



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Konstrukční návrh pohonu kolejového elektrobusu

The design concept of the electric drive for rail-electrobus

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

Jan Mojžíš

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mojžíš** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **408797**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Konstruční návrh pohonu kolejového elektrobusu

Název diplomové práce anglicky:

The design concept of the electric drive for rail-electrobus

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

- 1) Rešerši na téma: Řešení pohonu trolejbusů, silničních a kolejových elektrobusů.
- 2) Typový výkres částečně nízkopodlažního kolejového elektrobusu v měřítku 1:50 a jeho hmotnostní bilanci.
- 3) Základní analýzu koncepčních řešení individuálního pohonu dvojkolí nebo portálových náprav s volně otočnými koly.
- 4) Trakční výpočty jízdního cyklu elektrobusu na traťových úsecích o délce 2 km a 3,5 km. Posuďte výhodnost rekuperace.
- 5) Sestavný výkres zástavby baterií a hnacího ústrojí do skříně a do podvozků vozidla.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.

Skripta ČVUT:

KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

MARUNA, Z., HOFFMANN, V., KOULA, J. KROUPOVÁ, Z.: Metodika konstruování kolejových vozidel - osobní a nákladní podvozky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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


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

Datum zadání diplomové práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.07.2017**

Platnost zadání diplomové práce:


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26. 4. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Abstrakt

Cílem této práce je koncepční návrh elektrického pohonu lehkého dvounápravového vozidla – kolejového elektrobusu.

Zvolený typ pohonu je příčně orientovaný, s plně odpruženým pohonem s dutou kloubovou hřídelí. Jako zdroj energie jsou použity lithiové baterie, je použit synchronní motor s permanentními magnety a dvoustupňová čelní převodovka.

Trakční výpočty byly provedeny na úsecích 2 a 3,5 km, což odpovídá rozmezí nejčastějších vzdáleností mezi zastávkami na regionálních tratích a byla vypočtena účinnost rekuperace. Tyto výpočty byly porovnány s hydromechanickým a hybridním pohonem.

Smyslem této práce navrhnout možnost náhrady dosluhujících vozidel se spalovacím motorem kolejovými elektrobusy.

Klíčová slova:

nízkopodlažní, kolejový elektrobus, baterie, elektrický pohon, trakční výpočty, jízdní cyklus, rekuperace

Abstract

The aim of this thesis is concept design of electric drive of light two-axle rail vehicle – battery electric railbus.

Chosen drive type is transversely-mounted, with fully suspended quill drive. AS power supply are used lithium batteries, permanent magnet synchronous motor is used and two stage spur transmission.

Traction calculations were done on track sections of 2 and 3,5 km, which corresponds with most common ranges between stations on regional tracks and effectiveness of recuperation was calculated.

The purpose of this thesis is to suggest option of replacement of worn out vehicles with combustion engine with battery electric railbuses.

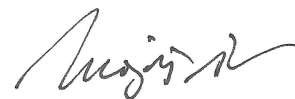
Key words:

low-floor, battery electric railbus, battery, electric drive, traction calculations, drive cycle, recuperation

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem „Konstrukční návrh pohonu kolejového elektrobuse“ jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

V Praze 12. 7. 2017



Jan Mojžíš

Poděkování

Rád bych poděkoval zejména doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Dále děkuji všem ostatním, v textu citovaným osobám, kteří mi poskytli cenné rady, či zdroje informací.

Obsah

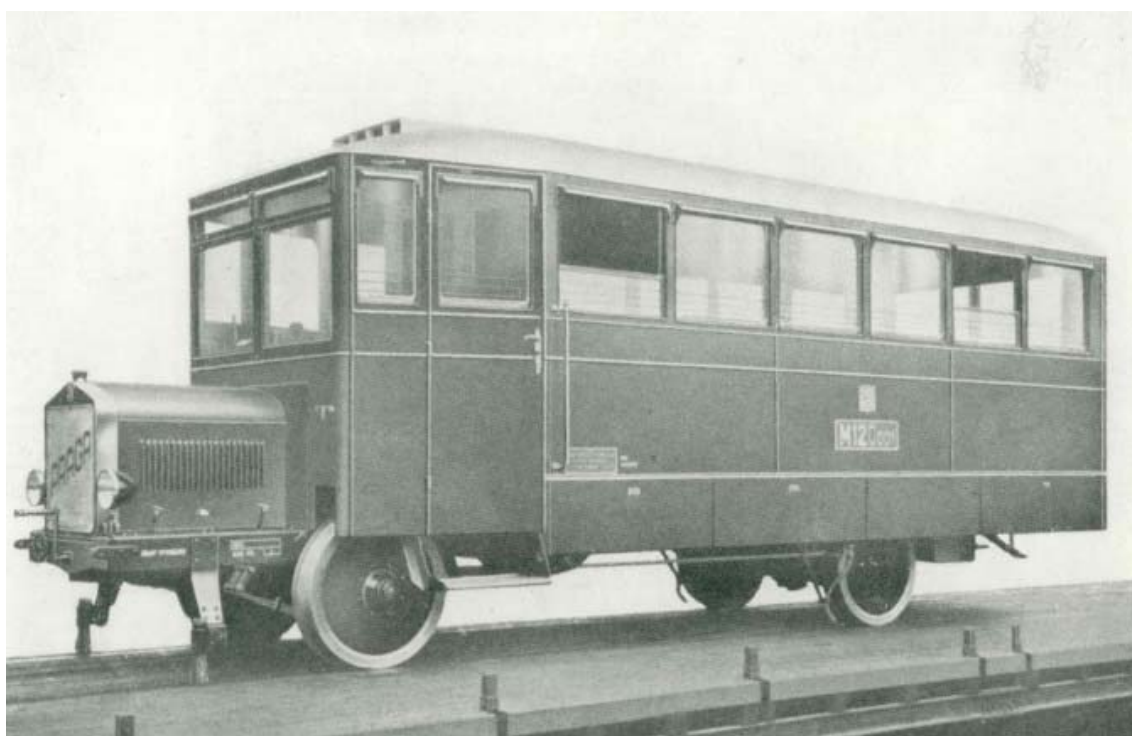
1.	Úvod	8
1.1.	Úvod do problematiky	8
1.2.	A co železnice?	10
2.	Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobusů.....	12
2.1.	Silniční vozidla	12
2.1.1.	Škoda Perun HE (High Energy)	13
2.1.2.	Škoda Perun HP (High Power).....	14
2.1.3.	SOR EBN.....	15
2.1.4.	BYD 12M electric bus	16
2.1.5.	Solaris Trolino 12	18
2.2.	Kolejová vozidla	19
2.2.1.	Alstom Citadis Dualis.....	19
2.2.2.	Hitachi BEC 819 „Dencha“	20
2.3.	Porovnání parametrů baterií silničních a kolejových elektrobusů.....	21
2.4.	Trendy vývoje bateriových pohonů	22
3.	Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy	23
3.1.	Vysvětlení základních pojmů.....	23
3.2.	Traťové třídy a zatížení – UIC 700.....	23
3.3.	Upevnění komponent na skříní vozidla – ČSN EN 12 663	25
3.4.	Obrys pro konstrukci vozidla – ČSN 28 0312	27
3.5.	Bezpečnost bateriových systémů EHK.....	27
3.6.	Uspořádání sedadel – UIC 567	27
3.7.	Kapacita (osob)	28
3.8.	Denní dojezd vozidla	29
4.	Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu	30
4.1.	Základní parametry, typový výkres	30
4.2.	Hmotnostní bilance	33
5.	Analýza řešení individuálního pohonu dvojkolí.....	38
5.1.	Úvod	38
5.2.	Podélně orientovaný pohon.....	38
5.3.	Přímý pohon bez převodovky	41
5.3.1.	Přímý pohon – neodpružený.....	41

5.3.2. Přímý pohon – odpružený.....	41
5.4. Příčně orientovaný částečně odpružený pohon.....	42
5.5. Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí	44
5.6. Zhodnocení typů pohonů a výběr optimálního pohonu pro kolejový elektrobuses	47
6. Trakční výpočty a účinnost rekuperace kolejového elektrobuses.....	49
6.1. Trakční výpočty jízdního cyklu na úsecích 2 a 3,5 km.....	49
6.1.1. Parametry kolejového elektrobuses pro trakční výpočty	49
6.1.2. Trakční charakteristika	51
6.1.3. Základní rovnice jízdy vlaku, odpory	52
6.1.4. Dráhové a časové tachogramy	56
6.1.5. Porovnání tachogramů variant kolejového autobuses.....	59
6.2. Účinnost rekuperace.....	60
7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobuses.....	63
7.1. Výkres pohonu	63
7.2. Motor	63
7.3. Převodovka	64
7.4. Dutá kloubová hřídel.....	65
7.5. Baterie	66
7.6. Trakční měnič	67
7.7. Podvozek.....	67
8. Závěr.....	68
Použité zdroje	70
Seznam obrázků.....	74
Seznam grafů	75
Seznam tabulek	76
Seznam použitých veličin a jednotek.....	77
Přílohy.....	81

1. Úvod

1.1. Úvod do problematiky

První kolejové vozidlo pro regionální dopravu na světě bylo vyvinuto ve 20. letech 20. století v tehdejší Československu v podniku Českomoravská-Kolben-Daněk (ČKD) v Praze. Jednalo se o vývoj motorového vozu s označením M 120., viz Obr. 1, vyrobeného roku 1927. Tento motorový vůz vypadal jako běžný silniční autobus výrobce Praga. Na první pohled by tedy člověk nepoznal, že se jedná o kolejové vozidlo. Hlavní odlišnost od silničního autobusu spočívala v náhradě náprav železničními dvojkolími. Díky tomu se takový železniční vůz pro regionální dopravu někdy označuje jako tzv. kolejový autobus. [1]



Obr. 1 – Kolejový autobus M 120.0 [2]

Vývoj silničních a kolejových autobusů od té doby probíhá mnohdy společně. Komponenty pro silniční autobusy byly v minulosti používány také pro vývoj kolejových autobusů. I dnes se lze inspirovat v konstrukci kolejových autobusů u klasických silničních autobusů, případně v poslední době také u elektrobuses.

V současné době se v různých městech ČR značně rozvíjí podíl elektromobility v MHD. V posledních letech byly testovány různé typy elektrobuses, včetně elektrobuses českých výrobců. Nyní některá města elektrobuses nakupují do běžného provozu. Jedním z těchto měst je Třinec. K roku 2017 má toto město největší flotilu elektrobuses v ČR, jde o 10 elektrobuses typu Škoda Perun HE, viz Obr. 2. [3]



Obr. 2 – Elektrobús Perun HE pro Třinec [3]

Dalším městem, které má však ambice se v roce 2018 stát ještě větším provozovatelem elektrobúsů, je Hradec Králové. Plánuje totiž provoz 20 elektrobúsů a mimo jiné rozvoj trolejbusové sítě. Na tento projekt nasazení elektrobúsů má již sjednané dotace z Evropské unie. [4]

I v Praze je tendence zavést v budoucnu do běžného provozu elektrobuses místo autobusů. Zatím jsou zde testovány elektrobuses výrobce SOR. Pro tuto chvíli však neexistují detailní plány na zavedení elektrobúsů do běžného provozu, toho se zřejmě dočkáme až za několik let. [5] Vize by však měla být taková, že Praha opravdu v budoucnu po vyhodnocení výsledků současného testování bude zavádět elektrobuses do běžného provozu. Tím se zvýší podíl cestujících v elektrických dopravních prostředcích, což jsou zatím tramvaje a metro.

Výhody v provozních nákladech elektromobilních dopravních prostředků ve veřejné dopravě jsou v podstatě známé pouze z elektrobúsů. Cena za ujetý kilometr klasického dieselového autobusu je podle různých údajů 9-12 Kč/km. Elektrobuses stojí naopak asi 2-3 Kč/km. [4] [6] Elektrobús je má tedy 3x až 6x levnější provoz. Předpokládám, že i v případě kolejového elektrobusu by bylo možné náklady na provoz takto redukovat.

Tento pohled by se člověku mohl zdát příliš optimistický. Naproti provozním nákladům jsou zde totiž vysoké pořizovací náklady kvůli ceně baterií. V dostupných zdrojích je uvedeno, že současné LCC náklady, tedy součet nákladů na nákup vozidla a veškerých nákladů na provoz po celou dobu jeho životnosti, jsou u autobusů a elektrobúsů srovnatelné. Předpokládá se však, že při větší sériovosti výroby budou nakonec v budoucnu elektrobuses nejvýhodnějším veřejným dopravním prostředkem ve městech.

1.2. A co železnice?

Vývoj motorových vozidel od vzniku prvního kolejového autobusu pokračoval a dospěl k vozidlům, která jsou v současné době provozována na regionálních tratích. Nyní tam však jezdí vozidla, která již překročila dobu své životnosti díky modernizacím, nicméně i vyčerpání životnosti modernizace se blíží.

Jedná se např. o původní, či částečně modernizované motorové vozy řady 810 (Obr. 3), nebo z těchto motorových a přípojných vozů vzniklé jednotky řady 814 Regionova (Obr. 4). Např. životnost jednotek Regionova je stanovena na 15-20 let. [7] Modernizace těchto jednotek probíhala v letech 2005-2012. [8] Z toho plyne, že přibližně po roce 2020 by měl být nejvyšší čas zabývat se vývojem nového vozidla pro regionální dopravu.



Obr. 3 – Motorový vůz ČD řady 810 [9]



Obr. 4 – Motorová jednotka ČD řady 814 Regionova [10]

Jedno z možných řešení bylo v minulosti řešeno některými studenty ze zaměření kolejová vozidla FS ČVUT. Pod vedením doc. Ing. Josefa Koláře CSc. se tito studenti zabývali tématem projektu částečně nízkopodlažního kolejového autobusu, viz Obr. 5. Jednalo se například o práce zaměřené na hrubou stavbu skříně [11], trakční podvozek [12] a hybridní pohon [13]. Železniční dopravci se však zřejmě zatím nezabývají otázkou pořízení nového kolejového vozidla pro regionální dopravu. [14]



Obr. 5 – Koncept moderního vozidla pro regionální tratě v ČR [11]

Jak jsem naznačil výše, elektromobilita se více dostává i do českých měst a veřejné dopravy. Proto je dle mého názoru na čase zvážit také elektromobilní kolejovou dopravu právě na regionálních tratích. Pro provoz na těchto tratích není však elektrifikace efektivní, na rozdíl od většiny elektrifikovaných hlavních tratí. Proto zde budou potřeba i v budoucnu vozidla nezávislé trakce.

Téma moderního kolejového autobusu pro regionální dopravu mě v minulosti velmi zaujalo. Také mě zaujalo téma elektromobility, jak v osobní, tak veřejné dopravě a její zvyšující se trend. Tato kombinace potřeby nového kolejového vozidla pro regionální tratě a zvyšující se trend elektromobility mě přivedla k myšlence vytvořit kolejový elektrobús.

Moje práce tedy navazuje právě na poslední zmiňované téma diplomové práce Hybridní pohon kolejového autobusu [13]. Rád bych tím rozšířil studii částečně nízkopodlažního kolejového autobusu o možnost čistě elektrického bateriového pohonu.

Cílem této práce je tedy ověřit, nakolik reálná je myšlenka na vývoj kolejového autobusu s čistě akumulátorovou trakcí. Tedy zda lze tuto variantu použít místo konvenčního kolejového autobusu se spalovacím motorem, či místo hybridního provedení.

2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobusů

Před vlastním koncepčním řešením pohonu kolejového elektrobusu jsem se nejprve zabýval rešerší trolejbusů, silničních a kolejových elektrobusů. V následující kapitole uvádím vozidla, jejichž komponenty jsou inspirací pro koncepční řešení pohonu kolejového elektrobusu. Jde např. o motor, baterie, další komponenty elektrovýzbroje, či přenos výkonu na kola.

2.1. Silniční vozidla

V současné době je bateriový pohon často využíván u silničních vozidel. Jde např. o elektromobily či elektrobusy. Právě elektrobusy mají svou koncepcí pohonu nejbližší k navrhovanému kolejovému elektrobusu. Proto se v této části rešerše zaměřím zejména na tuto kategorii vozidel. Bateriový pohon je používán zejména u městských nízkopodlažních elektrobusů. Mezi české výrobce elektrobusů patří Škoda Electric a. s. a SOR Libchavy spol. s r.o., jejichž elektrobusy zde uvedu.

Základní koncepci bateriových pohonů uvedu zejména u příkladů elektrobusů Škoda Electric a. s., neboť o nich jsem získal nejvíce informací. Na dalších vozidlech ukážu jiná zajímavá řešení elektrických pohonů.

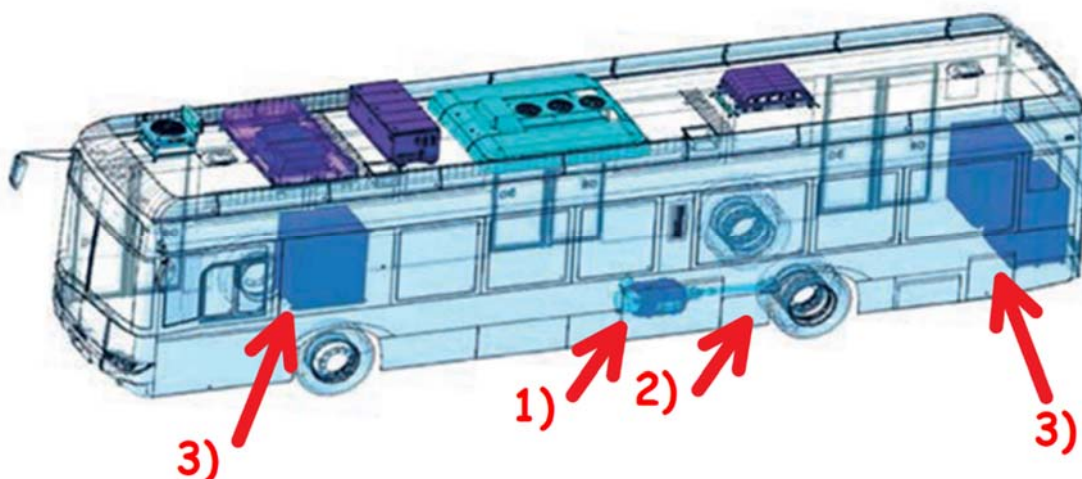
Také je důležité zmínit, že elektrobusy jsou již zavedeným typem vozidla, ačkoliv jejich výroba je stále spíše kusová. Stejně tak využití bateriového pohonu v tramvajích není úplně neobvyklé. Nicméně použití bateriového pohonu v kolejových vozidlech je výjimečnou záležitostí a týká se pouze vozidel s dvounápravovými podvozky, nikoli však vozidel s podvozky jednonápravovými. V případě kolejového elektrobusu by se jednalo právě o použití bateriového pohonu u vozu s jednonápravovými podvozky. Existují alespoň některá vozidla závislé elektrické trakce, která jsou vybavena jednonápravovými podvozky.¹

¹ Příklad elektrického pohonu dvounápravového podvozku uvádím v kapitole 5. Analýza řešení individuálního pohonu dvojkolí, v podkapitole 5.5 Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí na str. 44.

2.1.1. Škoda Perun HE (High Energy)

Škoda Electric a. s. se zabývá výrobou trakčních pohonů a trolejbusů a od roku 2013 také výrobou elektrobuses. Elektrobuses Perun HE, zmiňovaný v úvodu (viz Obr. 2 na str. 9), je jednou ze dvou variant elektrobuses Perun. Tyto verze se od sebe liší pouze v některých parametrech baterií, a tedy i dojezdem na jedno dobítí, což popíšu v následujícím textu.

Na 3D modelu na Obr. 6 lze vidět rozmístění důležitých částí pohonu elektrobuses Perun HE. Tento elektrobuses je poháněn centrálním elektromotorem o výkonu 160 kW (1). Od motoru k nápravové kuželové převodovce vede kloubový Kardanův hřídel. Přenos výkonu na kola je vzhledem k nízkopodlažnímu uspořádání elektrobuses řešen portálovou nápravou ZF 132AV/80 (2), využívanou také např. u trolejbusů Škoda. Na pozicích (3) jsou bateriové packy (z anglického battery pack = soubor baterií, bateriových článků). [15]



Obr. 6 – Škoda Perun HE [16]

V případě elektrobuses Perun HE jde o vzduchem chlazené bateriové lithium-iontové (li-ion) články. Konkrétně jde o typ nikl-mangano-kobaltových článků (anglicky Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, dále jen NMC). Celková kapacita baterií je 222 kWh a dojezd na jedno dobítí je 150 km (při vyčerpání 80 % kapacity baterií). Pracovní napětí v bateriích je 600 V. [17] NMC články nezvládají tak vysoké nabíjecí proudy jako články použité u verze Perun HP. Rozdíl v nabíjecích proudech obou variant vysvětlím až v následující podkapitole Škoda Perun HP (High Power) na str. 14.

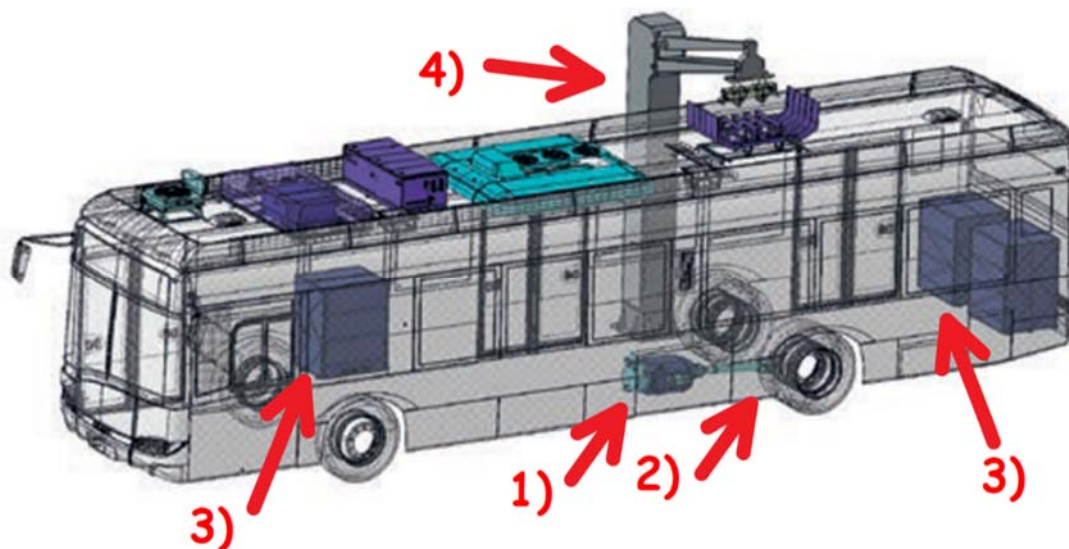
Váha baterií by měla být u obou variant elektrobuses asi 2 310 kg. [18] Baterie lze dobít během 70 minut rychlodobíjením, nebo během 6-8 hodin přes noc s vyvažováním bateriových článků. Na rozdíl od modelu Perun HP je tento elektrobuses vhodný pro linky, kde nelze postavit rychlonabíjecí infrastrukturu, anebo na dobítí není časová kapacita. Předpokládá se tedy, že elektrobuses vydrží na jedno dobítí v provozu celý den. [17]

Životnost baterií odpovídá zhruba polovině životnosti elektrobuses, poté je nutná jejich výměna za nové. Baterie však nemusí být využívány v celém rozsahu kapacity

a tím se může zvýšit jejich životnost. Např. při pracovním rozsahu 15-85 % celkové kapacity lze počet nabíjecích cyklů, tedy životnost baterie, zvýšit až dvojnásobně. [18]

2.1.2. Škoda Perun HP (High Power)

Elektrobus Perun HP na 3D modelu na Obr. 7 je poháněn centrálním asynchronním motorem (1) o výkonu 160 kW. Přenos výkonu na kola je i u této varianty řešen pomocí Kardanova hřídele a nápravové kuželové převodovky v portálové nápravě ZF 132AV/80 (2). Bateriové články jsou rozmístěny do tří bateriových packů na pozici (3), tedy stejně jako u předchozí varianty. Během provozu jsou využívány rychlodobíjecí stanice Škoda se střešním dobíjením (4).



