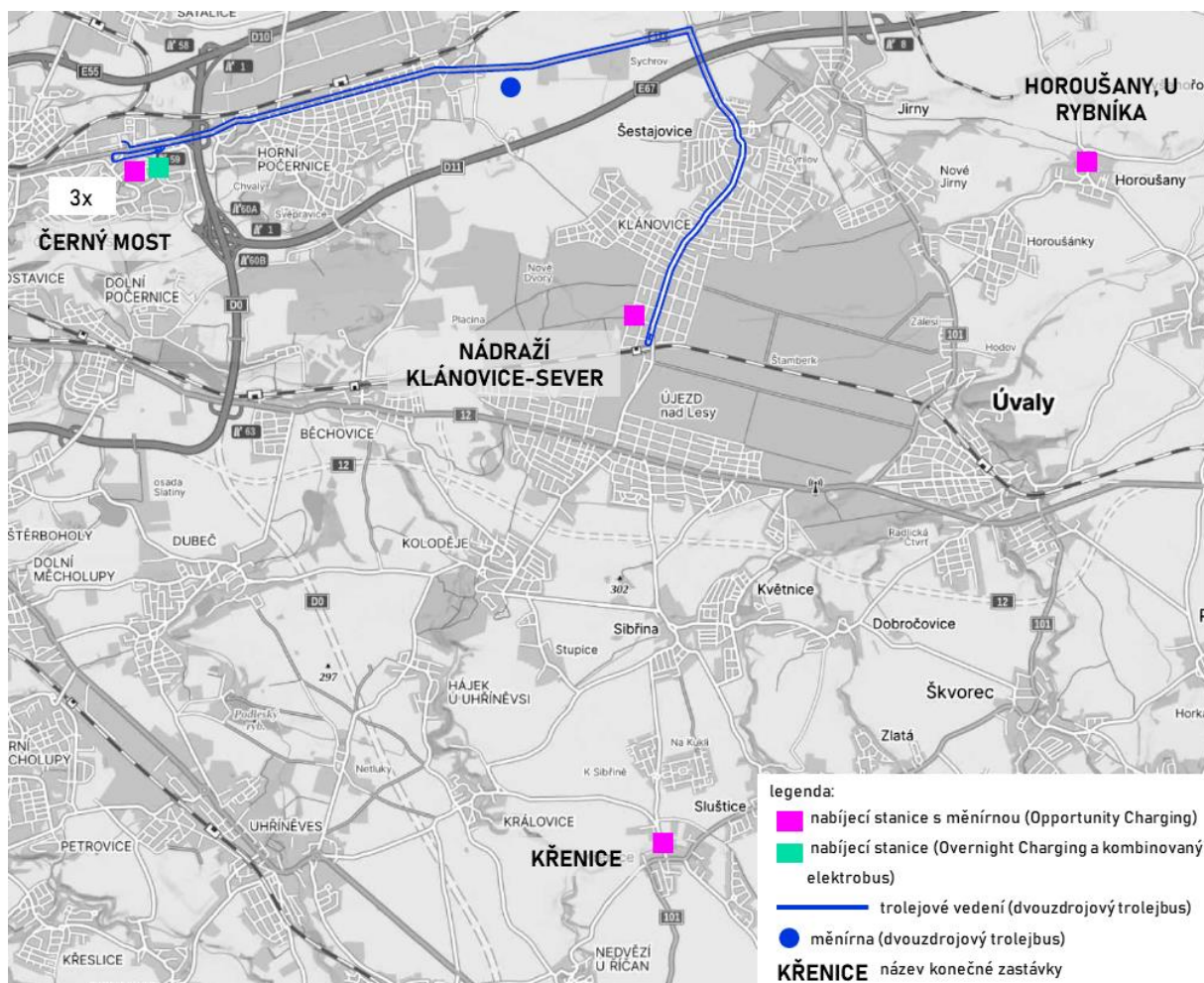


Graf 19 Míra nabití akumulátoru kombinovaného elektrobusu na referenčním oběhu.

8.9 ODHAD NÁKLADŮ

Navržené varianty je třeba podrobit ekonomickému srovnání, na jehož základě bude vybrána ta vůbec nejvýhodnější z nich. Toto vyčíslení bude vždy pouze odhadem případných nákladů, jelikož ty reálné by vzešly z otevřených výběrových řízení. Zároveň bylo přistoupeno k určitým zjednodušením.