Obr. 7 – Škoda Perun HP [19]

Baterie jsou řešeny modulárně, je tedy možné je přizpůsobit požadavkům zákazníka. U varianty HP jsou použity kapalinou chlazené, bezúdržbové lithium-titanové články (anglicky lithium titanate oxide, dále jen LTO). Váha baterií je 2 310 kg. [20] Celková kapacita článků je 78 kWh, [21], což je u elektrobusů nízká hodnota a znamená to také kratší dojezd. Dále však vysvětlím důvod této nízké kapacity.

Pracovní napětí baterií je 600 V, maximální proud je při rychlodobíjení až 1000 A. Běžně se však používají nabíjecí proudy 100-400 A, jako např. u předchozí zmiňované varianty HE. [22] Články LTO mají také mnohem vyšší počet nabíjecích cyklů oproti jiným typům li-ion baterií, proto je možné takové baterie nabíjet pomocí rychlodobíjení několikrát denně. Zvládají také větší rozsahy teplot a jsou bezpečnější. Na druhou stranu, kromě nízké kapacity je další nevýhodou vyšší cena oproti jiným typům bateriových článků. [22] Nízká kapacita je však kompenzována právě častým rychlodobíjením na konečných stanicích a možnostmi vyšších nabíjecích proudů.

Výrobce uvádí dojezd na jedno dobití 30 km. Rychlodobíjecí stanice Škoda mohou být umístěny na konečných stanicích, případně v zastávkách. Tímto způsobem lze dobít baterie během 6-8 minut. Přes noc probíhá noční zásuvkové dobíjení s vyvažováním bateriových článků, které trvá 6-8 hodin. [21]

Co se týče baterií jako celku, udržení jednotlivých bateriových článků v každém bateriovém packu při těch nejlepších podmínkách zajišťuje tzv. management bateriových systémů (anglicky Battery Management System, zkráceně BMS). Tento systém může zajistit podmínky pro optimální funkci jednotlivých článků i v zimním období. Pomocí BMS lze u baterií dosáhnout optimální teploty během krátké doby po zahájení každodenního provozu. Dále již při celodenním provozu pracují baterie v optimálních provozních podmínkách. [18]

2.1.3. SOR EBN

SOR Libchavy spol. s r.o. je tradičním českým výrobcem autobusů, v posledních letech se však také zabývá vývojem elektrobuses. V současné době nabízí elektrobusey ve dvou variantách: EBN 8 a EBN 10,5 (viz Obr. 8). [23] Číslo znamená délku elektrobuse v metrech, což je rozdíl mezi těmito variantami.



Obr. 8 – SOR EBN 10,5 [24]

Elektrobusey EBN pohání asynchronní šestipólový kapalinou chlazený elektromotor TAM 1052 C6B o výkonu 120 kW, s krouticím momentem 968 Nm. Výrobcem elektromotoru je společnost Pragoimex.

Součástí elektrické trakční výzbroje varianty EBN 10,5 je trakční měnič SBE 10 od firmy Cegelec. Tento měnič umožňuje také rekuperaci¹ a dobíjení baterií [25]. Hnací náprava je typu DANA G 150. Výrobce uvádí použití tohoto elektrobuse také jako meziměstský. [24]

V Praze je od června 2015 testován elektrobuse SOR EBN 11². Tento elektrobuse může najet 265-350 km na jedno nabití. [26] Li-ion baterie mají kapacitu 172 kWh a pracují s trakčním³ napětím 600 V. Baterie lze dobíjet proudem až 250 A, přičemž napájecí napětí bude zřejmě u varianty EBN 11 podle článku [27] stejné, jako u EBN 8. K EBN 10,5 jsem informace o napájecím napětí nenašel.

¹ Rekuperace = přeměna kinetické energie vozidla z brzdění na využitelnou elektrickou energii, ukládanou např. do baterií.

² Zřejmě se jedná o starší variantu, kterou výrobce nyní nenabízí.

³ Trakce = pohon vozidla.

Elektromotor lze provozovat se špičkovým výkonem 180 kW při napájecím napětí 400 V. Trvalý výkon elektromotoru je 120 kW při napájecím napětí 400 V. Převodový poměr u elektrobuse EBN 11 je 1:6,5. [28]. Váha lithium-železo-fosfátových baterií (Lithium iron phosphate, dále jen LFP), bude dle vlastních propočtů cca 1,8 t. Vycházel jsem z údajů dle katalogu baterií Winston [29].

2.1.4. BYD 12M electric bus

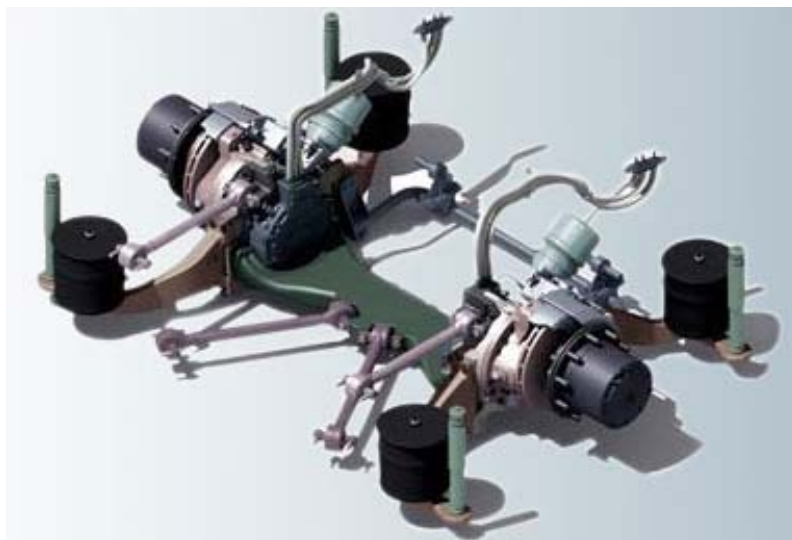
Jako zástupce zahraničních výrobců jsem vybral čínskou společnost BYD, která se zabývá také např. výrobou automobilů či vlastních elektrických komponent. Elektrobuse BYD 12M (Obr. 9) byl testován v Ostravě. [30]



Obr. 9 – BYD 12M electric bus [31]

Hnací náprava, viz Obr. 10, využívá řešení pohonu pomocí nábojových motorů, které jsou synchronní s permanentními magnety (z anglického permanent magnet synchronous motor, zkráceně PMSM). Každý motor typu BYD TYC90A má jmenovitý výkon 75 kW, maximální výkon 90 kW a krouticí moment 350 Nm. [30] Výrobce uvádí, že tímto řešením pohonu lze ušetřit 300 kg oproti běžné koncepci centrálního elektromotoru. Je díky tomu dosaženo vyšší efektivity přenosu výkonu díky absenci převodovky a také to snižuje hlučnost elektrobuse. [32]

Tato náprava je vhodná při použití pneumatik, tedy odpružených kol. Pro železniční vozidla s nevypruženými koly je toto řešení nevhodné s ohledem na velké procento neodpružených hmot.



Obr. 10 – Hnací náprava BYD 12M [32]

Baterie jsou rozmístěny v elektrobusech vpředu nad koly, vzadu v podlaze a na střeše, jak je patrné z 3D modelu na Obr. 11. Výrobce si vyvinul vlastní LFP baterie, které mají v tomto elektrobusech kapacitu 324 kWh. [33]



Obr. 11 – BYD 12M electric bus [31]

Typ baterie LFP byl v Číně v dopravních prostředcích ještě donedávna často používán. V roce 2016 bylo však oznámeno, že výrobci přechází na použití typu baterie NMC, které jsou např. použity u výše zmíněného elektrobusech Škoda Perun HE. Tyto baterie mají totiž lepší vlastnosti pro použití v elektromobilech a elektrobusech než baterie LFP. [34]

Výrobce BYD udává dojezd 250 km na jedno nabití a možnost 4000 nabíjecích cyklů. [33] Životnost baterií by měla odpovídat najetí cca 1 milionu kilometrů. V ostravském provozu vozidlo spotřebovalo v průměru 1,3 kWh/km. To je údajně o 10 % více než v současně době testovaný elektrobusech SOR EBN 10,5. Baterie jsou při dobíjení napájeny napájecím napětím 400 V, při maximálním elektrickém proudu 126 A. [31] Provozní napětí je 540 V. [32] Podle informací o bateriích LFP, které jsou použity také v elektromobilu BYD e6, lze dopočítat přibližnou váhu baterií. [35] Vlastním výpočtem jsem dospěl k váze přibližně 3,7 t. Další informace např. o přesné hmotnosti baterií či trakční výzbroji se mi k tomuto elektrobusech nepodařilo dohledat.

2.1.5. Solaris Trolino 12

Možnou inspirací pro bateriový kolejový autobus by mohl být také parciální trolejbus Trolino 12 od polského výrobce Solaris. Parciální trolejbus je trolejbus, který po části své trasy jede bez troleje a využívá při tom energii z baterií, případně z pomocného diesela. Toto řešení by mohlo být možnou inspirací pro kolejový elektrobuses, neboť by byl zřejmě provozován také na elektrifikované části tratí.

Tento parciální trolejbus využívá trakční výzbroj Škoda, motor má výkon 160 kW a baterie mají kapacitu 57,6 kWh. Tento trolejbus je např. provozován ve švédském městě Landskrona, kde z celkové trasy 21,9km jede 13,5km (62%) na baterie. [36]



Obr. 12 – Trolejbus Solaris Trolino 12 ve švédském městě Landskrona [37]

2.2. Kolejová vozidla

2.2.1. Alstom Citadis Dualis

Parciální trolejbusy tvoří zvláštní kategorii silničních vozidel městské hromadné dopravy. Jinou zvláštní kategorií, tentokrát však v oblasti kolejových vozidel, jsou vozidla typu tram-train. Český také označováno jako vlakotramvaj [27]. Jedná se o typ vozidla, který může být provozován jak v městské tramvajové síti, tak i na části železniční sítě. Mezi zajímavosti této tramvaje patří také pohon synchronním motorem s permanentními magnety¹.

Dosud jsem popisoval silniční vozidla, která jsou inspirací pro kolejový elektrobus. Tram-train může být další inspirací pro nové lehké kolejové vozidlo pro regionální tratě.² Pro kolejový elektrobus by mohlo být vzorem provozování tram-trains jako dvousystémové vozidlo – provoz na stejnosměrné tramvajové síti 750 V a provoz na železniční síti se střídavým napětím 25 kV 50 Hz.³ [38]



Obr. 13 – Alstom Citadis Dualis [38]

¹ Bližší popis motoru uvádím také v kapitole 7. Koncepční řešení navrženého pohonu, podkapitola 7.2. Motor (str. 63).

² Další možností by mohla být změna koncepce nového vozidla pro regionální tratě na vozidlo podobné tramvajím či tram-trains, např. zkrácená verze článkové tramvaje, jako je na Obr. 13. Toto je však pouze námět pro další rozvoj myšlenky nového kolejového vozidla pro regionální tratě, v této diplomové práci se věnuji výhradně dvounápravovému kolejovému elektrobusu.

³ V ČR a většině evropských zemí je právě napájecí soustava 25 kV 50 Hz velmi často používána. Dále je často používána stejnosměrná soustava 3 kV. Pro provoz elektrobusu a nabíjení baterií za jízdy by však musel být kolejový elektrobus těmto soustavám přizpůsoben. Jednalo by se např. o nutnost použití transformátoru pro provoz na střídavé síti 25 kV 50 Hz. V této diplomové práci však uvažuji pouze provoz kolejového elektrobusu napájeného z baterií a dobíjení z nabíjecí stanice.

2.2.2. Hitachi BEC 819 „Dencha“

Od jara roku 2017 je na severu Japonska na trati Akita – Oiwake – Oga provozována dvouvozová bateriová jednotka BEC 819 (Obr. 14). Tuto jednotku vyrábí japonská společnost Hitachi pod obchodním názvem „Dencha“. Akronym „Dencha“ znamená Dual Energy Charge Train, což označuje dvousilové vozidlo, tedy vozidlo schopné provozu v systému závislé i nezávislé trakce. Z dostupných zdrojů to vypadá, že jde v současnosti o jediný bateriový vlak na světě, který je provozován na regionálních tratích.



Obr. 14 – Hitachi BEC 819 „Dencha“

Na 13 km trase mezi Akita a Oiwake je jednotka provozována na závislé trakti z trakčního vedení 20 kV 60 Hz. Zde může jednotka jezdit maximální rychlostí 120 km/h. Z Oiwake do stanice Oga (26,6 km) je jednotka napájena z akumulátorů a může jet sníženou rychlostí 85 km/h.

Jednotka se skládá ze dvou čtyřnápravových podvozkových vozů, a to z hnacího a běžného vozu. Hnací vůz má poháněna všechna dvojkolí, a to celkem čtyřmi motory o výkonu 95 kW. Celkový výkon jednotky je tedy 380 kW. Pohon je příčně orientovaný, řešený podobně jako např. pohon pražského metra M1, tedy motor, spojka tvořící kardanův kloub a jednostupňová převodovka¹.

Lithiové baterie jednotky BEC 819 mají celkovou kapacitu 383,6 kWh a pracují při napětí 1600 V, přetížitelné na 1814 V. Z dostupných údajů není možné

¹ Více informací o tomto typu pohonu viz kapitola 5. Analýza řešení individuálního pohonu dvojkolí, podkapitola 5.4. Příčně orientovaný částečně odpružený pohon (str. 42).

přesně určit váhu akumulátorů. Je pouze známo, že tato bateriová jednotka se od své výchozí elektrické jednotky liší o 7,5 t. Lze předpokládat, že větší část této hmotnosti připadá na baterie.

Vzhledem k napájecí střídavé soustavě 20kV 60 Hz je v této jednotce nutností použit trakční transformátor. Při provozu jednotky na této napájecí soustavě jsou zároveň nabíjeny baterie. Oproti elektrobusem a trolejbusům z předchozí kapitoly musí být tedy tato jednotka vybavena transformátorem.¹

2.3. Porovnání parametrů baterií silničních a kolejových elektrobusem

V následující tabulce 1 jsou porovnány parametry zmíněných silničních elektrobusem. U trolejbusu Solaris Trollino 12 se mi všechny údaje zjistit nepodařilo. Vzhledem k nedostatku dostupných informací o japonské jednotce Hitachi BEC 819 uvádím pouze informaci o kapacitě baterií. Z toho je patrné, že kolejový elektrobusem bude vyžadovat násobně větší kapacitu baterií, než která je běžná u silničních elektrobusem.

Vozidlo	Kapacita	Váha	Energetická hustota	Dojezd	Spotřeba energie
	[kWh]	[t]	[Wh/kg]	[km]	[kWh/km]
Perun HE	222	2,31	96,1	150	1,5
Perun HP	78	2,31	33,8	30	2,6
SOR EBN	172	1,8	95,6	160	1,1
BYD 12M	324	2,6 ÷ 3,25	100 ÷ 125	250	1,3
Solaris Trollino 12	57,6	-	-	6	9,6
Hitachi BEC 819	360	-	-	-	-

Tabulka 1 – Porovnání parametrů vybraných silničních a kolejových elektrobusem

Energetická hustota bývá v dnešní době u li-on baterií (zejména NMC a podobných typů) běžně kolem 100 Wh/kg i vyšší. Výjimkou jsou baterie použité u elektrobusem Perun HP, které mají sice nižší energetickou hustotu, ale mají např. vyšší nabíjecí proudy a umožňují častější dobíjení, jak jsem zmiňoval v podkapitole 2.1.2. Škoda Perun HP (High Power) na str. 14.

Dojezd vozidel odpovídá kapacitě baterií. Spotřeba energie u elektrobusem Perun HP je zhruba dvakrát vyšší než u jiných elektrobusem, což je dáno popsányými specifickými vlastnostmi LTO baterií.

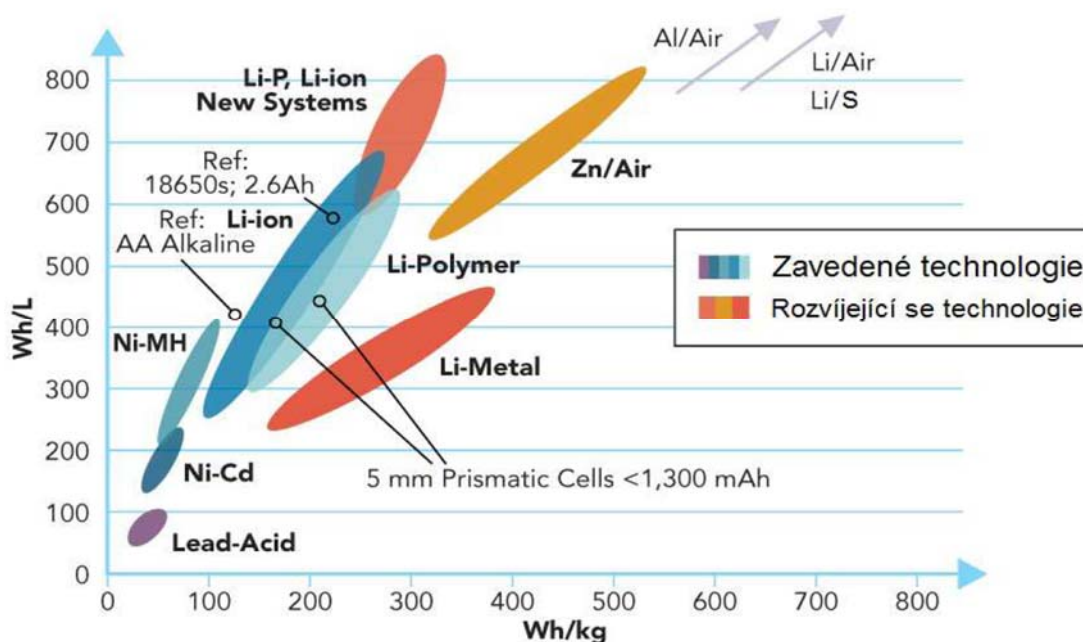
¹ Většina informací pochází ze strojového překladu japonské stránky na Wikipedii, viz: <https://ja.wikipedia.org/wiki/JR%E4%B9%9D%E5%B7%9EBEC819%E7%B3%BB%E9%9B%BB%E8%BB%8A>

Pro kolejový elektrobús z rešerše silničných a kolejových elektrobúsů plyne závěr, že je potřeba použít typ baterie NMC. Vhodnost NMC baterií byla také zmíněna na přednášce E-mobilita od Škody Electric [18].

2.4. Trendy vývoje bateriových pohonů

Ve fázi vývoje jsou v současnosti baterie na bázi např. lithium-síra nebo lithium-vzduch, jak je vidět z grafu 1. Na vodorovné ose je energetická hustota vztažená na hmotnost v kilogramech, tedy kolik energie se vejde do 1 kg baterií. Na svislé ose je energetická hustota vztažená na objem v litrech, což znamená, kolik energie se vejde do 1 litru v prostoru vozidla. Zmiňované baterie NMC např. patří do skupiny Li-ion v grafu.

Zřejmě však bude vývoj takový, že se budou ve velkém vyrábět různé variace současných již vyvinutých li-ion baterií. V minulosti proběhly totiž obrovské investice do vývoje a výroby li-ion baterií. Znovu investovat do výroby nového typu baterie by tedy znamenalo další obrovské množství finančních prostředků, přičemž by stávající drahá výrobní zařízení nebyly využity. Naopak využití současných výrobních linek a snaha o výrobu co největšího počtu bateriových článků bude zřejmě trendem v nejbližších letech, čímž se také sníží cena současných li-ion baterií. [18]



Graf 1 – Porovnání energetické hustoty pro různé typy bateriových článků [18]

3. Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy

V následujícím textu krátce popisují legislativní, normativní a technické požadavky, které se týkají této diplomové práce, tedy koncepčního řešení pohonu kolejového elektrobuse. Na úvod bych rád vysvětlil tyto pojmy a jaký mají význam.

3.1. Vysvětlení základních pojmů

Legislativní požadavky na kolejová vozidla jsou závazná a jsou dány zákonem. Jde např. o směrnice EU týkající se technických specifikací interoperability.

Normativní požadavky vyplývají z jednotlivých norem. Norma není právně závazná, jde o dobrovolné dodržování. Normy popisují aktuální stav techniky. Přesto že normy nejsou vyžadovány např. zákonem, je pravidlem, že se výrobce s provozovatelem kolejových vozidel domluví na technických podmínkách pro vozidlo, ve kterých provozovatel trvá na návrhu podle některých norem. Normy, které zde uvádím, předpokládám, že budou potenciálním zákazníkem vyžadovány.

Technické požadavky se týkají již zmíněných technických podmínek domluvených mezi výrobcem a zákazníkem, tedy dopravcem, který bude vozidlo provozovat. Jsou to okrajové podmínky, limity, které vozidlo nesmí překročit, jinak by mohlo dojít k porušení bezpečnosti, konstrukcí atd.

Zmiňuji zde pouze nejdůležitější normy, předpisy a technické podmínky týkající se mého návrhu koncepčního řešení pohonu kolejového elektrobuse. Nejde tedy o úplný soupis, který by v případě reálné zakázky na výrobu elektrobuse zahrnoval větší množství norem a předpisů dle dohody mezi výrobcem a zákazníkem.

3.2. Traťové třídy a zatížení – UIC 700

Vzhledem k tomu, že kolejový elektrobuse bude provozován na regionálních tratích, kde nejsou provozována vozidla s nápravovým zatížením 22,5 t, je potřeba respektovat vyhlášku UIC 700. Je to z toho důvodu, že únosnost regionálních tratí je nižší, než např. na hlavních koridorových tratích. Tato vyhláška rozděluje tratě do kategorií podle zatížení na nápravu, viz tabulka 2. V tabulce 2 jsem žlutě vyznačil kategorie tratí, na kterých předpokládám nasazení kolejového elektrobuse. Mapa traťových tříd ČR je dále na Obr. 15.