Celý odhad je vztažen k plánované životnosti vozidel, která by pro trolejbusy a elektrobuses měla být podle současných plánů organizátora dopravy ROPID stanovena na 20 let. Referenční cena jednoho kusu vozidla byla určena v kapitole č. 4, přičemž je nutné si uvědomit, že s ohledem na použití baterií o poměrně velké kapacitě by v případě definovaných vozidel byla vyšší, a to o jednotky milionů Kč.



Obr. 14 Navržená infrastruktura pro všechny posuzované varianty. (zdroj: mapy.cz, zakres: Matěj Stach)

Vzhledem k nemožnosti určit relevantní ceny byly zcela zanedbány náklady na energie. Náklady na výměnu akumulátorů, stejně jako i ceny infrastruktury a měníren byly převzaty z bakalářské práce Emanuela Hadjikana (viz Tab. 4). Autor sice má k dispozici vybrané cenové odhady k výstavbě trolejbusových tratí, množství dat k elektrobusevé infrastruktuře je ale s ohledem na její minimální rozšíření v tuzemsku nedostačující.

Práce ve všech variantách předpokládá využití synergie s infrastrukturou metra na Černém Mostě (netřeba stavět měnícírou), jinak musí být ke každému stanovišti měnícírou vybudována.

Tab. 12 Srovnání nákladů na posuzované varianty. Převzatá data viz Tab. 4 a Příloha č. 1.

		Dvoudrožový trolejbus			Elektrobus (Overn. Ch.)		Elektrobus (Opportunity Charging)		Elektrobus (kombinovaný)		
Pořízení	Pořizovací náklady	Kč/ks	Kč 12 740 000			Kč 13 190 000		Kč 14 170 000		Kč 13 990 000	
	Životnost v podmínkách PID	počet roků	20			20		20		20	
	Počet vozidel	ks	18			23		18		18	
Náklady na vozidla		Kč/20 let	229 320 000			303 370 000		255 060 000		251 820 000	
Vozidlo	Bateriová technologie	NMC/LTO	LTO			NMC		LTO		LTO	
	Instalovaná kapacita	kWh	140			588		250		400	
	Životnost	počet roků	10			9		6		6	
	Náklady na LTO (2030)	Kč/kWh	13 109			-		13 109		13 109	
	Náklady na NMC (2030)	Kč/kWh	-			8 291		-		-	
Náklady na baterie		Kč/20 let	33 034 680			224 254 968		176 971 500		283 154 400	
Nabíjecí stanice / Trolejové vedení	Fixní náklady	Kč/rok	Kč 489 160	Kč -	Kč 24 458	Kč 24 458	Kč 244 580	Kč 24 458	Kč 244 580	Kč 24 458	
	Pořizovací náklady (depní nabíječky, nabíjecí stanice)	Kč/ks	Kč 24 458 000	Kč 14 674 800	Kč 2 078 930	Kč 2 078 930	Kč 22 256 780	Kč 2 078 930	Kč 22 256 780	Kč 2 078 930	
	Minimální životnost	počet roků	30	30	15	15	15	15	15	15	
	Náklady na údržbu	Kč/rok/ks	Kč 391 328	Kč 48 916	Kč 103 947	Kč 103 947	Kč 293 496	Kč 103 947	Kč 293 496	Kč 103 947	
	Množství nových	ks nebo km	11,8	1	18	26	6	18	3	18	
	Náklady na nabíjecí infrastrukturu		Kč/20 let	390 741 008	15 653 120	150 661 280	217 187 040	347 303 600	150 661 280	178 543 400	150 661 280
Infrastruktura	Fixní náklady (přípojky, servisní vozidlo)	Kč/rok	Kč 489 160	Kč 244 580	Kč 20 545	Kč 128 405	Kč 244 580	Kč 20 545	Kč 244 580	Kč 51 362	
	Pořizovací náklady	Kč/ks	Kč 20 789 300	Kč 20 789 300	Kč 12 229 000	Kč 12 229 000	Kč 12 229 000	Kč 12 229 000	Kč 12 229 000	Kč 12 229 000	
	Minimální životnost	počet roků	35	35	30	30	30	30	30	30	
	Náklady na údržbu	Kč/rok/ks	Kč 195 664	Kč 195 664	Kč -	Kč -	Kč 97 832	Kč -	Kč 97 832	Kč -	
	Množství nových	ks nebo km	1	0	1	1	3	1	0	1	
	Množství stávajících	ks nebo km	0	1	0	1	1	0	1	0	
Náklady na energetickou síť		Kč/20 let	34 485 780	4 891 600	12 639 894	14 797 090	47 448 520	12 639 894	4 891 600	13 256 236	
Celkové náklady		Kč/20 let	871 427 362			759 609 098		990 084 794		882 326 916	
			Trolejové vedení	Nabíjecí místo	Nabíjení na provozovně	Nabíjení na provozovně a v terminálu Černý Most	Nabíjecí stanice	Nabíjení na provozovně	Nabíjecí stanice	Nabíjení na provozovně	

Jak je zjevné z Tab. 12, při uvážení jednoho 20letého cyklu je ekonomicky nejvýhodnější variantou elektrobus určený pro pomalé dobíjení (Overnight Charging). Rozdíl proti nejdražší variantě v podobě elektrobusu uzpůsobeného pro rychlé nabíjení je zhruba 230 milionů Kč. Důvodem je budování infrastruktury a její rozsah.

Zatímco ve variantě Overnight Charging se počítá s výstavbou nabíjecí infrastruktury pouze na provozovně a dále v terminálu Černý Most, scénář Opportunity Charging je založený na vybudování nabíječek na Černém Mostě, na Nádraží Klánovice-sever, v Křenici a Horoušanech, U Rybníka. K těmto nabíječkám je třeba postavit i měnírny. Nabíjení v Klánovicích by se v praxi řešilo odlišně (třeba pomalým nabíjením nebo nasazením jiného typu elektrobusu na 343/16), pro zachování ducha varianty jej ale autor navrhl v této unifikované podobě.

Jakákoliv vybudovaná infrastruktura na straně druhá přináší příležitosti elektrifikovat další linky či oběhy. To by umožnila právě varianta elektrobusu s rychlým nabíjením anebo verze využívající dvouzdrojových trolejbusů.

V prostředí Klánovic by se konkrétně jednalo o městský midibusový oběh 212/2 zajišťující celotýdenně všechny spoje této linky, kde by buď připadalo v úvahu nasazení elektrobusu ve verzi Opportunity Charging, anebo v případě zvolení varianty trolejbusové dvoupólově nabíjeného elektrobusu. Podobně by šlo postupovat v případě oběhu 221/6, který během dnů školního vyučování zajišťuje vložené spoje z Nádraží Klánovice-sever do Klánovic a mohl by být v závislosti na zvolené variantě obsluhován jak tzv. parciálním trolejbusem, tak průběžně nabíjeným elektrobusem.

Křenice ani Horoušany, U Rybníka podobné možnosti nenabízejí. Vedle linky 303 sice v Křenici končí ještě 366, v případě té se ale jedná pouze o jednotky spojů denně. Linky obsluhující zastávku Horoušany, U Rybníka byly v rámci této práce již elektrifikovány.

Na Černém Mostě by případnou vybudovanou trolejbusovou infrastrukturu mohly využívat městské linky jezdící po ulici Náchodské. Z příměstských linek se poté jedná o 354 a 398. U první jmenované autor v případě dvojice oběhů určených pro vozidla kategorie Kb očekává její provozní provázání s linkou č. 398. Ta jezdí až do Poděbrad a její elektrifikace tak v tuto chvíli nepřipadá do úvahy. Zbývá 3 pořadí obsluhují standardní autobusy, jejichž proměna v trolejbusy by s takto navrženou infrastrukturou neměla představovat problém a byla by realizovatelná ihned.

9 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly shrnuty cesty, kterými se může vydat příměstská a regionální doprava při hledání alternativ za dieselová vozidla. Bylo tak učiněno v kontextu regulace platné pro sesterské městské autobusy a se zohledněním všech dalších specifik. Autor se pokusil vymezit výhody a nevýhody čistých vozidel a zaměřit se na odlišnost plánování provozu stavícím právě na alternativních pohonech.

Vedle toho práce obsáhla také přehled současného stavu a připravovaných projektů v této oblasti, přičemž nabídla rovněž ekonomické srovnání, na jehož základě byla zvolena čtveřice variant posuzovaných v závěrečné kapitole.

Finálová návrhová část se zaměřila na aplikaci lokálně bezemisních vozidel na provozovně provázaných příměstských linkách č. 303, 343, 344 a 353, které jezdí z Černého Mostu směrem do Horních Počernic, Šestajovic, Zelenče, Jiren, Horoušan, Klánovic nebo Újezdu nad Lesy. Posuzovány byly čtyři varianty, jež zahrnují dvouzdrojový trolejbus, elektrobus určený pro pomalé nabíjení (Overnight Charging) i průběžné rychlé nabíjení (Opportunity Charging) a konečně elektrobus kombinovaný.