Kategorie trati	A	B1	B2	C2	C3	C4	D2	D3	D4	E4	E5	F	G
	dle UIC 700											TSI	
Maximální hmotnost na nápravu [t]	16	18	18	20	20	20	22,5	22,5	22,5	25	25	27,5	30
Maximální hmotnost na jednotku délky [t/m]	5	5	6,4	6,4	7,2	8	6,4	7,2	8	8	8,8	10	10

Tabulka 2 – Dělení tratí podle zatížení dle vyhlášky UIC 700 [39]

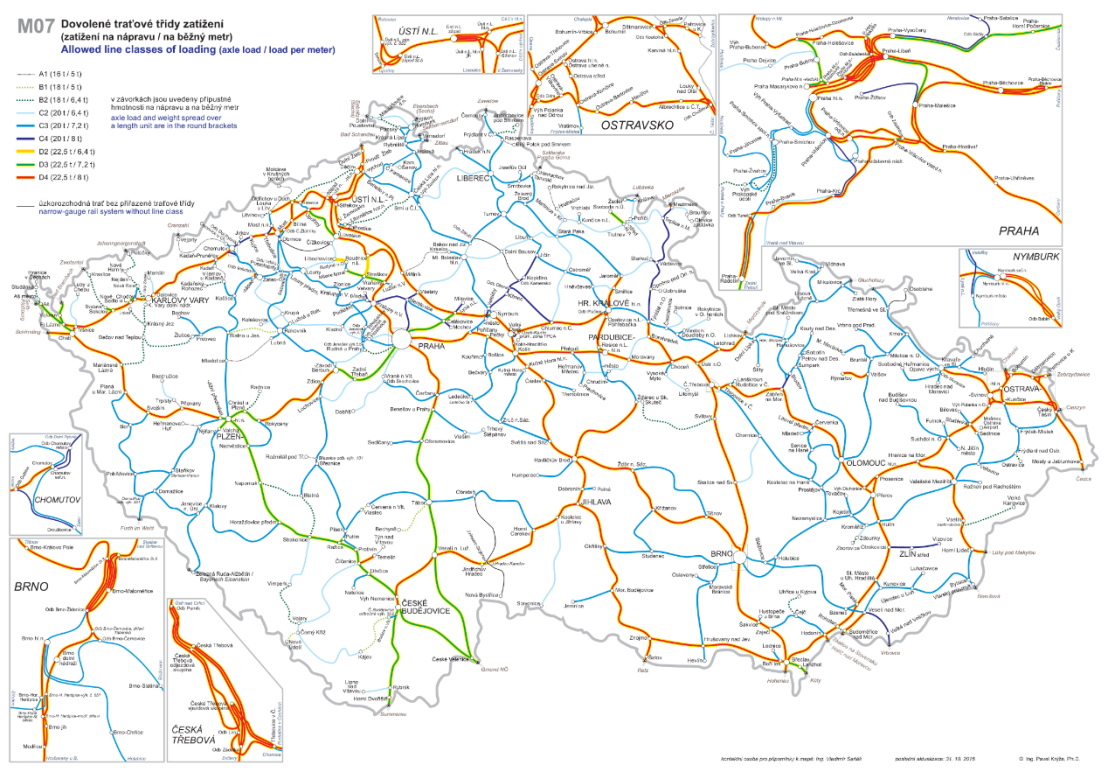
Analyzoval jsem traťové úseky podle jednotlivých vyznačených kategorií a dospěl jsem k důležitému závěru, že kategorie tratí A se v ČR nachází velmi málo. Tyto tratě s maximální nápravovým zatížením 16 t jsem vyznačil na Obr. 16.

Tratí kategorie B1 a B2 s nápravovým zatížením 18 t, které se dle tabulky liší pouze maximální hmotností na jednotku délky, je již o něco více.

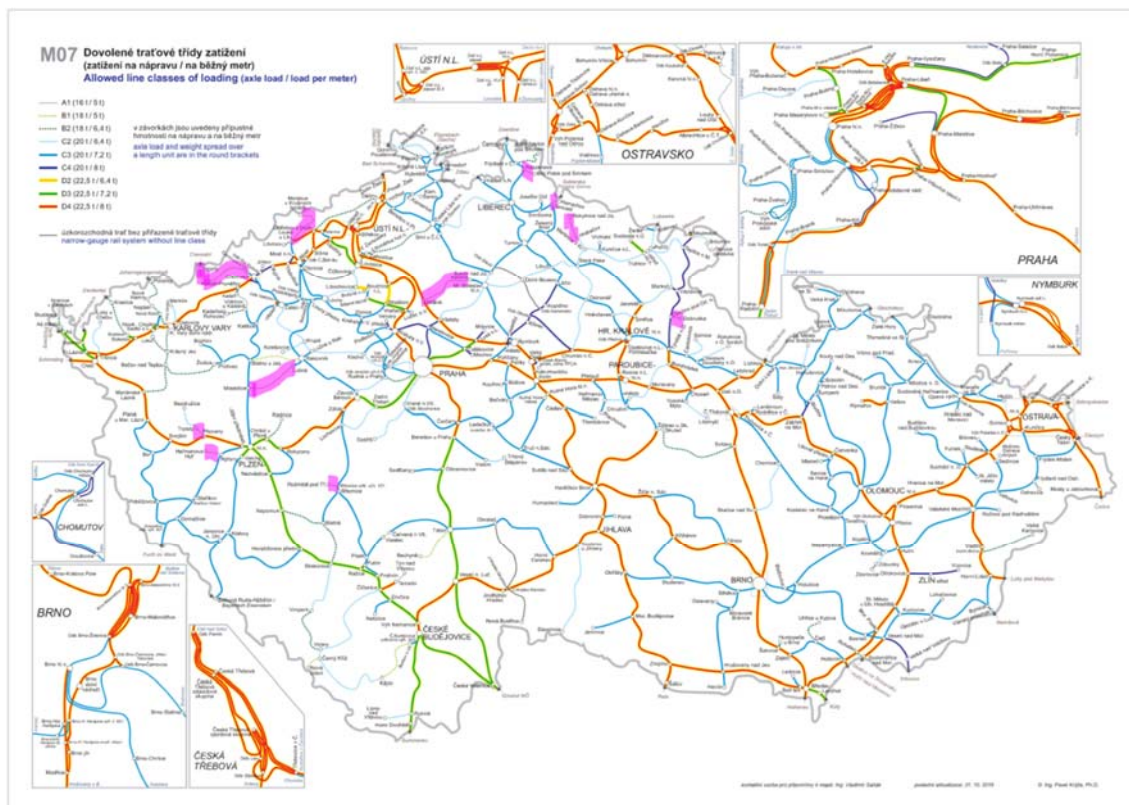
Mimo hlavní tratě, tedy na regionálních tratích, jsou nejpočetnější kategorií tratě C2, C3 a C4 s nápravovým zatížením 20 t.

Z předchozí analýzy plyne, že nejčastěji bude provozován kolejový elektrobus na tratích s nápravovým zatížením 18-20 t, případně na části hlavních tratí 22,5t. Teoreticky lze předpokládat, že by kolejový elektrobus mohl mít konstrukci nevyhovující kategorii A, ale vyhovující kategorii B1 či B2.

Přes nízké zastoupení tratí kategorie A však budu počítat s tím, že kolejový elektrobus bude provozován i na těchto tratích a tímto tedy limituji maximální zatížení na 16 t na nápravu. Je to také součástí filosofie lehkých kolejových autobusů, které jsem zmiňoval v úvodu. Hmotnost vozidla je vhodné snižovat zejména kvůli provozním nákladům.respektive ceně za nákup a provoz kolejového elektrobusu.



Obr. 15 – Dovolené traťové třídy zatížení [40]



Obr. 16 – Dovolené traťové třídy zatížení (vlastní úprava)

3.3. Upevnění komponent na skříni vozidla – ČSN EN 12 663

Ve své diplomové práci řeším také umístění některých komponent na skříň vozidla. Upevňováním prvků na skříň vozidla se zabývá norma ČSN EN 12 663. Tato norma se obecně zabývá pevnostními požadavky na kolejová vozidla. V kapitole 7. Koncepční řešení navrženého pohonu, podkapitole 7.5. Baterie (str. 66) se zabývám také koncepčním řešením umístění bateriového power-packu¹ na spodku skříně kolejového elektrobuse. Při návrhu tohoto řešení je potřeba respektovat právě výše zmiňovanou normu.






Kolejová vozidla jsou dle normy ČSN EN 12 663 členěna do kategorií nákladní vozy a dále vozidla osobní dopravy a lokomotivy. Pro vozidla osobní dopravy existuje pět kategorií, P-I až P-V, viz Tabulka 3 na následující stránce.

Původní návrh skříně kolejového autobusu byl navržen pro kategorii P-III. [11] Milan Šíp však došel k závěru, že by optimalizací konstrukce hrubé stavby skříně kolejového autobusu mohlo být dosaženo zařazení do kategorie P-II. Dále tedy předpokládám, že by této optimalizace mohlo být např. v další diplomové práci dosaženo a uvažuji kolejový elektrobuse jako vozidlo kategorie P-II.

Tato kategorie také umožňuje provoz kolejového elektrobuse na hlavních tratích, kde by mohlo dojít ke střetu vozidla s vozidlem kategorie P-I, např. rychlíkem taženým

¹ power pack = část pohonu vozidla která se může skládat z motoru, převodovky nebo dalších pomocných komponent pohonu [56]

lokomotivou. Kategorie P-III by znamenala oddělit provoz těchto vozidel a kolejový elektrobus by musel zajíždět na vedlejší koleje u velkých nádraží, což by mohlo komplikovat pohyb cestujících při přestupu právě na přípojné vlaky vyšší kategorie.

P-I	osobní vozy a lokomotivy	
P-II	ucelené motorové a elektrické jednotky	
P-III	jednotky metra a rychlé předměstské a městské dopravy	
P-IV	jednotky lehkého metra a tramvajové rychlodráhy	
P-V	tramvajová vozidla	

Tabulka 3 – Rozdělení kolejových vozidel do kategorií dle ČSN EN 12 663 [41] [11]

V této diplomové práci je pro mne podstatná zejména část normy ČSN EN 12 663 řešící statické zatížení pro upevňovací prvky na skříní vozidla. Pro upevnění zařízení o hmotnosti m_z platí různé hodnoty v osách souřadného systému vozidla, viz Tabulka 4.

Směr zatížení	Statické zatížení upevňovacích prvků [kN]
- v podélném směru – osa x	$\min. \pm m_z \cdot 3g$
- v příčném směru – osa y	$\pm m_z \cdot g$
- ve svislém směru – osa z	$\pm(1 + c) \cdot m_z \cdot g$

Tabulka 4 – Statické zatížení pro upevnění zařízení na vozidle kategorie P-II

kde $g [m \cdot s^{-2}]$ je tíhové zrychlení a parametr $c = 2$ platí pro upevnění na konci vozidla a snižuje se lineárně ke středu vozidla ($c = 0$).

3.4. Obrys pro konstrukci vozidla – ČSN 28 0312

Kromě upevnění je potřeba řešit také prostorové nároky na umístění komponent na vozidle. Vozidlo by pro provoz v ČR mělo splňovat průjezdný obrys dle normy ČSN 28 0312¹. V koncepčním návrhu zástavby baterií uvažuji upevnění kontejneru s bateriemi na spodek skříně², kde je právě důležité, aby tento kontejner splňoval podmínky pro obrys. Stejně tak dále navrhuji koncepční řešení pohonu v podvozku kolejového elektrobuse, který by opět měl splňovat obrys dle této normy.

3.5. Bezpečnost bateriových systémů EHK³

Pro silniční elektrobuse platí předpis EHK č. 100, který se v části II zabývá bezpečností REESS (Rechargeable Energy Storage systems, systémy dobíjecích uložišť energie). Předpokládám, že pro použití baterií v kolejovém elektrobuse by platila obdobná pravidla.

Uvádím pouze stručný přehled některých nejdůležitějších bodů tohoto předpisu. Pro silniční elektrobuse jsou obzvláště důležité zkoušky vibrací, mechanického nárazu a odolnosti proti ohni.

Zkouška vibrací simuluje vibrující prostředí při provozu vozidla. Bateriový systém je zkoušen v různém rozsahu frekvencí pro určitá zrychlení.

Mechanický náraz simuluje rychlostní zatížení při nehodě vozidla. V předpisu jsou stanoveny hodnoty zrychlení pro podélný a příčný směr. Při nárazu např. nesmí dojít k úniku elektrolytu.

Odolnost proti ohni je testována, pokud bateriový systém obsahuje vznětlivý elektrolyt, nebo je na vozidle umístěn méně než 1,5m nad vozovkou. Jsou definovány doby vystavení předeřívání, přímým a nepřímým plamenům.

Ve všech třech případech je po zkoušce bateriový systém pozorován určitou dobu, definovanou pro každou zkoušku. [18]

3.6. Uspořádání sedadel – UIC 567

Vzhledem k tomu, že se následující kapitole zabývám typovým výkresem a rozmístěním sedadel, je třeba respektovat vyhlášku UIC 567. V této vyhlášce jsou doporučené ergonomické požadavky na uspořádání sedadel.

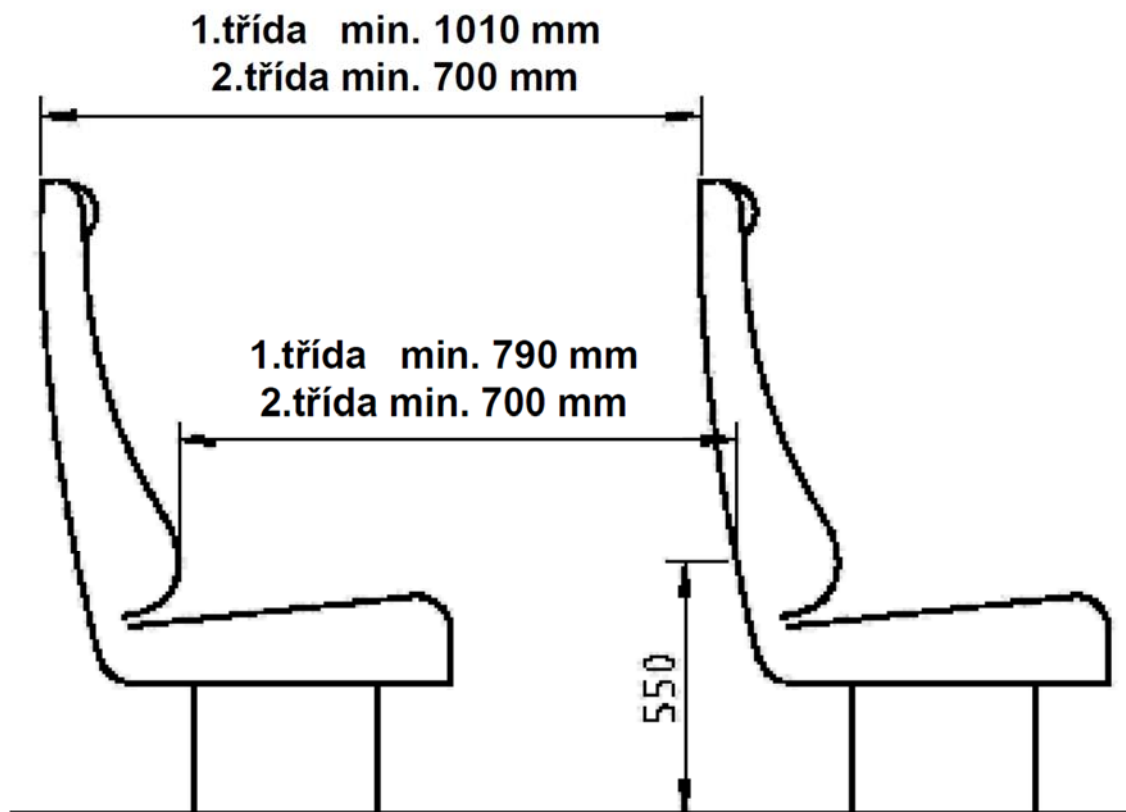
Přestože byla vyhláška aktualizována v roce 2004, důležité rozměry mezi sedadly již nelze považovat za aktuální. Např. vzdálenosti mezi sedadly pro 2. třídu jsou pro vzrůst osob dnešní doby značně malé, viz Obr. 17. Přestože je v tomto ohledu vyhláška již zastaralá, použiju jí jako vzor pro návrh rozmístění sedadel v kolejovém elektrobuse. Rozměry na Obr. 17 budu vzhledem k většímu vzrůstu osob v dnešní době předpokládat

¹ Pokud by byl kolejový elektrobuse nabízen i do jiných zemí, musel by se návrh eventuálně přizpůsobit národní normě upravující obrys v dané zemi. Např. pro provoz ve Velké Británii je potřeba menší průjezdný průřez vozidla, zatímco v Rusku či USA jsou obrysy naopak větší.

² Tímto řešením se zabývám v kapitole 7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobuse, 7.5. Baterie (str. 66).

³ EHK = Evropská hospodářská komise OSN

větší. Podobným způsobem budu postupovat při rozmisťování sedadel uspořádaných proti sobě.



Obr. 17 – Ergonomické požadavky dle normy UIC 567, Sedadla uspořádána za sebou [42]

3.7. Kapacita (osob)

Abych si udělal obrázek o využití vlaků na regionálních tratích, zjišťoval jsem vytíženost spojů na vybraných tratích. To dále poslouží jako východisko pro předpokládanou vytíženost kolejového elektrobuse, tedy počet sedících, eventuálně stojících cestujících. Jde pouze o vybrané tratě ze středočeského a plzeňského kraje, nejedná se tedy o úplný či reprezentativní přehled vytíženosti regionálních tratí v ČR.

Například ve středočeském kraji patří mezi nejvytíženější spoje spěšný vlak Sp 1885 na trati Hostivice – Praha-Veleslavín, který podle dat z října 2015 byl vytížen na 119 %. [43] Tento vlak se skládá ze dvou spřažených jednotek Regionova (Obr. 18).






Obr. 18 – Řazení vlaku Sp 1885 [44]

Celková kapacita vlaku (místa k sezení) je tedy 168 míst. Vytížení tohoto vlaku Sp 1885 je 199 míst, tedy 31 stojících cestujících. V následující kapitole z těchto údajů vycházím

a budu předpokládat přibližně podobnou vytíženost kolejového elektrobuse, eventuálně několika sprážených elektrobuseů za sebou.

Na druhou stranu jsem z Plzeňského kraje vybral trať, po jejíž části často cestuji. Jedná se o část trati č. 184 Domažlice – Planá u Mariánských Lázní, konkrétně úsek Tachov – Planá u Mariánských Lázní. Tento úsek patří k více vytíženým úsekům celé trati, nicméně v žádném případě se nejedná o přetíženou trať v porovnání se zmiňovanou tratí ve Středočeském kraji. Nejvyšší vytížení spojů na tomto úseku bude zřejmě v pátek a v neděli, kdy cestuje do školy spousta studentů. Z vlastní zkušenosti bych odhadoval vytížení tohoto úseku v tyto dny na cca 50-75 %. Předpokládám, že nezanedbatelné množství jiných spojů na regionálních tratích, které obsluhují jednotky Regionova bude podobně vytížených. Vytíženost úseku Tachov – Planá u Mariánských Lázní považuji tedy za jakousi přibližnou průměrnou hodnotu, které by kolejový elektrobuse měl odpovídat.

LINKA P33 Domažlice - Poběžovice - Bělá n. R. - Bor - Tachov - Planá u Mar. Lázní							
Typická souprava				Trakce	Kapacita (osob)		
				M	84		
				M	55		
				M	107		
Délka linky (km)	Obvyklý počet cestujících v nejsilnějším úseku		Výkon vlkm (odhad 2014)		Bezbariérovost ♿		
88,1	✂	854	ⓐ a †	403	516 734	55 % spojů	
Obvyklý přepravený počet osob na lince		✂	1887	ⓐ a †	1084	objednatel Plzeňský kraj	
Zóny IDP na lince linka není v současné době integrována v systému IDP							
Úsek	Počet cestujících/den			Jízd. doba (min)	Vzdálenost (km)	Poměr JD vlak/auto	
Domažlice - Planá u Mar. Lázní	✂	1887	ⓐ a †	1084	145-180	88,1	2,6-3,2
Domažlice - Poběžovice	✂	854	ⓐ a †	403	32-39	21,4	1,84
Poběžovice - Bělá nad Radbuzou	✂	311	ⓐ a †	184	19-22	14,2	1,11
Bělá nad Radbuzou - Bor	✂	264	ⓐ a †	154	31-36	21,9	1,74
Bor - Tachov	✂	281	ⓐ a †	206	27-30	18,1	1,47
Tachov - Planá u Mar. Lázní	✂	513	ⓐ a †	426	18	12,5	1,50

Tabulka 5 – Provoz na trati č. 184 Domažlice – Planá u Mariánských Lázní [45]

3.8. Denní dojezd vozidla

Jedním z nedostatků vozidel na bateriový pohon je výrazně kratší dojezd oproti vozidlům se spalovacím motorem. Proto zde jako jednu z technických podmínek budu uvažovat také denní proběh kolejového elektrobuse. Vycházím z veřejně dostupných údajů pro oběhy kolejových vozidel u ČD. Mezi nejdelší proběhy vozidel dle vlastních propočtů patří např. trať Znojmo – Havlíčkův Brod s délkou denního proběhu 629 km. Většina jiných tratí se však pohybuje řádově kolem 300 km proběhu denně. [46] Bylo by proto vhodné, aby kolejový elektrobuse denně zvládl např. s průběžným dobíjením ve stanicích alespoň tuto nebo delší vzdálenost.

4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu

4.1. Základní parametry, typový výkres

V tabulce 6 uvádím základní technické údaje kolejového elektrobusu. Žluté buňky představují zadané hodnoty, které vycházejí z původního řešení kolejového autobusu. Hodnoty v tyrkysově zbarvených buňkách jsou mnou zvolené či dopočtené hodnoty. Buňky bez výplně jsou dopočítané.

typ		kolejový elektrobús
rozchod	mm	1 435
typ podvozků		jednonápravový podvozek
počet vozů		1
uspořádání pojezdu		A A
počet trakčních dvojkolí		2
počet netrakčních dvojkolí		0
obrys vozidla		ČSN 28 0312
celková délka vozidla	mm	18 600
limit maximálního zatížení dvojkolí	kN	156,96
minimální poloměr oblouku provoz	m	150
v provozu přípustné příčné nevyrovnané zrychlení	m/s ²	0,65
minimální poloměr oblouku manipulace	m	90
vlastní hmotnost prázdného vozidla	t	21,15
adhezní hmotnost prázdného vozidla	t	21,15
sedadel		44
plošná hustota stojících při provozním obsazení	1/m ²	2,8
plocha ke stání	m ²	10,2
počet stojících osob při provozním obsazení		28
počet cestujících při provozním obsazení		72
hmotnost cestujícího	kg	80
hmotnost při provozním obsazení	t	26,91
adhezní hmotnost při provozním obsazení	t	26,91
ekvivalent rotačních hmot	t	1,13
součinitel rotačních hmot při provozním obsazení		0,04

Tabulka 6 – Základní technické údaje kolejového elektrobusu

Některé údaje nesouvisející s typovým výkresem zde uvádím pouze pro úplnost, bez komentáře. Případně některé údaje budu komentovat v následujících kapitolách.

Vycházím tedy z konstrukce kolejového autobusu již zmiňovaných prací [11] [12] [13], kdy je zachován jednonápravový podvozek. Skříň vozidla uvažuji původní, navrženou Milanem Šípem. Limit maximálního zatížení dvojkolí uvažuji dle kategorie trati A1 16 t na nápravu¹, což odpovídá maximálnímu nápravovému zatížení A_{max} [kN], které počítám následovně:

$$A_{max} = m_{A_{max}} \cdot g = 16 \cdot 9,81 = 156,96 \text{ kN} \quad (4.1)$$

kde $m_{A_{max}}$ [t] je maximální nápravové zatížení a g [$m \cdot s^{-2}$] je tíhové zrychlení.

Počet stojících cestujících N_{st} počítám následovně:

$$N_{st} = S_{st} \cdot h = 10,2 \cdot 2,8 = 28 \quad (4.2)$$

kde S_{st} [m^2] je plocha ke stání, h [m^{-2}] je plošná hustota cestujících.

Dále tedy celkový počet cestujících N_C při uvažování stojících vychází:

$$N_C = N_{se} + N_{st} = 44 + 28 = 72 \quad (4.3)$$

Hmotnost od tíhy cestujících m_{uz} [t] (užitečné zatížení) je tedy:

$$m_{uz} = N_C \cdot m_{1cest} = 72 \cdot 0,08 = 5,76 \text{ t} \quad (4.4)$$

kde uvažuji $m_{1cest} = 80 \text{ kg} = 0,08 \text{ t}$ hmotnost jednoho cestujícího.