Pro tento konkrétní soubor vyšla při zvážení jednoho životního cyklu vozidel jako ekonomicky nejvýhodnější varianta elektrobusu nabíjeném v režimu Overnight Charging. K vítězství tohoto scénáře jednoznačně přispěla minimalizace výdajů na straně infrastruktury. Na druhé straně byla značná část těchto financí investována do zvětšení kapacity baterií, jež se neobejdou bez lithia a rozmanité palety dalších kovů a které pochází především z komunistické Čínské lidové republiky.

Tab. 13 Srovnání nákladů na posuzované varianty.

Varianta	Odhad nákladů na 20 let [Kč]
dvouzdrojový trolejbus	871 427 362
elektrobus (Overnight Charging)	759 609 098
elektrobus (Opportunity Charging)	990 084 794
elektrobus (kombinovaný)	882 326 916

Kdyby se varianty posoudily z provozního hlediska, byly by favority elektrobus ve verzi Opportunity Charging a dvouzdrojový trolejbus. Oba scénáře totiž umožnily zachovat výchozí oběhy, které byly zpracovány organizací ROPID a lze je tedy považovat za ideální. Tzv. parciální trolejbusy jsou pro dotčený provozní soubor bezesporu zajímavou příležitostí, jelikož by na rozdíl od ostatních posuzovaných variant četné kongesce v ulici Náchodské v Horních Počernicích přetavily ve svou výhodu a větší nabití akumulátorů.

Trolejbusová infrastruktura má zároveň násobně delší životnost jak ta, která je určena elektrobusům. Dalším benefitem je snížení kapacity baterií, jejichž výroba a likvidace představují významnou zátěž pro životní prostředí.

I přes provozní komplikace, které by zavedení elektrobusů určených pro pomalé noční dobíjení především v nejméně příznivých klimatických podmínkách přineslo, se autor kloní k této variantě. Ekonomická otázka zavádění alternativních pohonů je totiž i přes existenci nejrůznějších dotačních titulů zásadní. Kdyby měli objednatelé veřejné dopravy a potažmo dopravci nést celé nákladové břemeno spojené se zaváděním alternativních pohonů, staly by se systémy veřejné dopravy finančními ekvivalenty černých děr.

Odhad nákladů pro vybranou variantu činí zhruba tři čtvrtě miliardy Kč. Rozdíl proti objemu finančních prostředků nutných k pořízení ekvivalentního množství dieselových autobusů není malý a pouze úspory v nákladech na provoz jej nesmažou. Zbývá si odpovědět na nelehkou otázku, zda by jej po zohlednění vyrovnaly negativní externality, které s sebou přináší proces výroby nafty a především pak její spalování.

10 SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2019/1161. In: . 2019. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=EN>
- [2] KONCEPCE VYUŽITÍ ALTERNATIVNÍCH PALIV V PODMÍNKÁCH AUTOBUSOVÉ DOPRAVY DOPRAVNÍHO PODNIKU HL. M. PRAHY, A. S. 2020.
- [3] *Klimatický plán hlavního města Prahy do roku 2030: Praha na cestě k uhlíkové neutralitě.* Praha, 2021. Dostupné také z: https://klima.praha.eu/data/Dokumenty/Dokumenty%202023/klimaplan_cz_2301_09_online.pdf
- [4] Výběr dopravců pro uzavření smluv o veřejných službách v přepravě cestujících na příměstských linkách PID - oblast D6 - Úvalsko. In: *Tender arena* [online]. [cit. 2023-07-31].
- [5] BYSTROŇ, Petr. V Rize konečně vyjely vodíkové trolejbusy. *Československý Dopravák* [online]. 2020 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/2020-3-31-v-rize-konen-vyjely-vodkov-trolejbusy/>
- [6] Electric road test site in Lund. In: *EVolution Road* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.evolutionroad.se/en/lund/>
- [7] MAJLING, Eduard. Palivové články – princip funkce a dělení. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni>
- [8] STACH, Matěj. Článkové i standardní elektrobusy dodá do Kladna SOR Libchavy. *Československý Dopravák* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/clankove-i-standardni-elektrobusy-doda-do-kladna-sor-libchavy/>
- [9] STACH, Matěj. V Praze vyjela první Škoda 36 BB E'CITY [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/v-praze-vyjela-prvni-skoda-36bb-ecity/>