Z toho následně plyne hmotnost při provozním obsazení m [t] a taktéž adhezní hmotnost při provozním obsazení m_{ad} [t]:

$$m = m_{ad} = m_{pv} + m_{uz} \text{ [t]} \quad (4.5)$$

kde m_{pv} [t] je hmotnost prázdného vozidla.

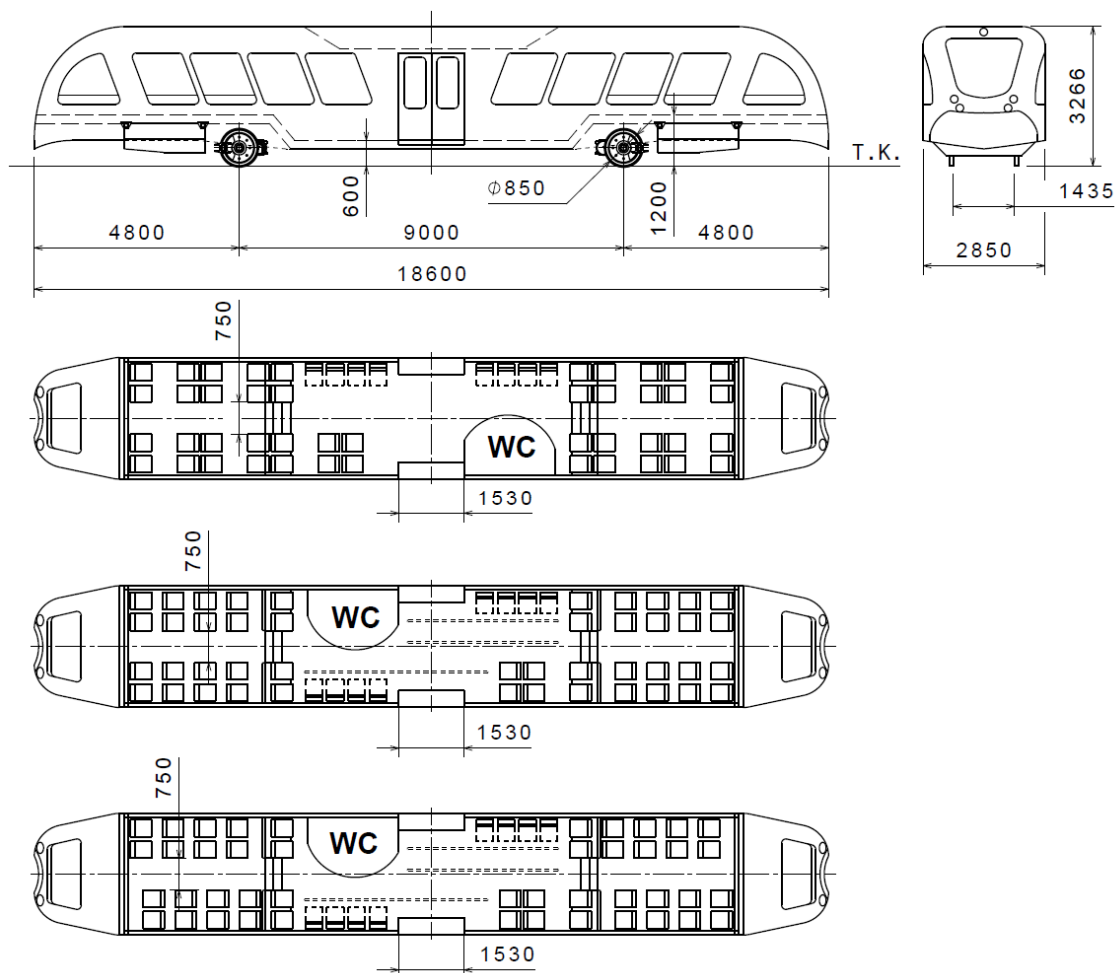
Z typového výkresu v Příloze 1, který zmenšený uvádím také zde na Obr. 19, vyplývá rozmístění sedadel, kterých uvažuji 44 pevných a 8 sklopných. Celkem tedy vozidlo disponuje 52 sedadly.

Pro stojící cestující uvažuji pouze plochu v nízkopodlažní části vozidla a plošnou hustotu uvažuji 2,8 osoby na metr čtvereční.

Nicméně, mělo by být v zájmu dopravce, aby zajistil takový počet vozidel, který zajistí cestujícím komfort při cestování. Tím myslím vytížení kapacity kolejového elektrobusu, či spřažené soupravy několika elektrobusů maximálně do 100 % počtu sedících cestujících.

¹ Viz kapitola 3. Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy, podkapitola 3.2. Traťové třídy a zatížení – UIC 700 na str. 23.

Rozmístění sedadel jsem v první variantě volil dle typového výkresu z DP Pavla Hříbala. [13] V podstatě se jedná o rozmístění sedadel stejné koncepce, jako např. u jednotek Regionova, či starších motorových vozů řady 810. V takovém návrhu je však velmi málo místa mezi sedadly, a to považuji dle zmiňované vyhlášky UIC 567 za nevyhovující.



Obr. 19 – Typový výkres – výřez

Druhá varianta se od předchozí liší uspořádáním sedadel za sebou. Vidím de zejména dva hlavní důvody, proč je tato varianta vhodnější. V první řadě je takové rozmístění sedadel méně náročné na prostor. Cestující mají větší komfort při sezení za sebou než při stejné vzdálenosti při sezení proti sobě. Druhý důvod je psychologický. Lidé zřejmě cítí na dvojsedadle větší soukromí než při uspořádání dvojsedadel proti sobě. [47] Jak je patrné z této varianty, počet sedadel se nezměnil. To plyne z toho, že uspořádání sedadel proti sobě nevyhovuje vyhlášce UIC 567. Uspořádání stejného počtu sedadel za sebou však ze zmíněných důvodů může přinést větší komfort a více soukromí cestujícím.

Třetí varianta je pouze úpravou varianty 2. Je zde zachováno uspořádání sedadel za sebou, také je zachován vyšší komfort cestování a soukromí oproti variantě 1.

Bylo by zajímavé použít řešení jako v japonských rychlovlacích. Sedadla jsou vybavena otočným zařízením. Při příjezdu na konečnou stanici se sedadla automaticky otočí a všichni cestující tedy vždy jedou po směru jízdy. Navíc je zde možnost manuálně přeuspořádat sedadla i proti sobě, což může vyhovovat větším skupinám lidí. V Japonsku toto řešení funguje již několik let. [48] Je otázkou, zda by bylo možné toto řešení použít i v ČR např. v regionální dopravě. Zřejmě bych viděl hlavní nevýhodu v ceně takových sedadel, proto se možná této zajímavosti v bateriovém elektrobusem nedočkáme.

4.2. Hmotnostní bilance

Hmotnostní bilanci kolejového elektrobuse jsem počítal iterativně. Nejprve jsem vycházel z klasické varianty kolejového autobusu se spalovacím motorem. [13] Odečetl jsem hmotnost komponent pohonu se vznětovým motorem a odhadl jsem hmotnost elektrického pohonu a hmotnost baterií. Z toho vyšla předběžná hmotnostní bilance kolejového elektrobuse, kterou jsem v dalších krocích zpřesňoval.

V další kapitole 5. se zabývám analýzou řešení pohonů dvojkolí, ze které pak vyplyne mnou použitý koncept pohonu. V této kapitole budu popisovat již hmotnostní bilanci se započítáním hmotností komponent, které jsem pro pohon kolejového elektrobuse zvolil a které budou popsány v následujících kapitolách. Zdůvodnění použití těchto komponent bude uvedeno až v těchto dalších kapitolách, v této kapitole je pouze podstatnou informací hmotnost těchto komponent.

Při hmotnostní bilanci pohonu kolejového elektrobuse jsem vycházel z varianty sériového hybridu¹, který řešil Pavel Hříbal. [13] Údaje týkající se skříně kolejového autobusu vycházejí z diplomové práce Milana Šípa. [11] Pro porovnání uvádím původní variantu kolejového autobusu s hydromechanickým přenosem výkonu (použitou také např. u jednotek řady 814 Regionova), zvolenou variantu diplomové práce Pavla Hříbala [13] a mnou řešený koncept pohonu kolejového elektrobuse.

Tuto hmotnostní bilanci však nelze považovat za dokonale přesnou. Bylo by potřeba udělat detailní hmotnostní rozbor všech komponent, což však není předmětem této diplomové práce. Cílem je pouze navrhnout koncepci pohonu kolejového elektrobuse, bez nároků na přesnost mnohých výpočtů, jako např. v tomto případě hmotnostní bilance.

¹ Sériový hybrid = typ hybridního pohonu vyvinutý z elektrického přenosu výkonu, kdy je dvojkolí poháněno pouze elektromotorem a zdrojem energie jsou baterie nebo motorgenerátor, který pracuje v optimálním režimu. Elektromotory mohou být tedy napájeny z obou zdrojů současně. [13]

	Jednotky	Hydromechanický pohon	Sériový hybrid	Kolejový elektrobus
pohon		A 1	A A	A A
spalovací motor	[kg]	970	970	0
čelní převodovka	[kg]	30	15	0
hlavní převodovka	[kg]	540	0	0
generátor (alternátor)	[kg]	300	1170	0
trakční motor	[kg]	0	860	660
kloubový hřídel	[kg]	80	160	0
nápravová převodovka	[kg]	370	370	400
trakční usměrňovač	[kg]	0	50	50
trakční měnič	[kg]	0	465	465
bateriový měnič	[kg]	0	25	25
usměrňovač PP	[kg]	0	386	386
baterie	[kg]	90	639,2	4000
CELKEM	[kg]	2380	5110,2	5986

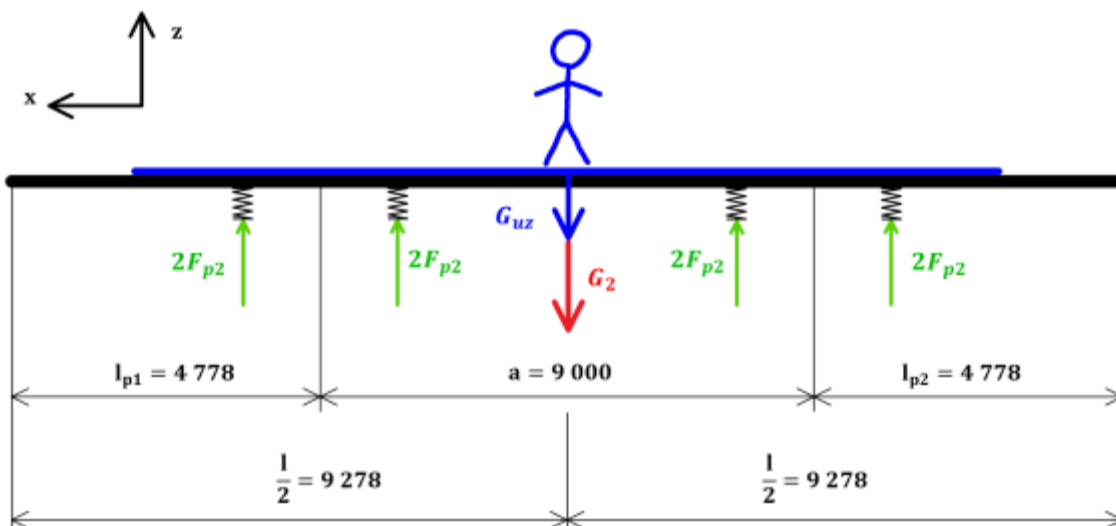
Tabulka 7 – Hmotnostní bilance pohonu variant kolejového autobusu

Nyní lze přistoupit k výpočtu nápravových a kolových sil. Nápravové a kolové síly si vyjádřím ze silové rovnováhy vozidla. Uvažuji obě nápravy hnané, oba power packy identické a skříň vozidla je též symetrická. Pouze rozmístění střešních komponent nemusí zaručit celkovou symetrii vozidla, přesto však předpokládám, že se nedopustím veliké chyby, pokud budu rozložení sil v kolejovém elektrobusu předpokládat symetrické.

Nejprve si vyjádřím rovnováhu sil druhotně odpružených hmot, viz Obr. 20, v ose z:

$$z: 4 \cdot 2F_{p2} - G_2 - G_{uz} = 0 \quad (4.6)$$

kde F_p [kN] je zatížení jedné pružiny druhého stupně vypružení, G_2 [kN] je tíha druhotně odpružených hmot (tedy tíha vozové skříně bez podvozků), G_{uz} [kN] je tíha od cestujících (užitečné zatížení).



Obr. 20 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – druhotně odpružené hmoty

Tíhu G_j [kN] počítám vždy z příslušné hmotnosti m_j [t] a tíhového zrychlení g [$m \cdot s^{-2}$] dle následujícího vztahu:

$$G_j = m_j \cdot g = m_j \cdot 9,81 \quad (4.7)$$

přičemž index j přísluší hodnotám hmotností a tíhy dle následující tabulky 8:

j	Označuje:
0	neodpružené hmoty podvozku
1	prvotně odpružené hmoty podvozku
2	druhotně odpružené hmoty
uz	užitečné zatížení od cestujících

Tabulka 8 – Indexy tíhy a hmotnosti

Dále lze tedy vyjádřit sílu v jedné pružině druhého stupně vypružení F_{p2} [kN]:

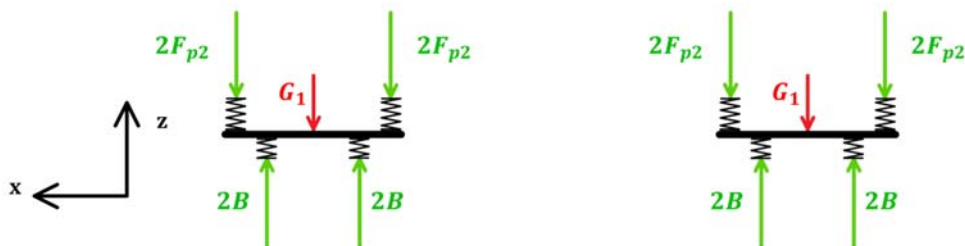
$$F_{p2} = \frac{G_2 + G_{uz}}{8} \quad (4.8)$$

Po dosazení do předchozího vztahu vychází síla v jedné pružině druhého stupně vypružení F_{p2} [kN]

$$F_{p2} = \frac{157,85 + 57,29}{8} = 26,89 \text{ kN} \quad (4.9)$$

Dále si vyjádřím silovou rovnováhu prvotně odpružených hmot (Obr. 21) do osy z:

$$z: 8 \cdot B - G_1 - 8 \cdot F_{p2} = 0 \quad (4.10)$$



Obr. 21 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – prvotně odpružené hmoty

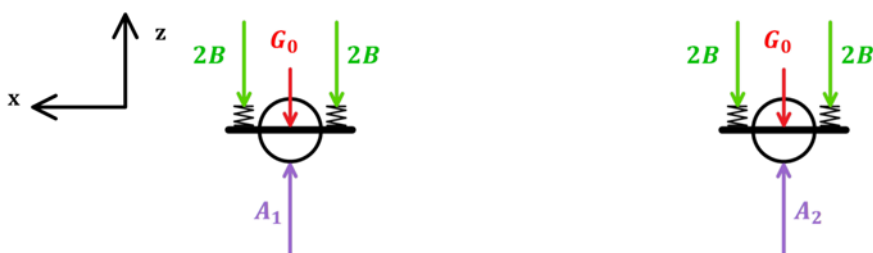
Z toho lze vyjádřit sílu v jedné pružině prvního stupně vypružení B [kN]:

$$B = \frac{2 \cdot G_1 + 8 \cdot F_{p2}}{8} = \frac{2 \cdot G_1 + G_2 + G_{uz}}{8} \quad (4.11)$$

Po dosazení vychází síla v jedné pružině prvního stupně vypružení B [kN]:

$$B = \frac{2 \cdot 15,99 + 157,85 + 57,29}{8} = 30,89 \text{ kN} \quad (4.12)$$

Nakonec si vyjádřím silovou rovnováhu neodpružených hmot (Obr. 22) do osy z:



Obr. 22 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – neodpružené hmoty

$$z: 8 \cdot B + G_0 - 2 \cdot A = 0 \quad (4.13)$$

Nyní lze vyjádřit nápravové zatížení na dvojkolí A [kN] ze silové rovnováhy ze vztahu (4.13). Nápravové zatížení lze pak vyjádřit z celkové síly působící na prvotní vypružení B_Σ [kN] a tíhy neodpružených hmot jednoho podvozku G_0 [kN]:

$$A = \frac{2 \cdot G_0 + B_\Sigma}{2} = \frac{2 \cdot G_0 + 2 \cdot G_1 + G_2 + G_{uz}}{2} \quad (4.14)$$

Celkovou sílu v na všechny pružiny prvotního vypružení B_Σ [kN] lze vyjádřit po úpravách následovně:

$$B_\Sigma = 8 \cdot B = 2 \cdot G_1 + G_2 + G_{uz} \quad (4.15)$$

Po dosazení do vztahu (4.15) vychází celková síla v provním vypružení B_{Σ} [kN]:

$$B_{\Sigma} = 15,99 + 157,85 + 57,29 = 115,56 \text{ kN} \quad (4.16)$$

Po dosazení do vztahu (4.14) vychází nápravové zatížení:

$$A = \frac{2 \cdot 8,83 + 2 \cdot 15,99 + 157,85 + 57,29}{2} = 132,39 \text{ kN} \quad (4.17)$$

přičemž vzhledem k symetrii vozidla uvažuji $A = A_1 = A_2$ – to znamená, že nápravové zatížení prvního a druhého dvojkolí je stejné.

Kolovou sílu Q [kN] lze nyní vyjádřit z nápravového zatížení A [kN] následovně:

$$Q = \frac{A}{2} \text{ [kN]} \quad (4.18)$$

Po dosazení do vztahu (4.18) tedy hodnota kolové síly Q [kN] vychází:

$$Q = \frac{132,39}{2} = 59,99 \text{ kN} \quad (4.19)$$

5. Analýza řešení individuálního pohonu dvojkolí

5.1. Úvod

Při analýze pohonů jsem se zaměřil na hlavní výhody a nevýhody jednotlivých řešení pohonů. Výhody a nevýhody jsem uvažoval s ohledem na možnost použití pohonu v kolejovém elektrobuse. Hlavní okrajové podmínky, které by dle mého názoru zvolený pohon měl respektovat, jsou následující:

Nízká cena – vzhledem k tomu, že zdrojem energie kolejového elektrobuse jsou drahé baterie, je potřeba, aby ostatní komponenty pohonu byly, pokud možno, co nejlevnější.

Účinnost přenosu výkonu – aby bylo možné co nejefektivněji využít energii v bateriích, měl by být kladen důraz na co nejvyšší účinnost přenosu výkonu, ideálně 100 %.

Nízká hmotnost – rád bych zachoval koncept lehkého kolejového vozidla pro regionální dopravu, což komplikují těžké baterie. To může být kompenzováno snahou o co nejlehčí pohon.

Malé dynamické účinky – kvalita regionálních tratí bývá mnohdy nízká, proto je nutností snížit dynamické účinky na pohon, jak je to jen možné. Jinak by mohlo dojít ke snížení životnosti či poškození pohonu.

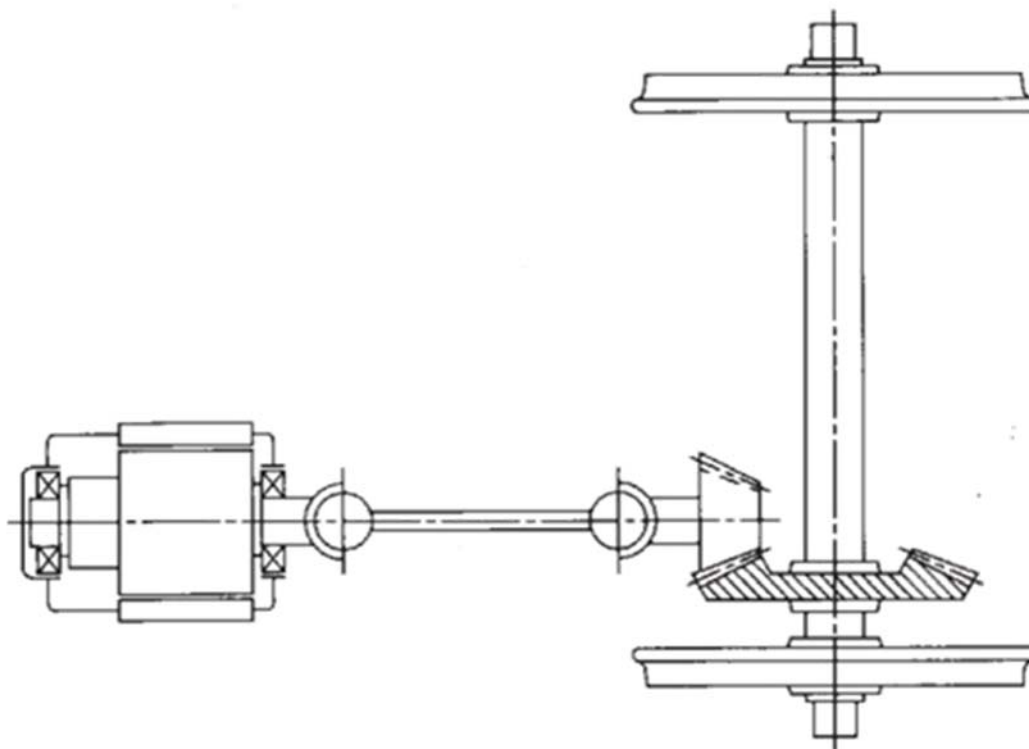
Dostatečný zástavbový prostor pro baterie – kromě v dnešní době stále ještě velké hmotnosti baterií, je problém také objem, který zabírají. Aby měl kolejový elektrobuse dostatečný dojezd, je zapotřebí použít v rámci možností co největší počet baterií. To vyžaduje dostatečný zástavbový prostor na skříni vozidla.

Nyní popíšu možné typy pohonů, které jsou v kolejových vozidlech používány. Součástí popisu je i výčet výhod a nevýhod, které respektují výše zmíněné okrajové podmínky návrhu pohonu kolejového elektrobuse.