- [10] HINČICA, Libor. Do polských Tych dorazil první „supertrolejbus“. *Československý Dopravák* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/do-polskych-tych-dorazil-prvni-supertrolejbus/>
- [11] HINČICA, Libor. Až 140 článkových plug-in hybridů pro Prahu. *Československý Dopravák* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/az-clankovych-140-plug-in-hybridu-pro-prahu/>
- [12] STACH, Matěj. Předváděcí MAN Lion's City EfficientHybrid v konfiguraci PID. *Československý Dopravák* [online]. 2020 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/predvadeci-man-lions-city-efficienthybrid-v-konfiguraci-pid/>
- [13] HINČICA, Libor. První linkové autobusy na LNG v Evropě. *Československý Dopravák* [online]. 2020 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/2020-1-14-prvn-linkov-autobusy-na-lng-v-evrop/>
- [14] HADJIKAN, Emanuel. *EBusSIM – Softwareanwendung zur Betriebssimulation von Elektrobussen*. 2022. Bakalářská práce. Berner Fachhochschule.
- [15] HINČICA, Libor. *Vorstudie des Batterieobussystems in der Stadt Friedrichshafen*. Praha, 2021.
- [16] *Hlídač státu* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.hlidacstatu.cz/>
- [17] *Československý Dopravák* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/>
- [18] *Sustainable Bus* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/>
- [19] *Zdopravy.cz* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/>
- [20] STACH, Matěj. Rok pražských elektrobusů. Průměrně jich jezdila třetina. *Československý Dopravák* [online]. 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/rok-prazskych-elektrobusu-prumerne-jich-jezdila-tretina/>

- [21] STACH, Matěj. Vodíková Škoda 36 BB H'CITY v pražském provozu. *Československý Dopravák* [online]. 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/vodikova-skoda-36-bb-hcity-v-prazskem-provozu/>
- [22] HINČICA, Libor. Iveco ovládlo soutěž na pražské hybridy. S mild hybridem. *Československý Dopravák* [online]. 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/iveco-ovladlo-soutez-na-prazske-hybridy-s-mild-hybridem/>
- [23] SŮRA, Jan. Mladá Boleslav kupuje 17 autobusů Iveco na bioplyn. *Zdopravy.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/mlada-boleslav-kupuje-17-autobusu-iveco-na-bioplyn-168239/>
- [24] *Seznam-autobusu.cz* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://seznam-autobusu.cz/>
- [25] SŮRA, Jan. Další krok k trolejbusům do Polabí. Kraj začal hledat projektanty nové trati Praha – Brandýs. *Zdopravy.cz* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/dalsi-krok-k-trolejbusum-do-polabi-kraj-zacal-hledat-projektanty-nove-trati-praha-brandys-124959/>
- [26] SŮRA, Jan. Středočeský kraj schválil plány na vodíkové autobusy, budou jezdit kolem Mníšku. *Zdopravy.cz* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/stredocesky-kraj-schvalil-plany-na-vodikove-autobusy-budou-jezdit-kolem-mnisku-115931/>
- [27] DUTSCH, Steffen. Příprava a realizace jízdních řádů linek městské hromadné dopravy. *Přednáška v rámci předmětu Organizace a řízení městské hromadné dopravy*. 2023.
- [28] *Pražská integrovaná doprava* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.pid.cz>
- [29] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj a Marcin POŁOM. Wybrane uwarunkowania eksploatacyjne i energetyczne autobusów elektrycznych i trolejbusów. *Transport miejski i regionalny* [online]. 2022 [cit. 2023-07-31].

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Cenové srovnání elektrických vozidel ve třech délkových kategoriích. (autor: Emanuel Hadjikan; bakalářská práce eBusSIM – Softwareanwendung zur Betriebssimulation von Elektrobussen na Berner Fachhochschule).

Příloha č. 2 Vozový jízdní řád referenčního oběhu 303/2 pro pracovní dny.