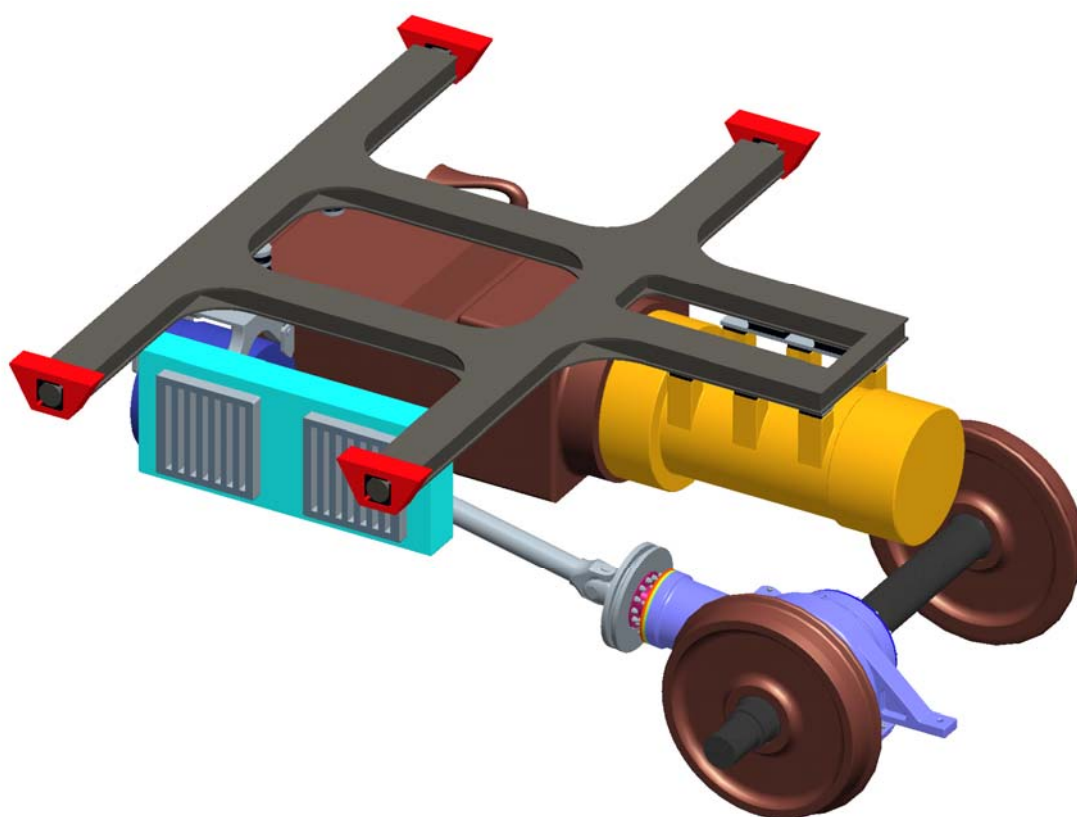
5.2. Podélně orientovaný pohon

Příklad podélně orientovaného pohonu je možné vidět už např. u elektrobuse Škoda Perun HE¹. Schéma uspořádání tohoto typu pohonu je na Obr. 23. Původní koncepce pohonu kolejového autobusu ať už s hydromechanickým přenosem výkonu či v hybridním provedení má také podélné uspořádání pohonu, viz Obr. 24.

¹ Viz kapitola 2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobuse, podkapitola 2.1.1. Škoda Perun HE (High Energy) na str. 13, Obr. 6.



Obr. 23 – Podélně orientovaný pohon [49]



Obr. 24 – Návrh power packu Pavla Hřibala [13]

V tabulce 9 je shrnutí výhod a nevýhod tohoto uspořádání pohonu. Dále jednotlivé výhody a nevýhody komentuji.

Podélně orientovaný pohon	
Výhody	motor plně odpružený
	malé neodpružené hmoty
	lehčí rám podvozku
Nevýhody	nižší účinnost převodu
	zabírá zástavbový prostor na skříni vozidla

Tabulka 9 – Podélně orientovaný pohon – výhody a nevýhody

Velkou předností podélně orientovaného pohonu je umístění motoru na skříni vozidla, tedy v druhotně odpružených hmotách. Tím je dosaženo minimálních dynamických účinků na motor, které jsou obzvláště významné na regionálních tratích s horší kvalitou. Svislé výchylky obou stupňů vypružení jsou překonány dlouhým Kardanovým hřídelem, který umožňuje větší volnost v umístění motoru na skříni. Stejně tak je větší volnost v možnosti umístění nápravové převodovky.

Další výhodou je snížení hmotnosti prvotně odpružených hmot, neboť součástí pohonu v podvozku je pouze nápravová převodovka. To vede ke zmíněné výhodě lehčího rámu podvozku díky absenci motoru v podvozku.

Přes velké výhody tohoto uspořádání pohonu zde shledávám dvě velmi zásadní nevýhody pro kolejový elektrobus. První je nižší účinnost převodu kuželové převodovky oproti čelnímu převodu či přímému pohonu, které popíšu dále v textu. Při současném stavu techniky, kdy energie v bateriích má velkou hmotnost a zabírá velký objem, je dle mého názoru nutné dbát na co nejefektivnější využití energie. To znamená převodový poměr s co nejvyšší účinností.

Motor umístěný na skříni vozidla je zároveň velkou nevýhodou pro umístění baterií na skříni vozidla. V případě zachování současné koncepce částečně nízkopodlažní skříně lze bateriové packy umístit pouze pod vysokopodlažní části skříně. Baterie s dostatečnou kapacitou totiž velký objem. Aby byl zajištěn maximální dojezd vozidla na baterie, musí být tedy zajištěn co největší prostor pod skříni vozidla. To však podélně orientovaný pohon s motorem umístěným na skříni značně komplikuje.

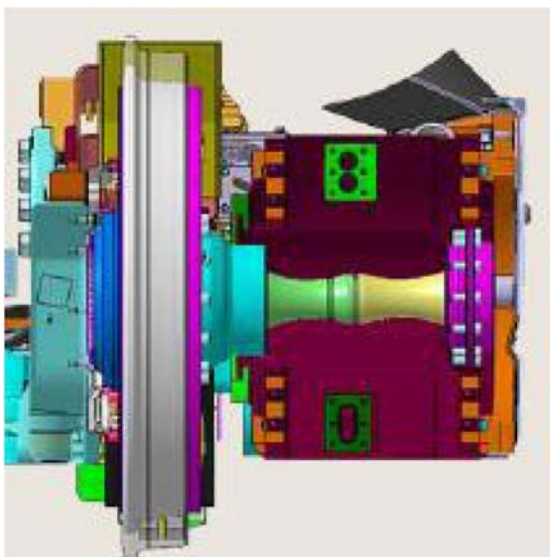
5.3. Přímý pohon bez převodovky

5.3.1. Přímý pohon – neodpružený

Další typ uspořádání pohonu jsem rovněž zmiňoval v rešerši, a to u elektrobuse BYD 12M¹, kde šlo o pohon s nábojovými motory. Jak bylo však řečeno, tento typ pohonu není vhodný pro kolejová vozidla vzhledem k neodpruženým kolům a velkým neodpruženým hmotám. Proto zde tento typ pohonu nebudu již dále rozvádět a zmíním pouze odpružený typ přímého pohonu v následující kapitole.

5.3.2. Přímý pohon – odpružený

Přímý typ pohonu bez převodovky v odpružené variantě se používá v kolejových vozidlech. Konkrétně jde například o pohon tramvají Škoda 15T, které jsou provozovány v Praze. Řez takto uspořádaným pohonem v tramvaji 15T je na Obr. 25.



Obr. 25 – Škoda 15T – řez přímým odpruženým pohonem dvojkolí [50]

Stator nábojového motoru je umístěn v prvotně odpružených hmotách rámu podvozku a pohon nápravy rotorem je realizován přes krátký Kardanův hřídel. Motor je synchronní s permanentními magnety (PMSM), zde v provedení jako pomaluběžný, tedy s velkým počtem pólů. Tím je dosaženo velkého točivého momentu tohoto motoru a možnosti provozu bez převodovky.

V tabulce 10 jsou opět stručně vyjmenovány výhody a nevýhody tohoto typu pohonu, které následně okomentuji.

¹ Viz kapitola 2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobuseů, podkapitola 2.1.4. BYD 12M electric bus, Obr. 10 na str. 17.

Přímý pohon nábojovými motory	
Výhody	100 % účinnost
	bez převodovky
	tišší provoz
	zástavba
Nevýhody	hmotnost
	cena

Tabulka 10 – Přímý pohon nábojovými motory – výhody a nevýhody

Přední výhodou pohonu s nábojovými motory je absence převodovky, což znamená 100 % účinnost přenosu výkonu. Jak jsem zmiňoval výše, s ohledem na poměr hustoty energie na jednotku hmotnosti, je žádoucí dosáhnout nejvyšší možné účinnosti přenosu výkonu.

Absence převodovky znamená snížení počtu mechanických komponent pohonu. Tím pádem je pohon také méně náročný z hlediska údržby.

Třetí zmiňovaná výhoda souvisí opět s absencí převodovky. Záběr ozubených kol je nezanedbatelným zdrojem hluku. Takto použitý pohon by v kolejovém elektrobuse přispěl k ještě tiššímu provozu.

Výraznou výhodou je také zástavba pohonu ve vozidle. V případě tramvaje 15T to souvisí s možností zajištění 100 % nízkopodlažnosti po celé délce tramvaje. V případě kolejového elektrobuse to znamená větší prostor pro umístění bateriových packů, jak jsem již zmiňoval u podélně orientovaného pohonu.

První uváděnou nevýhodou je hmotnost motoru, která je u pomaluběžných synchronních motorů s permanentními magnety vyšší, než u motorů vysokootáčkových či asynchronních. V případě snahy o lehké kolejové vozidlo pro regionální dopravu je navyšování hmotnosti nežádoucí.

Dále jako nevýhodu uvádím cenu. Synchronní motory s permanentními magnety jsou dražší na výrobu oproti např. běžně používanému asynchronnímu motoru. Významnou položkou v ceně takového motoru jsou permanentní magnety vyráběné ze slitin vzácných kovů.

5.4. Příčně orientovaný částečně odpružený pohon

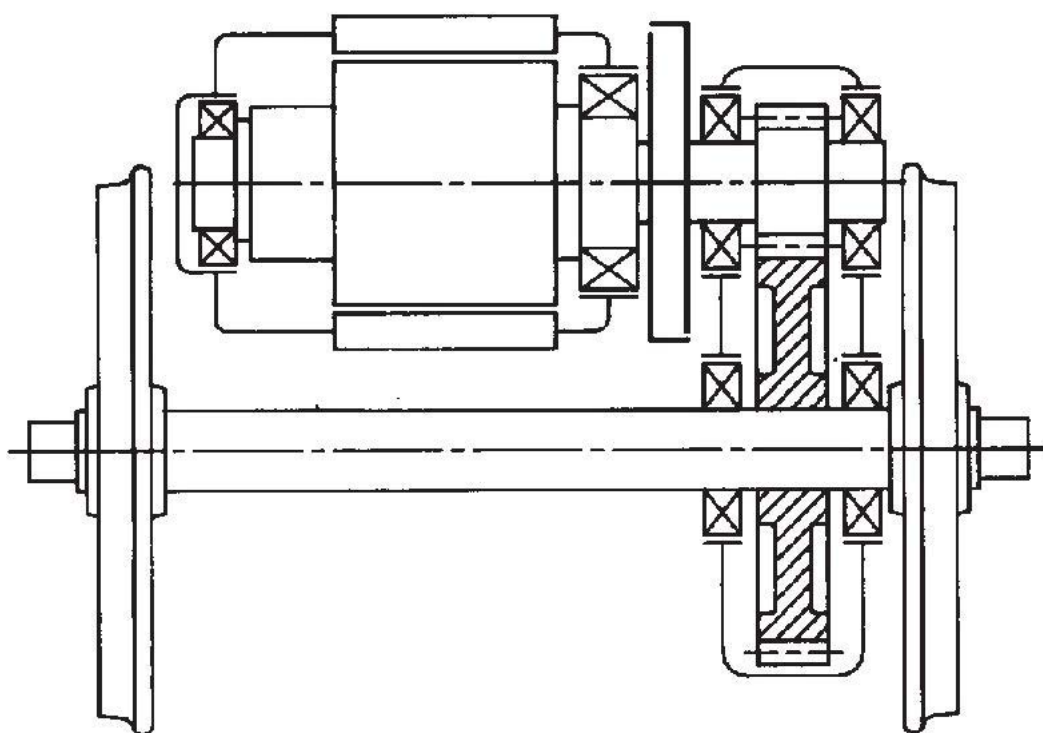
Další variantou pohonu, často používanou u kolejových vozidel, je příčně orientovaný částečně odpružený pohon, viz schéma na Obr. 26. Motor je zde umístěn v prvotně odpružených hmotách rámu podvozku. Dále mezi motorem a převodovkou musí být spojka na principu Kardanova hřídele. To je z toho důvodu, že je zde převodovka v podstatě součástí neodpružených hmot.

Tento typ pohonu je např. použit u souprav M1 pražského metra, provozovaných na lince C. U kolejových vozidel je tento typ pohonu výhradně používán v dvounápravových podvozcích.

Souhrn hlavních výhod a nevýhod příčně orientovaného částečně odpruženého pohonu je opět v tabulce, viz tabulka 11.

Příčně orientovaný částečně odpružený pohon	
Výhody	účinnost
	hmotnost
	zástavba baterií
Nevýhody	uchycení v jednonápravovém podvozku
	částečně neodpružený pohon

Tabulka 11 – Příčně orientovaný částečně odpružený pohon – výhody a nevýhody



Obr. 26 – Příčně orientovaný částečně odpružený pohon [49]

Co se týče účinnosti přenosu výkonu, patří tento typ pohonu k jedním z neúčinnějších. V případě použití jednostupňové převodovky, jak je mimo jiné patrné ze schématu na Obr. 27, je účinnost převodu 98 %.

Vzhledem k použití převodovky je v moderních pohonech používán vysokootáčkový asynchronní motor, případně by bylo možné použít vysokootáčkový synchronní motor s permanentními magnety (PMSM). Tím je dosaženo nižší hmotnosti celého pohonu. Navíc při použití PMSM lze hmotnost ještě více snížit, jelikož mají tyto motory nižší hmotnost než asynchronní motory stejného výkonu.

Také je u tohoto uspořádání pohonu výhodou zachování místa pod skříní vozidla. To umožňuje v případě přímého pohonu stále spoustu prostoru pro zástavbu baterií.

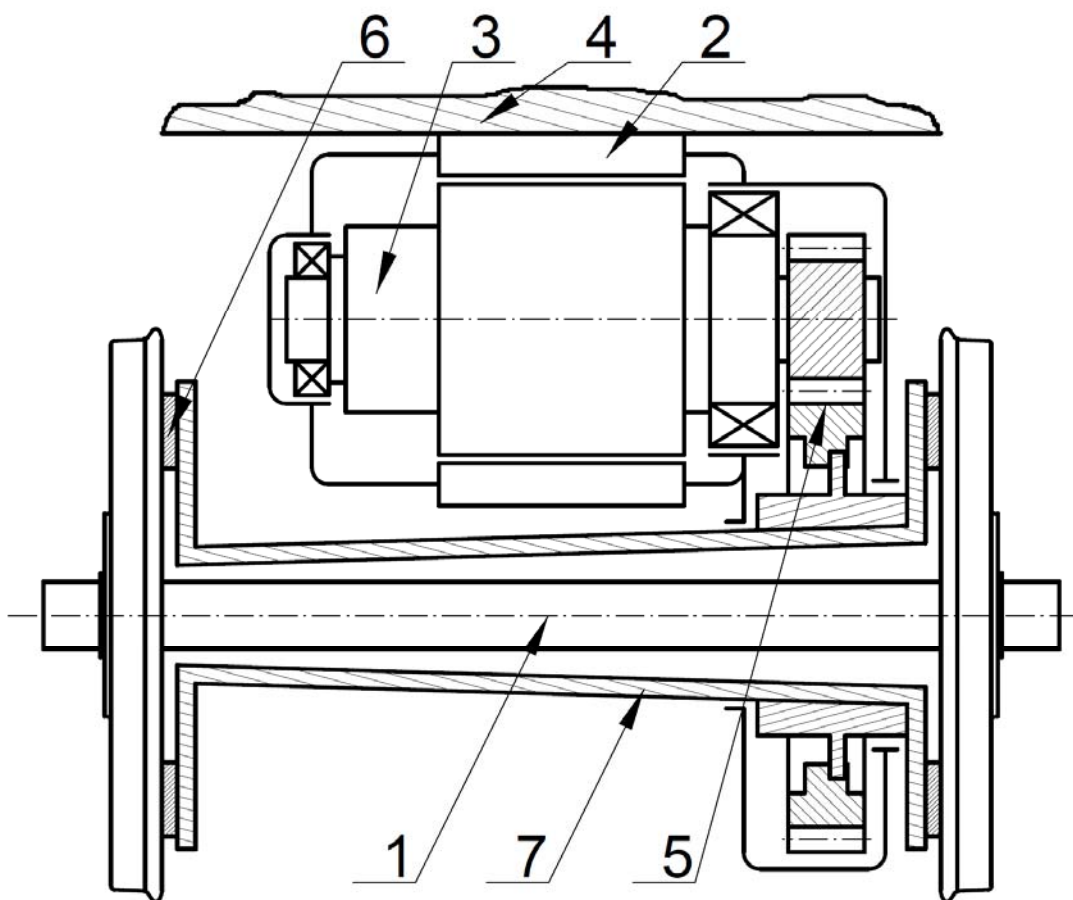
Mezi hlavní nevýhody však na druhou stranu patří uchycení pohonu v jednonápravovém podvozku. Podvozek je pak nesymetrický, tedy těžiště je mimo osu dvojkolí. To v případě dvounápravových podvozků není problém.

To souvisí s další nevýhodou, zachycením reakčního klopného momentu pohonu. U jednonápravového podvozku by to způsobovalo naklápění celého podvozku, což u dvounápravových podvozků opět není z tohoto hlediska problém.

Poslední nevýhodou je to, že část pohonu je neodpružená. To považuji při provozu na nekvalitních regionálních tratích za nevhodné.

5.5. Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí

Uspořádání příčně orientovaného plně odpruženého pohonu s dutou kloubovou hřídelí vysvětlím na schématu na Obr. 27. Na pozici (1) je dvojkolí. Motor, skládající se ze statoru (2) a rotoru (3), je pevně spojen s rámem podvozku (4). Na motor je připojena nápravová převodovka (5), která je také plně odpružená a uchycena na rám podvozku. Velké ozubené kolo převodovky je zde umístěno na schématu na kuželové duté hřídeli (7), která je poté spojena s koly na pozici (6).



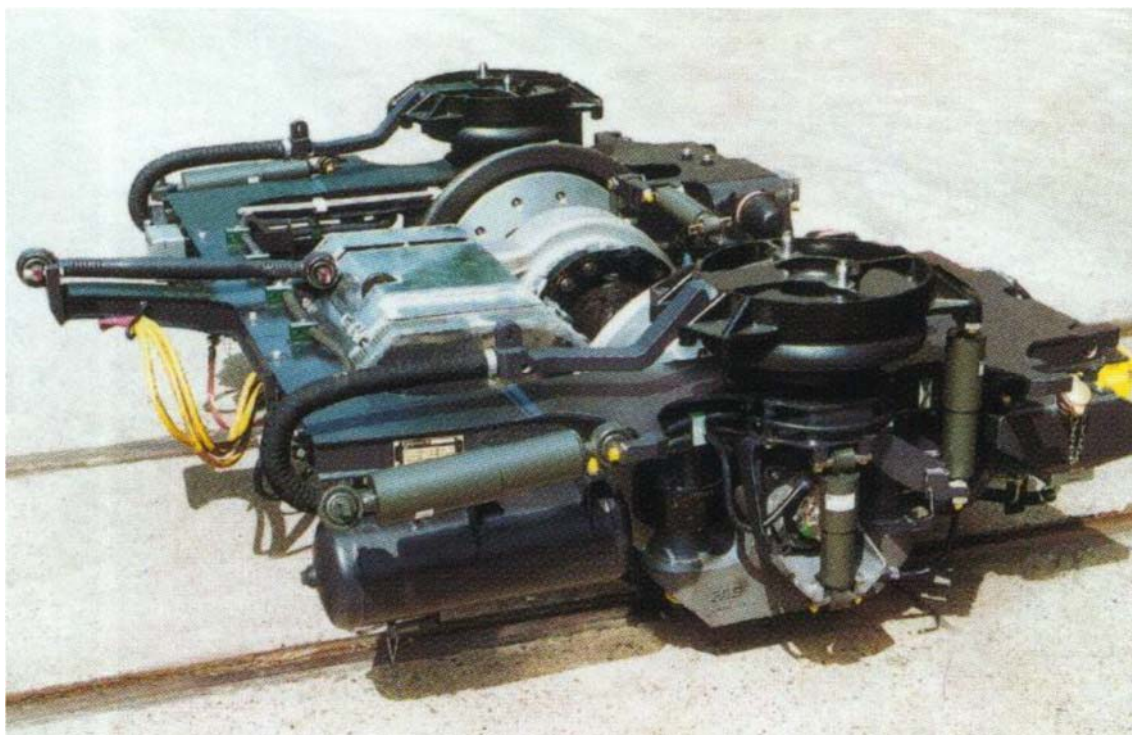
Obr. 27 – Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí [51]

Tento pohon je použit například u jednotky Litra SA na Kodaňských linkách S-Bahn, Obr. 28. Fotografie jednonápravového podvozku této jednotky je na Obr. 29 a výkres podvozku na Obr. 30. S výjimkou prvního typu pohonu, tedy podélně orientovaného pohonu, se mi u ostatních typů pohonů nepodařilo najít řešení pro jednonápravový podvozek.

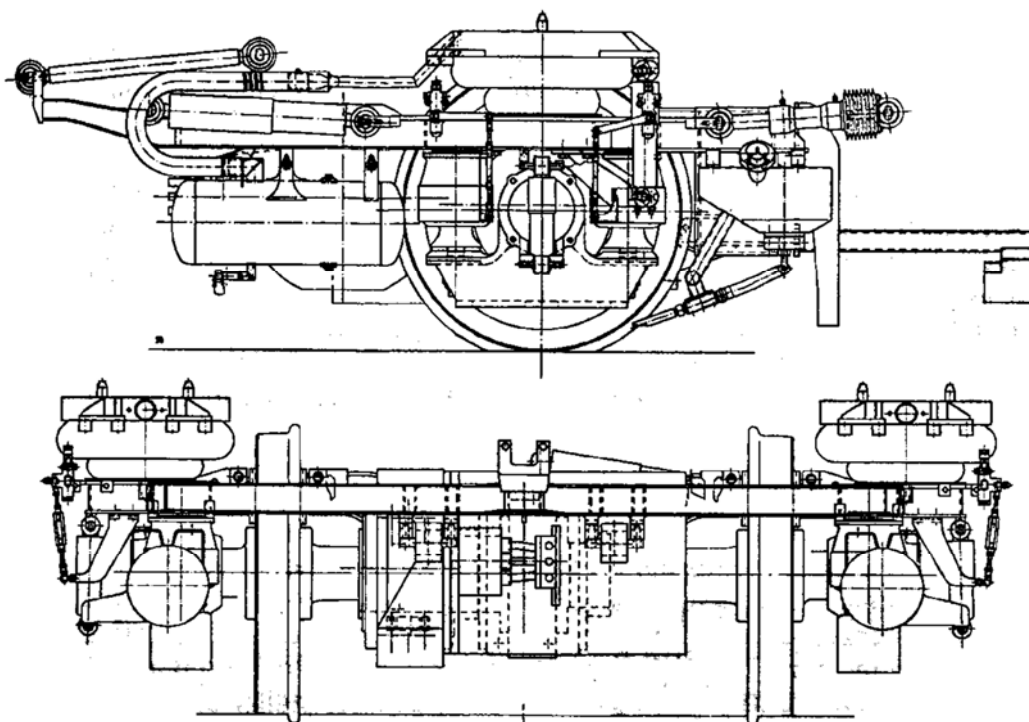
Odlišnost odpruženého pohonu s dutou hřídelí v případě této jednotky na rozdíl od schématu na Obr. 27 spočívá v použití kratší duté hřídele. Pravděpodobně je použita dvoustupňová převodovka.



Obr. 28 – Elektrická jednotka Litra SA [52]



Obr. 29 – Elektrická jednotka Litra SA – podvozek [14]



Kastengesteuertes - Einzel-Radsatz-Fahrwerk (KERF) für S-Tog Kopenhagen

Quelle: ALSTOM-LHB

Obr. 30 – Elektrická jednotka Litra SA – výkres podvozku [14]

Hlavní výhody a nevýhody jsou vypsány v tabulce 12, za níž následuje komentář.

Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou hřídelí	
Výhody	odpružený pohon
	hmotnost
	účinnost
	zástavba baterií
Nevýhody	uchycení v jednonápravovém podvozku
	cena

Tabulka 12 – Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou hřídelí -

Hlavní výhodou příčně orientovaného plně odpruženého pohonu s dutou hřídelí spatřuji zejména v odpružení celého pohonu. Jak motor, tak i převodovka jsou přes pryžové silentbloky spojeny s rámem podvozku. To snižuje dynamické účinky na celý pohon, což, jak již bylo řečeno, by bylo na nekvalitních regionálních tratích přínosné.

Podobně jako u příčně orientovaného částečně odpruženého pohonu zde vidím jako pozitivum hmotnost pohonu. Je to z toho důvodu, že je možné použít vysokootáčkový motor. Potřebného momentu se pak dosáhne pomocí převodu.

Další dvě výhody jsou opět společné s předchozím typem pohonu. Při použití jednostupňové převodovky je stále účinnost vysoká. Stejně tak tento typ pohonu neomezuje příliš zástavbu baterií pod skříní vozidla.

Na druhou stranu, první nevýhoda je shodná s předchozím příčně orientovaným typem pohonu. Těžiště je i v případě tohoto typu pohonu opět posunuto mimo osu dvojkolí.

Oproti všem výše popsaným typům pohonu je tento drahý. Je to z důvodu použití právě duté hřídele. Je potřeba zajistit přesnou výrobu duté hřídele, často kuželové, což zvyšuje cenu pohonu.

5.6. Zhodnocení typů pohonů a výběr optimálního pohonu pro kolejový elektrobus

Dle okrajových podmínek, stanovených na začátku této kapitoly, jsem určil kritéria pro výběr pohonu: cena, účinnost, hmotnost, dynamické účinky a zástavba. Volba těchto kritérií, respektive okrajových podmínek je tedy zdůvodněna na začátku této kapitoly.

Zhodnocení provádím v tabulce 13. První sloupec odpovídá všem popsaným typům pohonu. Další sloupce odpovídají jednotlivým zmíněným kritériím. Poslední sloupec Dává výsledné hodnocení daného typu pohonu. Hodnocení jsem prováděl v rozmezí 1 až 5, kde 1 znamená nejhorší ohodnocení daného kritéria, 5 znamená nejlepší hodnocení.

	Cena	Účinnost	Hmotnost	Dynamické účinky	Zástavba	Výsledek
Podélně orientovaný pohon	4	3	4	5	1	3,4
Přímý pohon – odpružený	2	5	2	2	5	3,2
Příčně orientovaný částečně odpružený pohon	5	4	5	3	4	4,2
Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou hřídelí	2	4	5	4	4	3,8

Tabulka 13 – Zhodnocení a výběr optimálního pohonu pro kolejový elektrobus

Nejlepší výsledek tedy odpovídá příčně orientovanému částečně odpruženému pohonu. Přestože vychází tento typ pohonu nejlépe, rozhodl jsem se zvolit jiný typ pohonu. Volím pohon s druhým nejlepším výsledkem, tedy příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí.

Důvodem jsou několikrát zmiňované dynamické účinky od nekvalitních tratí. Plně odpružený pohon se nachází v prvotně odpružených hmotách a dynamické účinky na něj tedy nejsou tak výrazné, jako v případě částečně odpruženého pohonu, kdy pohon je zčásti na neodpružených hmotách dvojkolí.

Mnou navržené řešení považuji dle mého názoru za nejvhodnější kompromis mezi cenou, účinností, hmotností, dynamickými účinky a zástavbou. Cena je pouze navýšena vyššími náklady na výrobu duté hřídele. Účinnost je však po možnosti přímého pohonu nejvyšší možná s použitím převodu. Hmotnost pohonu podobně jako v případě částečně odpruženého pohonu vychází nejlépe. Z toho také vyplývají nižší dynamické účinky, jak bylo popsáno výše. A co se týče zástavby baterií, i s tímto způsobem pohonu lze dosáhnout dostatečného prostoru pro baterie.

6. Trakční výpočty a účinnost rekuperace kolejového elektrobusu

6.1. Trakční výpočty jízdního cyklu na úsecích 2 a 3,5 km

Nejčastěji se vzdálenost zastávek na regionálních tratích pohybuje od 2 km do 3,5 km. Proto i v zadání této diplomové práce je vyšetření trakčních výpočtů v těchto úsecích.

6.1.1. Parametry kolejového elektrobusu pro trakční výpočty

Při trakčních výpočtech vycházím ze základních technických údajů kolejového elektrobusu z tabulky 6 (str. 30)¹. Pro trakční výpočty jsou potřebné další důležité údaje, ty uvádím v tabulce 14 a za ní následuje komentář, jak jsem hodnoty zvolil či spočítal. Pro trakční výpočty uvažuji vždy plně obsazené vozidlo.²

rozjezdová tažná síla – maximální	kN	66
rozjezdová tažná síla – s použitým motorem	kN	42,36
rozjezdové zrychlení	m/s ²	1,3
součinitel adheze při rozjezdu		0,25
brzdná síla EDB ³	Kn	39,60
zábrzdné zpomalení EDB	m/s ²	1,41
součinitel adheze při brzdění EDB		0,15
napájecí napětí na vstupu střídače	V	750
maximální rychlost	km/h	120
trakční výkon kW	kW	300

Tabulka 14 – Parametry kolejového elektrobusu pro trakční výpočty

Maximální rozjezdovou tažnou sílu $F_{t\text{rozmax}}$ [kN] určuji z adhezní hmotnosti vozidla m_{ad} [t], tíhového zrychlení g [$m \cdot s^{-2}$] a součinitele adheze při rozjezdu μ_t [–]:

$$F_{t\text{rozmax}} = m_{ad} \cdot g \cdot \mu_t = 26,91 \cdot 9,81 \cdot 0,25 = 66 \text{ kN} \quad (6.1)$$

kde jsem volil střední hodnotu součinitele adheze pro rozjezd $\mu_t = 0,25$ ⁴.

¹ Viz kapitola 4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu, podkapitola 4.1. Základní parametry na str. 30.

² Bližší popis viz kapitola 4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu, podkapitola 4.1. Základní parametry na str. 31.

³ EDB = elektrodynamická brzda

⁴ V letních dnech se hodnota součinitele adheze pohybuje až kolem hodnoty 0,35, zatímco při zhoršených podmínkách, např. v zimě nebo při dešti může mít součinitel adheze hodnotu 0,15, kterou dále uvažuji kvůli bezpečnosti při brzdění

Maximální rozjezdová tažná síla respektuje adhezní omezení, což schopnost kol dvojkolí přenášet tažnou sílu bez prokluzu¹.

Reálnou rozjezdovou tažnou sílu kolejového elektrobusu $F_{t\,roz}$ [kN] však musím určit z maximálního rozjezdového momentu zvoleného motoru $M_{roz} = 1550 \text{ Nm}$, který jsem odečetl z trakční charakteristiky zvoleného motoru, viz Příloha 3². Rozjezdovou tažnou sílu se zvoleným motorem $F_{t\,roz}$ [kN] počítám pak následovně:

$$F_{t\,roz} = \frac{N_{mot} \cdot M_{roz} \cdot i \cdot \eta_{pr}}{\frac{d_{max}}{2}} \quad (6.2)$$

Po dosazení do vztahu (6.2) vychází rozjezdová tažná síla kolejového elektrobusu $F_{t\,roz}$ [kN] :

$$F_{t\,roz} = \frac{2 \cdot 1550 \cdot 6,05 \cdot 0,96}{\frac{850}{2}} = 42,36 \text{ kN} \quad (6.3)$$

Rozjezdové zrychlení jsem zvolil $a_{roz} = 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ s ohledem na komfort cestujících.

Brzdnou sílu elektrodynamické brzdy (EDB) F_b [kN] počítám podobně jako rozjezdovou tažnou sílu $F_{t\,roz\,max}$ [kN] , nicméně pro brzdění uvažuji nejhorší možné adhezní podmínky (např. déšť, sníh na koleji), což odpovídá $\mu_b = 0,15$:

$$F_b = m_{ad} \cdot g \cdot \mu_b = 27 \cdot 9,81 \cdot 0,15 = 40 \text{ kN} \quad (6.4)$$

Z toho také pak plyne zábrzdné zpomalení a_b [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], které spočítám následovně:

$$a_b = \frac{F_b}{m_{ad} \cdot (1 + \xi)} = \frac{40}{27 \cdot (1 + 0,07)} = 1,38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (6.5)$$

kde součinitel ξ [-] jsem určil v tabulce 6 (str. 30).

Napájecí napětí na vstupu střídače předpokládám už podle zvolených motorů 750 V³.

Maximální rychlost kolejového elektrobusu odpovídá původní koncepci kolejového autobusu 120 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Tato rychlost je volena z toho důvodu,

¹ V případě prokluzu kol zasáhne protismykové zařízení, které zajistí snížení tažné síly tak, aby kola již neprokluzovala

² Bližší popis motoru uvádím také v kapitole 7. Koncepční řešení navrženého pohonu, podkapitola 7.2 Motor na str. 63.

³ Viz kapitola 7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobusu, podkapitola 7.6. Trakční měnič na str. 67.

aby kolejový elektrobus, který pojede např. do větší stanice po části hlavní trati, nebrzdil rychlejší vlaky s maximální rychlostí $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Trakční výkon odpovídá dvojnásobku trakčního výkonu jednoho motoru, jelikož v kolejovém elektrobusu uvažují dva elektromotory s výkonem 150 kW.

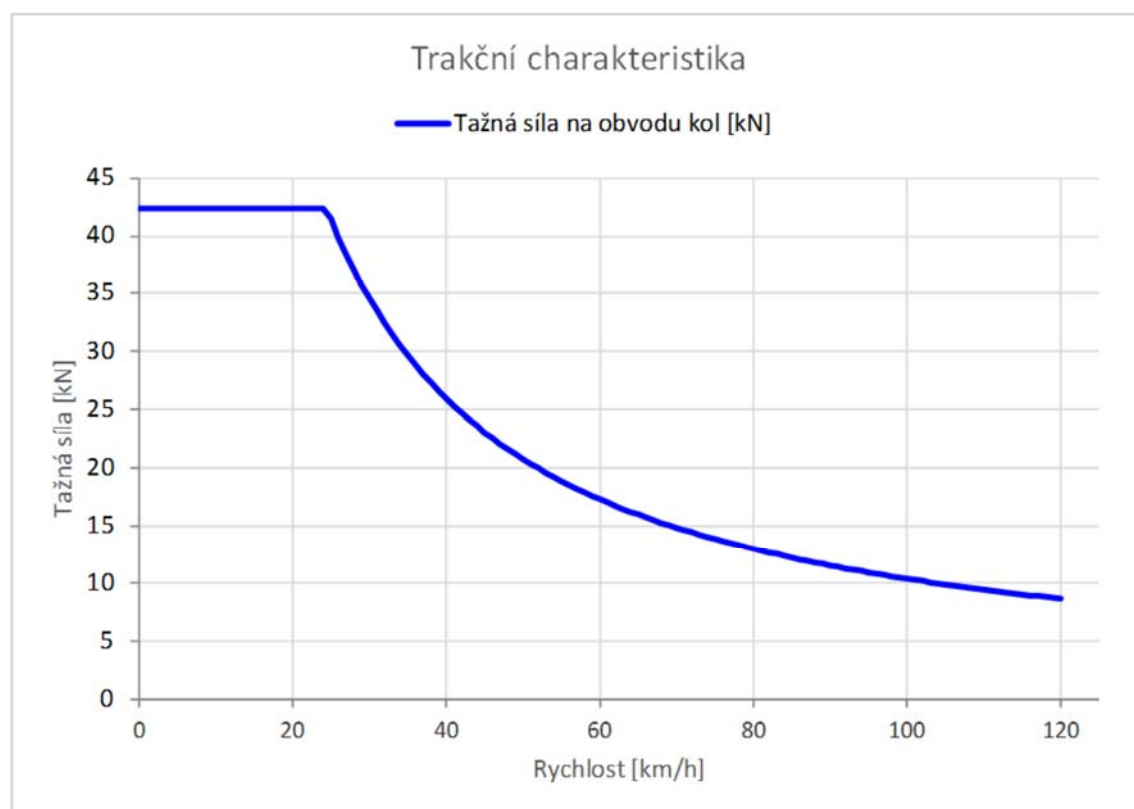
6.1.2. Trakční charakteristika

Nyní lze z těchto vstupních dat trakční charakteristiku kolejového elektrobusu, což je závislost tažné síly F_t [kN] na rychlosti jízdy v [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$].

Trakční charakteristika je zobrazena v grafu 2. Začátek trakční charakteristiky je mírně idealizovaný oproti reálnému průběhu a představuje adhezní omezení vozidla. To bylo vyjádřeno ve vztahu (6.2) pro rozjezdovou tažnou sílu F_{troz} [kN].

Další částí, která navazuje na adhezní omezení, je hyperbola konstantního výkonu. Síla na této části charakteristiky odpovídá maximálnímu využití výkonu trakčních motorů.

Poslední omezení je rychlostní, odpovídá maximální rychlosti jízdy vozidla $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Graf 2 – Trakční charakteristika kolejového elektrobusu

6.1.3. Základní rovnice jízdy vlaku, odpory

Proti pohybu vozidla při jízdě však působí odporová síla. Z D'Alambertova principu dynamické rovnováhy sil lze vyjádřit základní rovnici jízdy vlaku:

$$F_t = F_{sr} + F_o + F_a \text{ [kN]} \quad (6.6)$$

Velikost tažné síly F_t [kN] na levé straně rovnice je funkce závislá na rychlosti jízdy a vyjadřuje potřebnou sílu pro překonání odporů na pravé straně rovnice pro danou rychlost v [km · h⁻¹].

První člen na pravé straně rovnice F_{sr} [kN] odpovídá traťovému odporu, který není závislý na rychlosti jízdy vozidla. Tento člen by bylo možné dále rozepsat následovně:

$$F_{sr} = F_s + F_r + F_{tun} \text{ [kN]} \quad (6.7)$$

Pravá strana vztahu popisuje postupně odpor ze sklonu trati při jízdě do stoupání F_s [kN], odpor z jízdy obloukem F_r [kN] a odpor z jízdy v tunelu F_{tun} [kN]. Je nutno dodat, že v případě jízdy ze stoupání síla ze sklonu trati F_s urychluje vozidlo, není pak tedy jízdním odporem.

Trakční výpočty neprovádím pro reálnou trať, ale zjednodušeně na úsecích 2 km a 3,5 km. Detailní výpočty by byly náročné a přesahovaly by rozsah této diplomové práce. Proto si dovoluji v rámci zjednodušení trakčních výpočtů zanedbat poslední dva členy vztahu (6.7) a traťový odpor vyjádřím následovně ze vztahu pro odpor ze stoupání F_s [kN]:

$$F_{sr} = F_s = m \cdot g \cdot s \text{ [kN]} \quad (6.8)$$

Kde m [t] je hmotnost vozidla při provozním obsazení¹, g [m · s⁻²] je gravitační zrychlení a s [‰] je sklon trati.

Druhý člen ve vztahu (6.6), odpovídající vozidlovému odporu F_o [kN], lze podobně jako vztah (6.7) pro traťový odpor F_{sr} [kN] rozepsat následovně:

$$F_o = F_f + F_L + F_{mech} + F_{aero} \text{ [kN]} \quad (6.9)$$

kde F_f [kN] je odpor valení, F_L [kN] je odpor v ložiskách, F_{mech} [kN] představuje odpor mechanismů a aerodynamický odpor vzduchu F_{aero} [kN], závislý na rychlosti jízdy.

Jelikož první dva členy na pravé straně vztahu (6.9) budu dále uvažovat v jednotkách měrného odporu, nejprve vysvětlím pojem měrného odporu p [N/kN], který lze vyjádřit následujícím vztahem:

¹ Uvažuji trakční výpočty pro maximálně obsazené vozidlo, viz kapitola 4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu, podkapitola 4.1. Základní parametry na str. 31.

$$p = \frac{1000 \cdot F}{m \cdot g} [N/kN] \quad (6.10)$$

Kde F [kN] je odporová síla, m [t] je hmotnost vozidla při provozním obsazení a g [$m \cdot s^{-2}$] je gravitační zrychlení. Princip měrného odporu tedy spočívá v dělení odporu v Newtonech tíhou vozidla v kilo Newtonech.

Součet odporu valení F_f [kN] a odporu v ložiskách F_L [kN] lze pak uvažovat v měrných veličinách přibližně takto:

$$p_f + p_L \approx 1,5 N/kN \quad (6.11)$$

kde p_f [N/kN] je měrný odpor valení a p_L [N/kN] je měrný odpor v ložiskách.

Odpor mechanismů F_{mech} se projevuje při jízdě výběhem, tedy bez přenosu hnací síly, což je způsobeno např. broděním ozubených kol v oleji. Vzhledem k tomu, že v trakčních výpočtech nepočítám s jízdou výběhem, tyto odpory tedy neuvažuji.

Posledním členem na pravé straně vztahu (6.9) pro vozidlový odpor F_o [kN] je aerodynamický odpor vzduchu F_{aero} [kN], který je jako jediný člen vztahu (6.9) závislý na rychlosti. Tento člen tvoří při vyšších rychlostech nejvýznamnější složku ze všech odporů. Odpor F_{aero} [kN] vyjádřím následovně:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S_x \quad (6.12)$$

kde $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ uvažuji hustotu vzduchu, v [$km \cdot h^{-1}$] je rychlost jízdy, $C_x = 0,7$ je činitel tvaru vozidla, který uvažuji podle tvaru skříně kolejového elektrobusu a S_x [m^2] je čelní plocha vozidla.

Třetí člen vztahu (6.6) je odpor ze zrychlení F_a [kN]. Tento člen se vyjádří následovně:

$$F_a = m \cdot (1 + \xi) \cdot a \quad (6.13)$$

kde m [t] je hmotnost vozidla při provozním obsazení, ξ [–] je součinitel rotačních hmot, stanovený v tabulce 6 (str. 30)¹ a a [$m \cdot s^{-2}$] je zrychlení vozidla.

Dosud jsem popsal jednotlivé členy rovnice jízdy vlaku (6.6) a při uvažování zmíněných zjednodušení lze tuto rovnici psát obecně v následujícím tvaru:

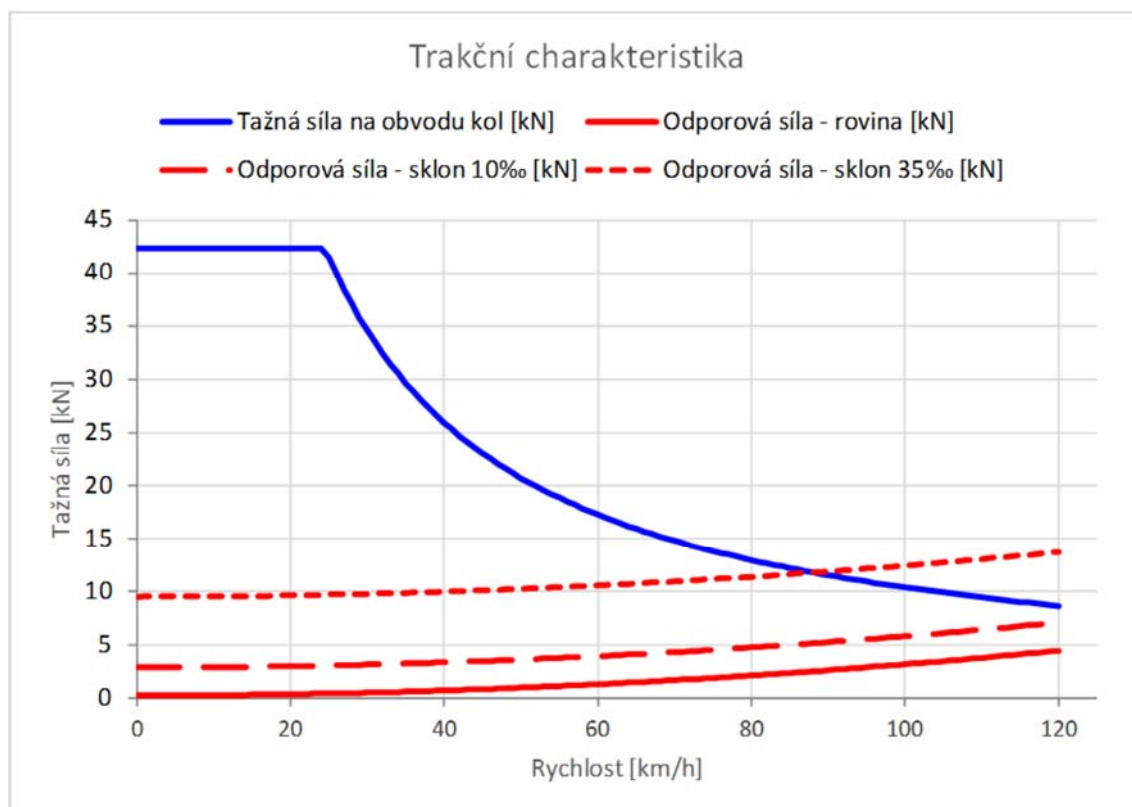
$$F_t = F_s + (F_f + F_L) + F_{aero} + F_a [kN] \quad (6.14)$$

¹ Viz kapitola 4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu, podkapitola 4.1. Základní parametry, typový výkres na str. 30.

Pokud dále do rovnice (6.14) dosadím podle vztahů (6.8), (6.11), (6.12) a (6.13) získávám jí v tomto tvaru:

$$F_t = m \cdot g \cdot s + (1,5 \cdot m \cdot g) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 + m \cdot (1 + \xi) \cdot a \text{ [kN]} \quad (6.15)$$

Nyní lze odpory vynést do trakční charakteristiky (Graf 2) což zobrazují v následujícím grafu 3:

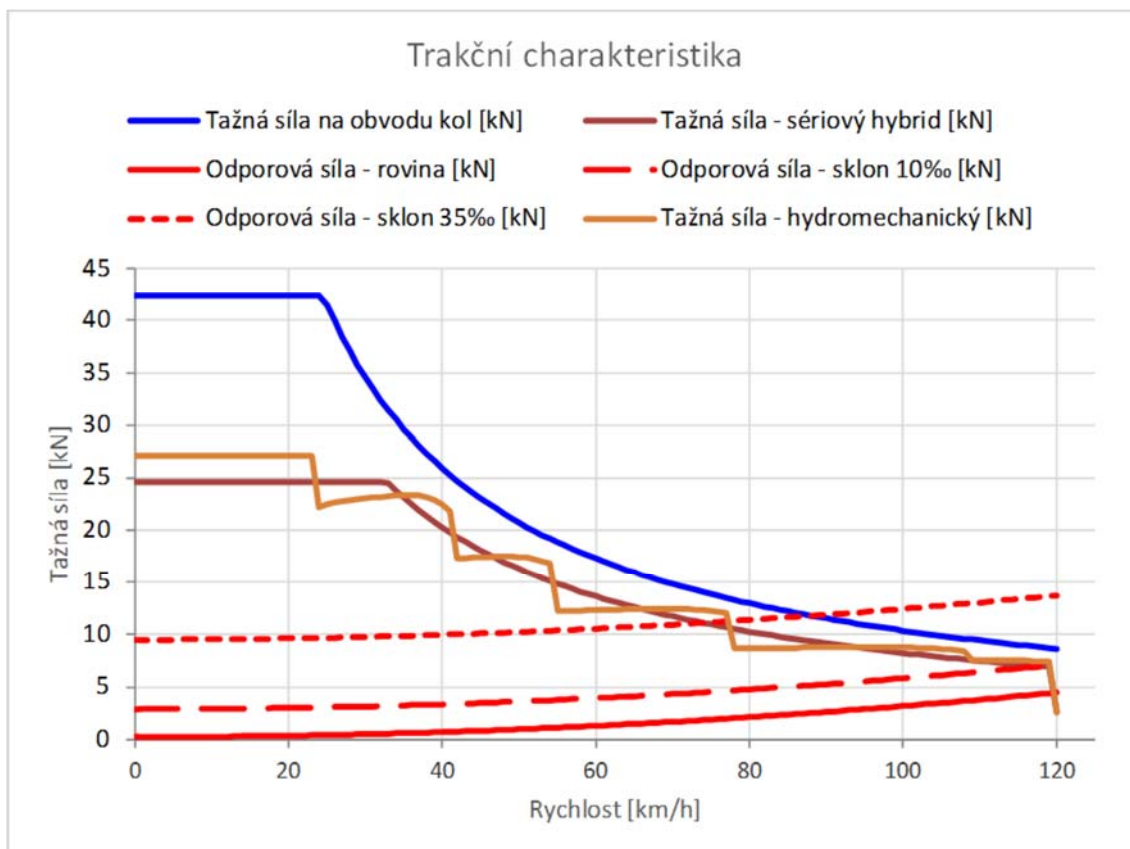


Graf 3 – Trakční charakteristika s odpory

Z trakční charakteristiky s odpory v grafu 3 pro různé sklony trati je patrné, že na rovině kolejový elektrobus dosáhne maximální rychlosti bez problémů. Při sklonu trati 10‰ je ještě stále možné dosáhnout maximální rychlosti. Při vyšších sklonech již vozidlo maximální rychlosti nedosáhne. Například při maximálním sklonu 35‰ již kolejový elektrobus dosáhne maximální rychlosti necelých 90 km/h.