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Technologie tzv. parciálního trolejbusu v Pardubicích v praxi. Místo autobusů jezdí na lince 12 trolejbusy až do Úhřetic, které leží 9 km od centra města. (foto: Matěj Stach)	12
Obr. 2 Elektrická silnice v Lundu vzniklá v rámci projektu EVolution Road. (foto: Matěj Stach)	13
Obr. 3 Rozpad účinnosti elektrické energie a vodíku při použití v silniční dopravě. (zdroj: UITP)	14
Obr. 4 Dvojice elektrobuseů VDL Citea a dvě rychlonabíječky v přístavní části Kodaně. (foto: Matěj Stach)	15
Obr. 5 Celkem dva hybridní autobusy Volvo 7900 LH provozují Kroměřížské technické služby. Celkem v tuzemsku jezdí pouze tři autobusy využívající klasickou hybridní technologii. (foto: Matěj Stach)	17
Obr. 6 Za zavedené palivo se dá bioCNG považovat na Skandinávském poloostrově. Snímek autobusu s MAN s pohonem na CNG pochází ze švédského Lundu. (foto: Matěj Stach)	18
Obr. 7 Minielektrobus značky Breda Menarinibus na Malostranském náměstí. (foto: Matěj Stach)	30
Obr. 8 Jeden z nových pražských elektrobuseů 36 BB E’CITY na zkušební jízdě. (foto: Matěj Stach)	31
Obr. 9 Trolejbus Škoda 30 Tr zapůjčený do Prahy z Hradce Králové ve společnosti vozu SOR TNS 12 představujícím budoucí podobu pražských článkových vozů. (foto: Matěj Stach)	32
Obr. 10 Mild-hybridní autobus od společnosti MAN na pražském Opatově. Po konci zkušebního provozu vůz odkoupila společnost ČSAD POLKOST, která jej nasazuje na Černokostecku. (foto: Matěj Stach)	34

Obr. 11 Řešené linky a souhrnné intervaly zakreslené do mapového podkladu. (zdroj: mapy.cz, zákres: Matěj Stach)	42
Obr. 12 Pobyt vozidel v obratišti Černý Most v průběhu ranní špičky na časové ose.....	48
Obr. 13 Ve variantě s kombinovaným elektrobusem se na rozdíl od verze s průběžným nabíjením nepočítá s výstavbou nabíječky v Křenici. (foto: Matěj Stach).....	60
Obr. 14 Navržená infrastruktura pro všechny posuzované varianty. (zdroj: mapy.cz, zákres: Matěj Stach).....	64

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled cen trolejbusů v Evropě v letech 2021-2023.....	25
Tab. 2 Přehled cen elektrobusů v Evropě v letech 2021-2023.....	26
Tab. 3 Referenční pořizovací ceny lokálně bezemisních vozidel.....	27
Tab. 4 Přehled nákladů na standardní vozidlo přepočtený do CZK. (zdroj: bakalářská práce Emanuela Hadjicana; originál v Příloze č. 1).....	29
Tab. 5 Vztah alternativních pohonů a vlastností linek.....	39
Tab. 6 Vlastnosti vozidel s alternativními pohony.....	39
Tab. 7 Navýšení zpoždění linek mezi zastávkami Na Kovárně a Černý Most v ranní špičce.	45
Tab. 8 Navýšení zpoždění linek mezi zastávkami Černý Most a Na Kovárně v odpolední špičce.....	45
Tab. 9 Seznam výchozích oběhů vozidel.....	47
Tab. 10 Výčet provedených úprav v obězích pro pracovní dny.....	57
Tab. 11 Výčet provedených úprav v obězích pro pracovní dny.....	61
Tab. 12 Srovnání nákladů na posuzované varianty. Převzatá data viz Tab. 4 a Příloha č. 1.	65
Tab. 13 Srovnání nákladů na posuzované varianty.....	67

14 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase při energeticky nejnáročnějším oběhu.....	51
Graf 2 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	52
Graf 3 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	52

Graf 4 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	53
Graf 5 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	53
Graf 6 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	53
Graf 7 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta dvouzdrojový trolejbus)....	54
Graf 8 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	55
Graf 9 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	56
Graf 10 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	56
Graf 11 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	56
Graf 12 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	57
Graf 13 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus bez průběžného nabíjení).....	57
Graf 14 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus s průběžným nabíjením).....	59
Graf 15 Míra nabití akumulátoru v závislosti na čase (varianta elektrobus s průběžným nabíjením).....	59
Graf 16 Míra nabití akumulátoru tzv. parciálního trolejbusu na referenčním oběhu.....	62
Graf 17 Míra nabití akumulátoru elektrobusu ve verzi Overnight Charging na referenčním oběhu.....	62
Graf 18 Míra nabití akumulátoru elektrobusu ve verzi Opportunity Charging na referenčním oběhu.....	63
Graf 19 Míra nabití akumulátoru kombinovaného elektrobusu na referenčním oběhu....	63