Zajímavým srovnáním může také být porovnání klasické varianty kolejového autobusu s hydromechanickým přenosem výkonu, varianty sériového hybridu a mnou řešeného kolejového elektrobuse. Toto srovnání, spolu s odpory uvádím v grafu 4.

Největší rozdíly jsou v rozjezdové tažné síle a dále v hyperbole konstantního výkonu. Mnou navržený pohon kolejového autobusu používá totiž silnější motory než ostatní varianty.

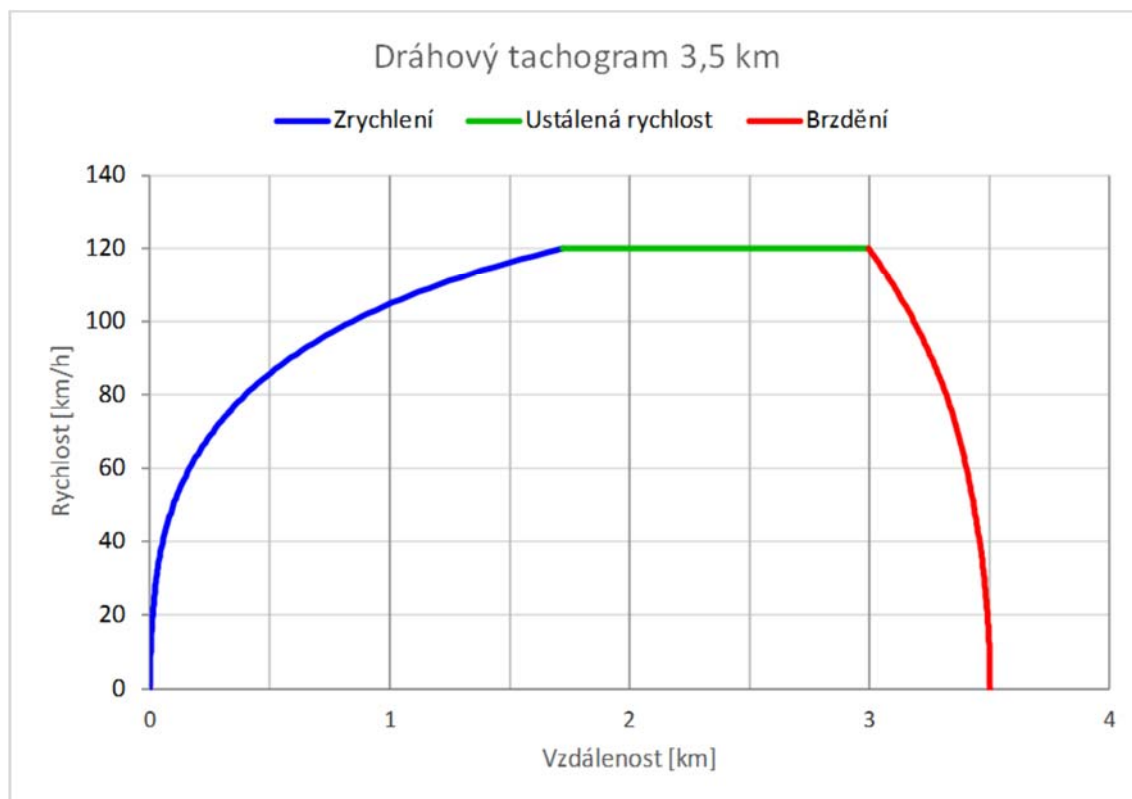


Graf 4 – Trakční charakteristika – porovnání variant kolejového autobusu

6.1.4. Dráhové a časové tachogramy

Z rovnice (6.15) si při rychlosti jízdy v [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$] a pro tažnou sílu F_t [kN] mohou vyjádřit zrychlení vozidla a [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], které používám pro vyjádření dráhového a časového tachogramu.

V grafu 5 je dráhový tachogram, který představuje závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti, v tomto případě pro úsek 3,5 km.



Graf 5 – Dráhový tachogram – traťový úsek 3,5 km

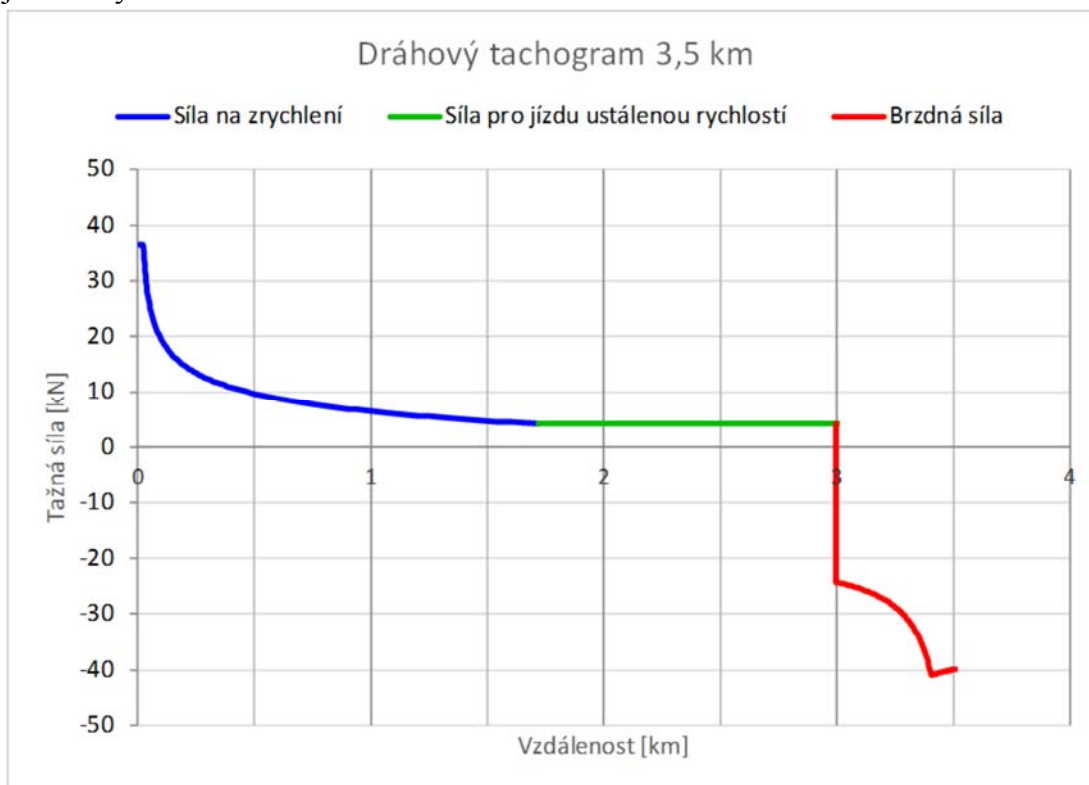
Dráhový tachogram je rozdělen na tři části podle barev, dle legendy. První část představuje zrychlování vozidla na maximální rychlost 120 km/h. Té dosáhne kolejový elektrobus po 1,87 km jízdy, což podle časového tachogramu v grafu 7 odpovídá době 75 s. Pak následuje 1,27 km úsek při konstantní maximální rychlosti. Závěrečná fáze představuje zabrzdění vozidla, přičemž se začíná brzdit ve 3 km ujeté dráhy, tedy po 113 s.

Dále je možné v tachogramu vynést sílu pro zrychlení, viz graf 6. Průběh je rozdělen podobně jako průběh rychlosti, tedy na sílu na zrychlení, sílu na ustálenou rychlost a sílu na brzdění.

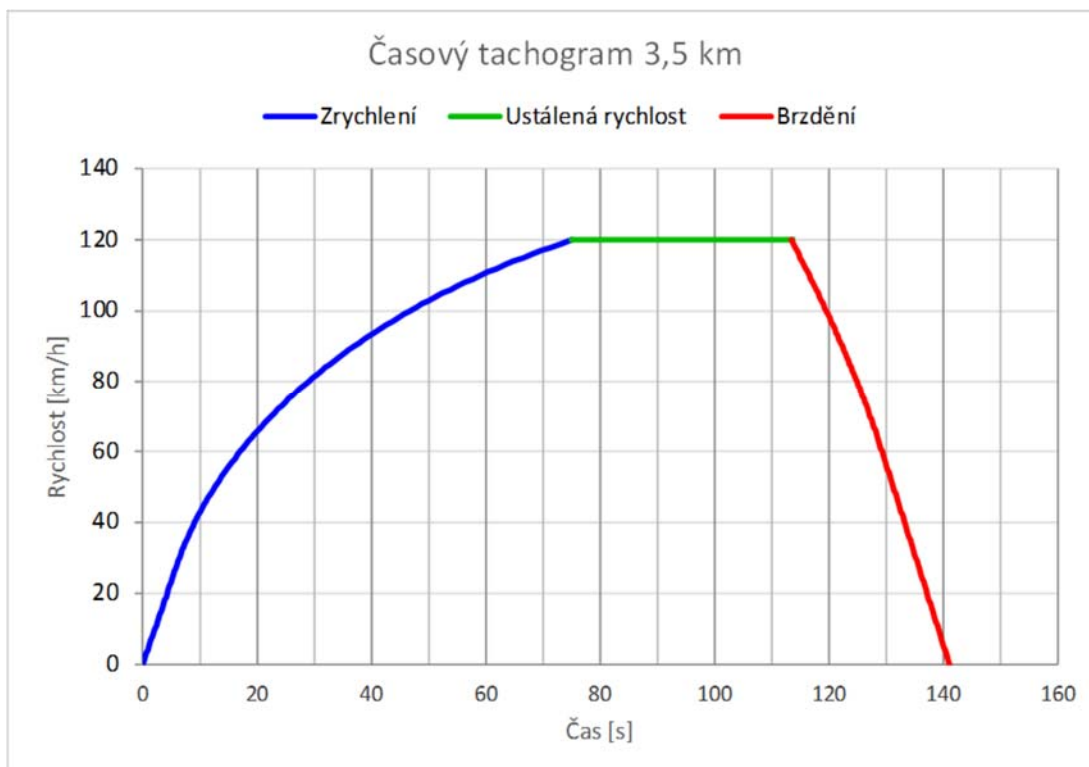
Podobně je v grafu 7 vyneseno časové tachogram kolejového elektrobusu, znázorňující závislost rychlosti na čase, opět pro úsek 3,5 km.

Časový tachogram je opět rozdělen na tři části, podobně jako dráhový tachogram. Plyne z něj, že kolejový elektrobus první část představuje zrychlování vozidla na maximální rychlost 120 km/h. Té dosáhne kolejový elektrobus po 1,87 km jízdy, což je po 80s jízdy. Pak následuje 1,1 km úsek při konstantní maximální rychlosti.

Závěrečná fáze představuje zabrzdění vozidla, přičemž se začíná brzdit v 2,97 km ujeté dráhy.

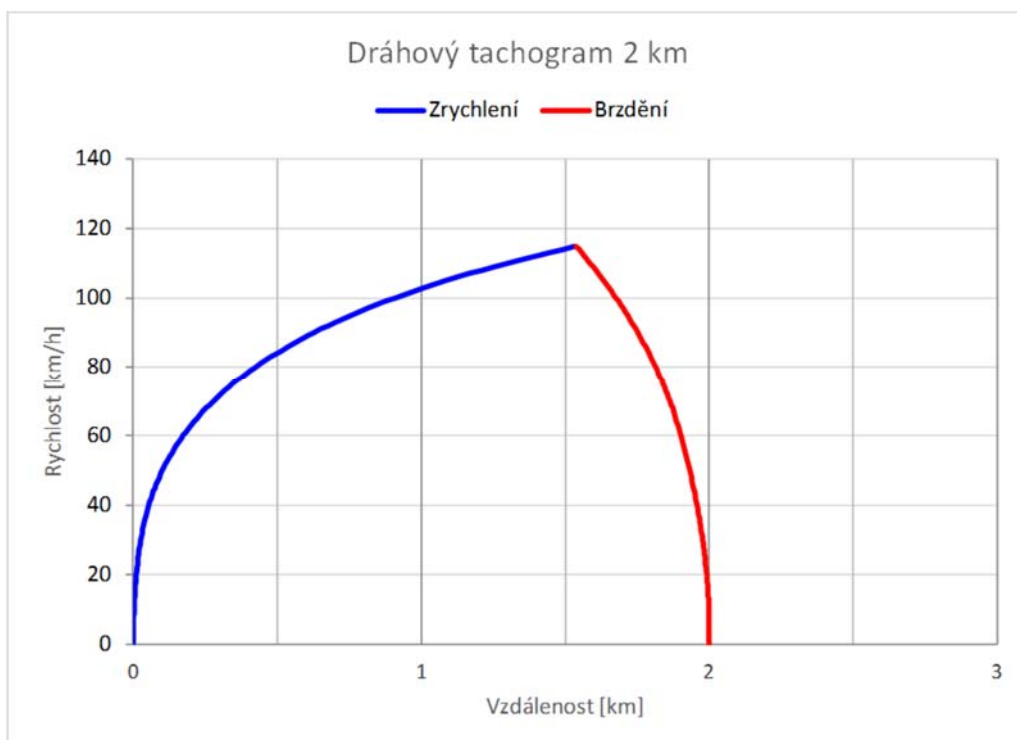


Graf 6 – Vynesení tažné síly do dráhového tachogramu – traťový úsek 3,5 km



Graf 7 – Časový tachogram – traťový úsek 3,5 km

Z dráhového a časového tachogramu pro traťové úseky 2 km (grafy 8 a 9) je patrné, že kolejový elektrobus svoji maximální rychlosti nedosáhne, dosáhne pouze rychlosti 115 km/h.



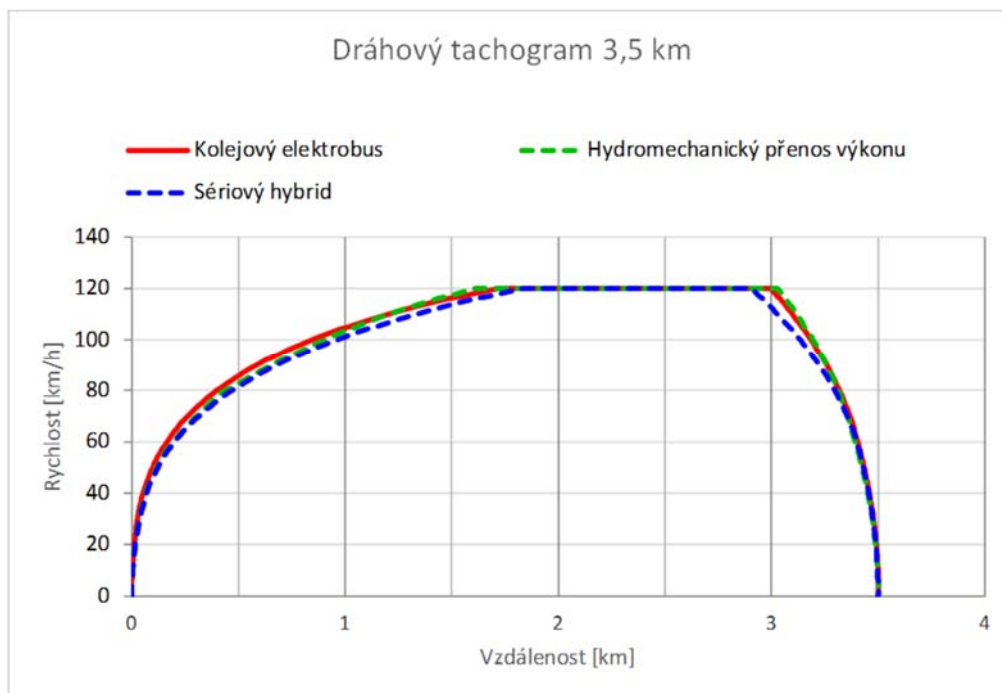
Graf 8 – Dráhový tachogram – traťový úsek 2 km



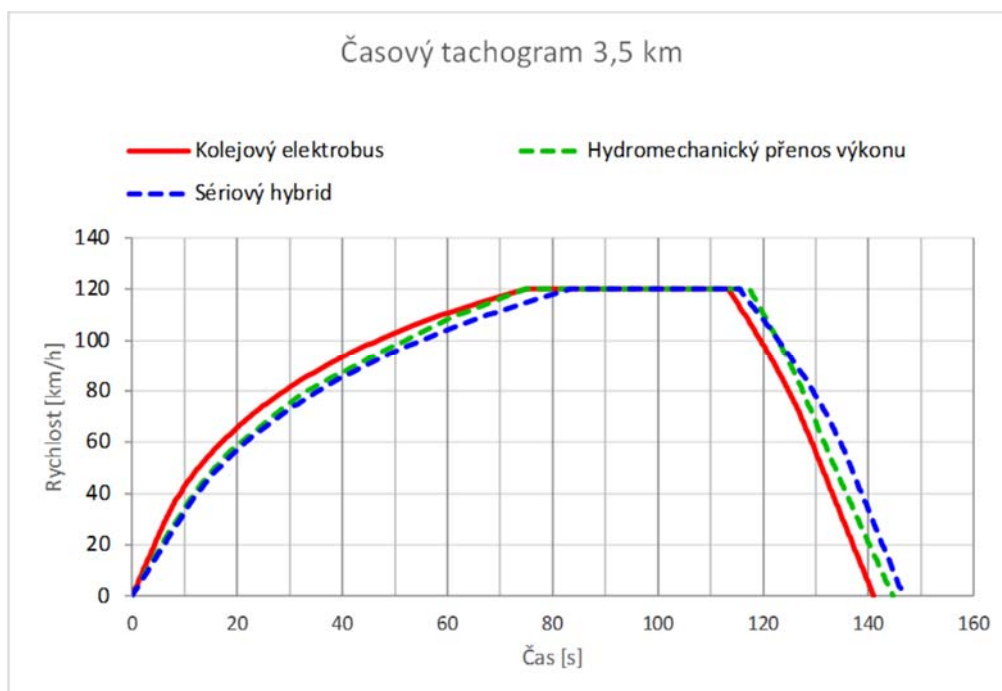
Graf 9 – Časový tachogram – traťový úsek 2 km

6.1.5. Porovnání tachogramů variant kolejového autobusu

V grafu 10 porovnávám stejný dráhový tachogram kolejového elektrobuse s variantou kolejového autobusu s hydromechanickým přenosem výkonu a s variantou sériového hybridu, upřednostňovanou Pavlem Hříbalem v jeho diplomové práci [13]. Podobně v grafu 11 porovnávám časové tachogramy těchto tří variant.



Graf 10 – Dráhový tachogram – traťový úsek 3,5 km – porovnání variant kolejového autobusu



Graf 11 – Časový tachogram – traťový úsek 3,5 km – porovnání variant kolejového autobusu

Z obou tachogramů je patrné, že kolejový elektrobus nejprve zrychluje rychleji, než kolejový autobus s hydromechanickým přenosem výkonu a také rychleji než sériový hybrid. Nakonec však maximální rychlosti dosáhne nejdříve varianta s hydromechanickým přenosem výkonu téměř shodně s variantou kolejového elektrobusu. Poté dosáhne maximální rychlosti i sériový hybrid.

Další odlišnosti všech tří variant pohonu jsou patrné z časového tachogramu. Je zřejmé, že jízdní cyklus 3,5km nejrychleji ujede kolejový elektrobus. O něco později tento úsek ujede kolejový autobus s hydromechanickým přenosem výkonu, který ovšem může brzdit nejkratší vzdálenost ze všech tří variant. Nejdéle trvá celý úsek kolejovému autobusu se sériovým hybridním pohonem. Tyto rozdíly jsou však velmi malé, varianty se od sebe liší přibližně o 2 sekundy, jak je patrné z tabulky 15:

Varianta	Čas [s]
Kolejový autobus – hydromechanický přenos výkonu	144,71
Kolejový autobus – sériový hybrid	146,69
Kolejový elektrobus	141,02

Tabulka 15 – Časový tachogram – porovnání variant kolejového autobusu

6.2. Účinnost rekuperace

Účinnost rekuperace $\eta_{rek\ bat}$ [%] stanovím podle následujícího vztahu:

$$\eta_{rek\ bat} = \frac{A_b \cdot \eta_{do\ baterie} \cdot \eta_{na\ dvojkoli}}{\frac{A_{tr}}{\eta_{na\ dvojkoli}} + \frac{A_{pp}}{\eta_{na\ dvojkoli}}} \quad (6.16)$$

kde A_b [kWh] je energie získaná elektrodynamickým brzděním. Tuto energii však musím vynásobit účinností přenosu brzděné energie do baterie $\eta_{do\ baterie}$ [%]. Dále předpokládám, že tuto uloženou energii použiju opět k trakci, je tedy nutné násobit účinností přenosu energie nadvojkolí $\eta_{na\ dvojkoli}$ [%]. Jmenovatel tvoří dodaná energie využitá na trakci A_{tr} a energie na pomocné pohony A_{pp} .

Účinnost rekuperace $\eta_{rek\ bat}$ uvažuji vztáženou na veškerou využitou energii z baterií, a to z toho důvodu, abych vystihl potřebnou kapacitu baterií.

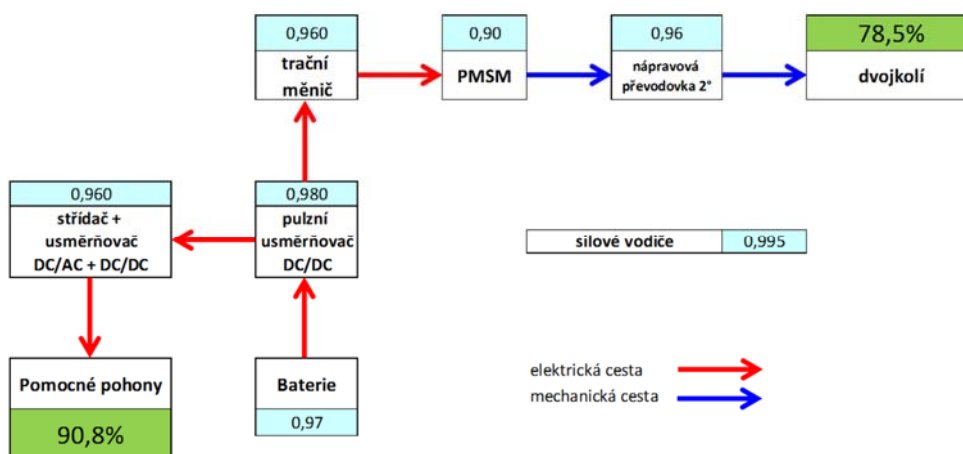
Energii z brzdění elektrodynamickou brzdou A_b [kWh] počítám pouze do cca 5 km/h, pro nižší rychlosti již elektrodynamická brzda ztrácí svůj účinek a je vystřídána brzdou mechanickou.

Předpokládám, že baterie jsou schopny pojmout veškerou rekuperovanou energii. Ačkoliv výrobce mnou použitých baterií, které zmiňuji v následující kapitole¹,

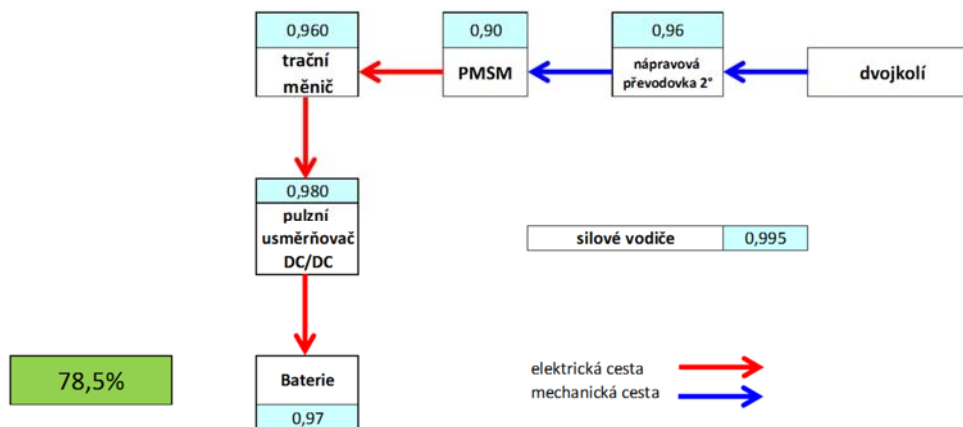
¹ Viz kapitola 7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobusu, podkapitola 7.5 Baterie na str. 66.

přesnou maximální hodnotu nabíjecího proudu neuvádí, po konzultaci s prof. Jaroslavem Novákem mohou předpokládat, že baterie velké nabíjecí proudy zvládnou. Podle hodnoty maximálního nabíjecího proudu baterií je totiž možné určit, zda baterie pojmu veškerou generovanou energii z elektrodynamického brzdění.

Schéma toku energie je na Obr. 31, kde v zeleném políčku je celková účinnost přenosu energie na dvojkolí $\eta_{na\ dvojkolí}$ [%]. Na dalším schématu, Obr. 32, je znázorněn tok energie v případě rekuperace. V zeleném políčku je vypočtená účinnost $\eta_{do\ baterie}$ [%], se kterou se rekuperovaná energie uloží do baterií.



Obr. 31 – Účinnost přenosu energie na dvojkolí a na pomocné pohony



Obr. 32 – Účinnost přenosu brzděné energie do baterie

Výše popsané členy, tedy energii získanou brzděním, energií na trakti a na pomocné pohony, společně s jednotlivými účinnostmi shrnuji v tabulce 16. Porovnávám zde úseky 2 a 3,5 km pro kolejový elektrobus a poslední sloupec představuje porovnání s efektivitou rekuperace sériového hybridu.

Energie získaná brzděním A_b [kWh] a energie na trakti A_{tr} [kWh] jsem získal výpočtem z dráhového tachogramu. Při výpočtu energie na pomocné pohony A_{pp} [kWh]

jsem vycházel z diplomové práce Pavla Hříbala [13] a přizpůsobil je variantě kolejového elektrobuse, tedy bez pomocných pohonů pro spalovací motor.

Nejzajímavější je poslední řádek tabulky 16. Na úseku 2 km je logicky rekuperace nejvýhodnější, neboť vozidlo se pouze rozjede a po určité rychlosti pouze brzdí, není zde spotřebována energie na ustálenou rychlost. Porovnání kolejového elektrobuse se sériovým hybridem vychází na úseku 3,5 km z hlediska efektivity rekuperace lépe pro kolejový elektrobús. To plyne zejména z možnosti uložení veškeré rekuperované energie do baterií.

	2 km elektrobús	3,5 km elektrobús	3,5 km sériový hybrid
A_b [kWh]	4,31	4,05	2,58
A_{tr} [kWh]	5,24	7,36	7,3
A_{PP} [kWh]	4,31	1,25	1,98
$\eta_{do\ baterie}$ [%]	78,9	78,9	67,1
$\eta_{na\ dvojkoli}$ [%]	78,5	78,5	79,7
$\eta_{na\ PP}$ [%]	90,8	90,8	74,9
$\eta_{rek\ trak}$ [%]	47,63	36,63	29
$\eta_{rek\ bat}$ [%]	32,73	25,09	13,43

Tabulka 16 – Účinnost rekuperace

Při výpočtech jsem narazil na nesrovnalosti při porovnání účinností rekuperace sériového hybridu a kolejového elektrobuse. Tyto nesrovnalosti jsou dány odlišnou metodikou výpočtu rekuperace, což je vystiženo dvěma výpočty účinnosti rekuperace $\eta_{rek\ bat}$ [%] a $\eta_{rek\ trak}$ [%].

Abych mohl obě varianty porovnat, přizpůsobil jsem výpočet dle dostupných zdrojů [13] a vyjádřil účinnost rekuperace jak podle vztahu (6.16), tak podle metodiky výpočtu rekuperace v diplomové práci Pavla Hříbala, tedy podle následujícího vztahu:

$$\eta_{rek\ trak} = \frac{A_b \cdot \eta_{do\ baterie} \cdot \eta_{na\ dvojkoli}}{A_{tr}} \quad (6.17)$$

Z údajů v tabulce 16 jsem však dospěl zřejmě k nejdůležitějšímu závěru co se týče baterií. Po vlastních propočtech jsem dospěl k tomu, že mnou navržené baterie¹ z následující kapitoly umožňují provoz kolejového elektrobuse na úseku o délce 182 km. Tento úsek se skládá z dílčích z traťových úseků o délce 3,5 km. Uvažuji využití baterií v rozsahu 15-85 % kvůli zvýšení jejich životnosti².

¹ Viz kapitola 7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobuse, podkapitola 7.5 Baterie na str. 66.

² Více viz kapitola 2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobuse, konec podkapitoly 2.1.1. Škoda Perun HE (High Energy) na str. 14 (poslední odstavec nahoře)

7. Koncepční řešení navrženého pohonu kolejového elektrobusu

7.1. Výkres pohonu

Zástavba baterií a hnacího ústrojí do skříně a podvozků vozidla je na výkrese v Příloze 2. V dalších podkapitolách popíšu jednotlivé komponenty celého pohonu.

Na výkrese pohonu je na pozici (1) dvojkolí. Na pozici (2) je zvolený motor, který dále popisují v podkapitole 7.2. Motor na str. 63. Převodovku (3) komentují v podkapitole 7.3 na str. 64. V podkapitole 7.4 na str. 65 je popsána dutá kloubová hřídel (4). Na pozici (5) jsou brzdové jednotky. Poslední položkou jsou baterie, popsané v podkapitole 7.5 na str. 66.

Vzhledem k tomu, že tématem méj diplomové práce je koncepční řešení pohonu, detailně neřeším např. celý kontejner s bateriemi detailně. Pouze předpokládám jejich přibližné rozmístění a zejména počet bateriových modulů, respektive celkovou možnou kapacitu baterií. Samozřejmě respektuji požadavky plynoucí z kapitoly 3. Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy.

7.2. Motor

Aby měl kolejový elektrobus dostatečný výkon a zároveň byla co nejefektivněji využita energie z baterií, zvolil jsem synchronní motor s permanentními magnety (dále PMSM) od firmy Alstom, použitý u tramvaje Citadis Dualis¹. Oproti asynchronnímu motoru, který je běžně používán v trakčních pohonech, má PMSM určité výhody, které následně popíšu. Katalogový list tohoto motoru uvádím v Příloze 3.

Výrobce uvádí velmi vysokou účinnost synchronního motoru, ve jmenovitém režimu až 97 %. [53]. Výrobce také uvádí vyšší účinnost oproti běžně používanému asynchronnímu motoru.

Synchronní motor má však nejvyšší účinnost pouze ve jmenovitém bodě své charakteristiky, tedy při určitých otáčkách. To znamená, že nejvyšší účinnosti motor dosahuje kolem určité rychlosti kolejového elektrobusu. Pro jiné otáčky, tedy pro jiné rychlosti, již motor pracuje s nižší účinností. Abych vyjádřil účinnost PMSM reálněji pro celý rozsah otáček, uvažuji po konzultaci s prof. Jaroslavem Novákem účinnost 90 %. [54] S touto účinností jsem prováděl trakční výpočty a výpočet efektivity rekuperace.

Kromě účinnosti je výhodou zvoleného PMSM nízká váha oproti asynchronnímu motoru podobného výkonu, která činí 330 kg.

Nemám žádné další konkrétní informace týkající se zvoleného motoru, kromě uvedených zdrojů. Předpokládám však, že cena tohoto motoru bude zásadní nevýhodou použití tohoto motoru. Na druhou stranu, pokud by byla realizována výroba

¹ Viz kapitola 2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobusů, podkapitola 2.2.1. Alstom Citadis Dualis na str. 19.

kolejového elektrobuseu ve větším počtu kusů, mohlo by díky sériovosti výroby být dosaženo snížení ceny.

7.3. Převodovka

Pro koncepční návrh převodovky je důležité zejména požadovaný převodový poměr a nutnost použití dvoustupňové převodovky.

Převodový poměr i [–] by měl být volen tak, aby vozidlo bylo schopno dosáhnout maximální rychlosti i na opotřebovaných kolech. Toho lze dosáhnout výpočtem podle následujícího vztahu:

$$i = \frac{\frac{\pi \cdot n_{max} [min^{-1}] \cdot 30}{2}}{\frac{v_{max} [km \cdot h^{-1}]}{3,6} \cdot \frac{d_{min} [m]}{2}} \quad (7.1)$$

Převodový poměr je obecně definován jako poměr otáček hnacího kola (čítatel vztahu (7.1), odpovídá otáčkám rotoru elektromotoru) ku otáčkám hnaného kola (jmenovatel vztahu (7.1), odpovídá otáčkám na dvojkolí). Ve vztahu (7.1) $n_{max} [min^{-1}]$ označuje maximální otáčky zvoleného motoru, $v_{max} [km \cdot h^{-1}]$ je maximální rychlost kolejového elektrobuseu a $d_{min} [mm]$ je průměr opotřebovaných kol.

Vstupní hodnoty pro výpočet a výsledný převodový poměr i [–] jsou v následující tabulce 17:

průměr kol nových	mm	850
průměr kol opotřebovaných na minimum	mm	770
maximální rychlost	km/h	120
otáčky trakčního motoru při v_{max} a D_{min}	min-1	5000
převodový poměr		6,05

Tabulka 17 – Výpočet převodového poměru pro zvolený pohon

Z dalšího vyšetření vyplynulo, že převodovku by bylo nutné řešit jako dvoustupňovou, neboť jednostupňová převodovka s navrženým převodem by zasahovala mimo obrys pro konstrukci vozidla, což také plyne z požadavků z kapitoly 3. Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy.

Detailní návrh převodovky však není součástí této diplomové práce, jedná se pouze o koncepční návrh převodovky. Konkrétní typ převodovky pro kolejový elektrobuseu je nutné detailně dořešit a popsat, např. u českého výrobce Wikov. Případně, pokud by byl zvolen jiný motor s nižšími maximálními otáčkami, tím by klesl převodový poměr a bylo by zřejmě možné použít jednostupňovou převodovku.

Důležitou vlastností převodovky v případě plně odpruženého pohonu dutou hřídelí je také nasazení velkého ozubeného kola na dutou hřídel, jak je patrné z Obr. 27 na str. 44.

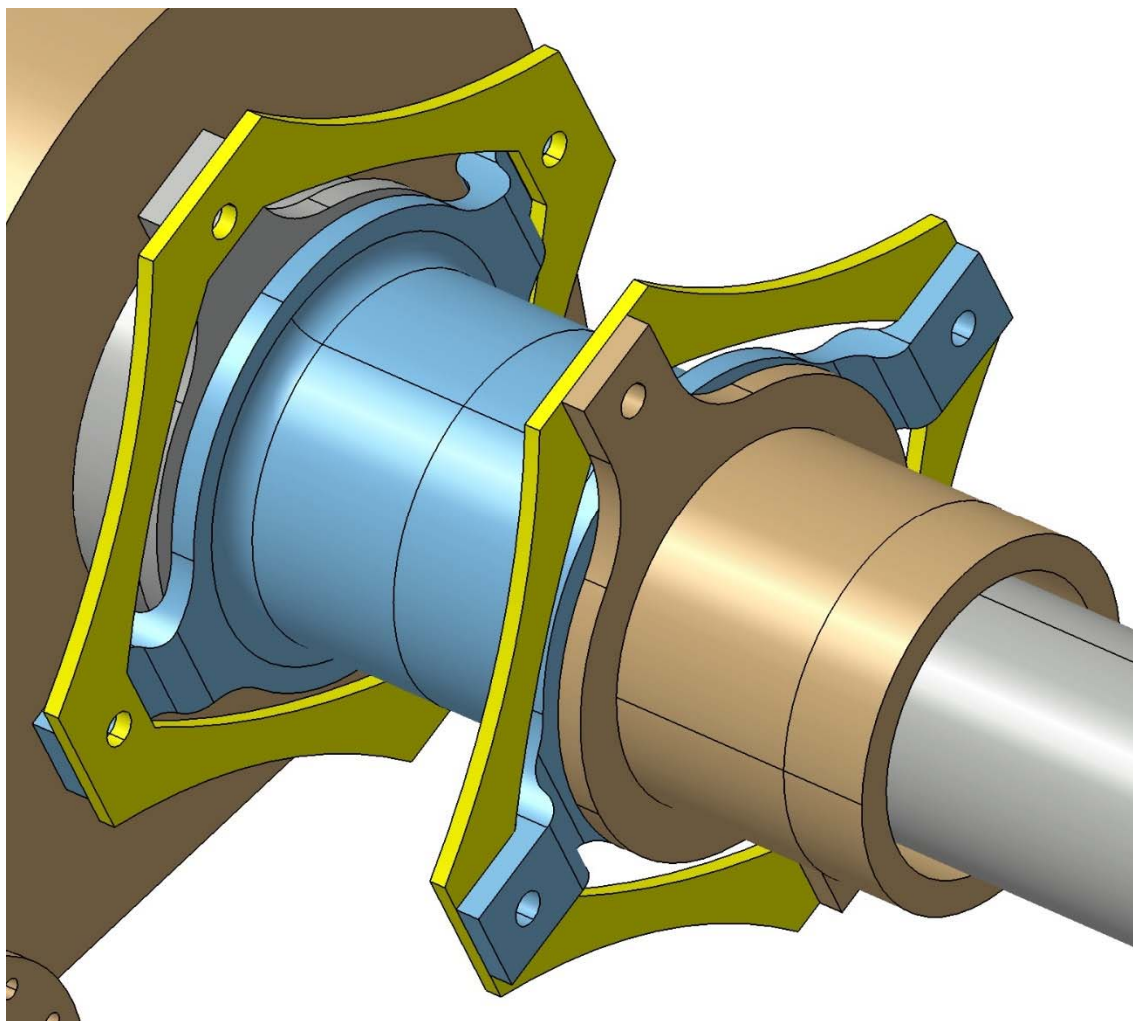
7.4. Dutá kloubová hřídel

Aby bylo zajištěno úplné odpružení pohonu v souladu s volbou pohonu, je nezbytnou součástí pohonu dutá hřídel. Opět se jedná o přibližný návrh patrný dále z výkresu zástavby pohonu v Příloze 2 a také viz Obr. 33. Dutá hřídel by měla tvar válcové trubky, oproti řešení používanému v lokomotivách, viz Obr. 27 na str. 44, pozice 7.

Jednou z nevýhod použití duté hřídele je vysoká výrobní cena přesně vyrobené duté hřídele. Předpokládám však, že by použití válcového tvaru duté hřídele místo kuželového mohlo snížit výrobní náklady.

Spojení duté kloubové hřídele s velkým ozubeným kolem převodovky na jedné straně, a spojení s nápravou dvojkolí na druhé straně (klouby duté hřídele), předpokládám s lamelovými spojkami, viz Obr. 33.

Samotná hřídel je světle modrá, lamely spojky jsou žluté. Vlevo na obrázku je patrná skříň převodovky a velké ozubené kolo převodovky, připojené na první lamelu. Vpravo je dutá hřídel spojena s unašečem přes druhou lamelu.



Obr. 33 – Návrh duté kloubové hřídele

7.5. Baterie

Jedny z nejlepších dostupných baterií na trhu jsou baterie Kokam. Použiju bateriové moduly typu 114E, viz Příloha 4 a Obr. 34. [55]



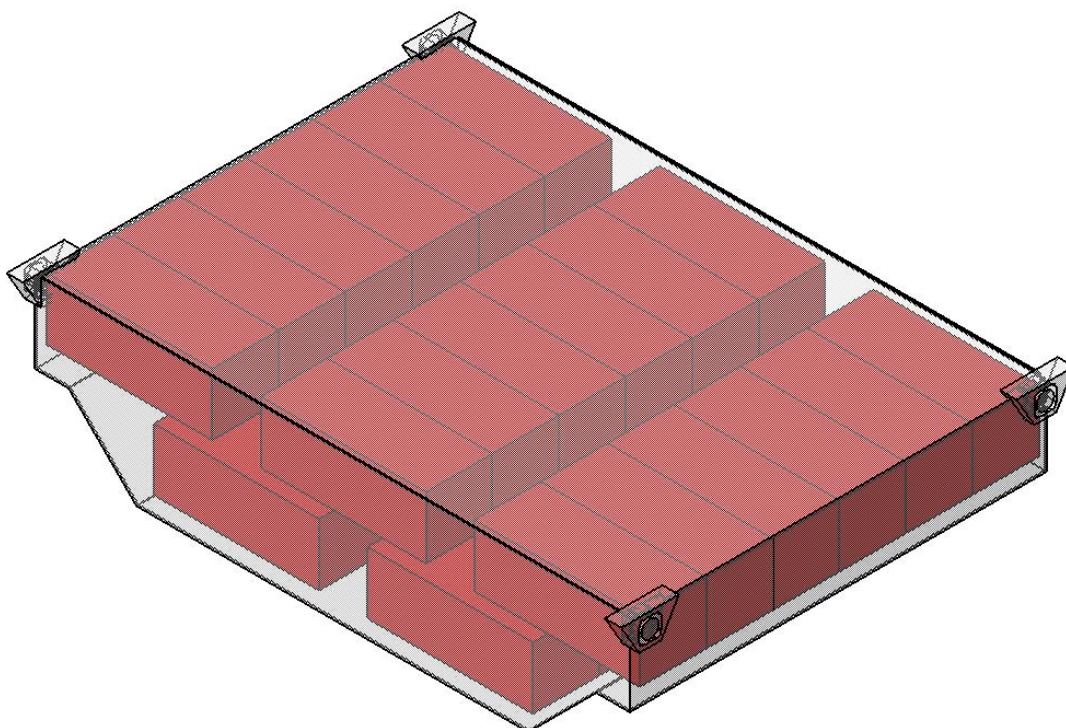
Single Unit

Scalable Modular Design

Obr. 34 – Zvolené baterie Kokam 114E [55]

Bateriové moduly budou spojeny tak, aby vytvářely stejnosměrné napětí 750 V na vstupu střídače, vzhledem k použitým motorům. Proto bude použito celkem šest paralelních větví, každá tvořená osmi moduly. Celková kapacita 48 bateriových modulů v kolejovém elektrobusu bude činit 547,2 kWh. Zvolené baterie tvoří nikl-mangano-kobaltové články (NMC), tedy v současnosti nejvhodnější typ baterií pro trakční účely.¹

Umístění bateriových modulů je naznačeno v 3D modelu v Příloze 5, nebo zde na Obr. 35.



Obr. 35 – Navržený kontejner s použitými bateriovými moduly Kokam

¹ Viz kapitola 2. Rešerše řešení bateriového pohonu u silničních a kolejových elektrobusů, podkapitola 2.4. Trendy vývoje bateriových pohonů na str. 22.

Bude tedy použito celkem 24 modulů na každé straně. Umístění bateriových modulů uvažuji v bateriovém kontejneru. Ten by měl vyhovovat zmiňované normě ČSN EN 12 663.¹

7.6. Trakční měnič

V případě volby trakčního měniče jsem se inspiroval diplomovou prací Pavla Hříbala [13] a jako vzor pro návrh bych volil trakční jednotku tramvaje Škoda 15T. Bylo by však nutné provést návrh trakčního měniče přímo pro použití v kolejovém elektrobuse.

V trakční jednotce se nacházejí trakční měniče, pulzní měnič elektrodynamické brzdy, brzdový odporník a chlazení trakčních motorů. V případě kolejového elektrobuse má zvolený motor vlastní chlazení, nicméně vodní chlazení by mohlo být využito pro zvolené baterie.

Trakční jednotku by bylo potřeba pro použitý motor navrhnout na 750 V stejnosměrného napětí na vstupu střídače, jak je patrné z katalogu výrobce motoru v Příloze 3.

Umístění trakční jednotky předpokládám na střeše, v místech nad nízkopodlažní částí kolejového elektrobuse. Upevnění na střeše by mělo také vyhovovat zmiňované normě ČSN EN 12 663.

7.7. Podvozek

Přestože bylo hlavním tématem této diplomové práce řešení pohonu kolejového elektrobuse, pro úplnost uvedu krátký komentář ke koncepčnímu řešení celého podvozku. Další detaily podvozku by bylo vhodné dořešit v další diplomové práci.

Koncepce podvozku s pohonem je na výkrese v Příloze 2. Části pohonu byly popsány v této kapitole 7. Popis brzdy a vypružení následuje.

Jako mechanickou brzdu jsem zvolil kotoučovou brzdu s brzdovými kotouči na disku kol, celkem se dvěma brzdovými jednotkami, z důvodu vhodného rozložení hmotnosti v podvozku a prostoru pro pohon.

Koncepční návrh vypružení jsem volil s použitím ocelových šroubovitých vinutých pružin v prvním stupni vypružení a vzduchovými pružinami v druhém stupni vypružení. Vzduchové pružiny jsou voleny dle vzoru zmíněné jednotky Litra SA, ze které podvozek koncepčně vychází. Vzhledem k vyššímu nápravovému zatížení tohoto podvozku je potřeba volit čtyři vzduchové pružiny. Tento počet pružin bude mít také lepší stabilizační efekt celého podvozku pod skříní vozidla. Tlumiče jsem v modelu podvozku již nevytvářel.

Jako vzor pro natáčení podvozku pod skříní vozidla jsem si vzal z diplomové práce Pavla Vágnera. [12] Systém natáčení by byl tvořen dvěma táhly, spojujícími podvozek se skříní kolejového elektrobuse.

¹ Viz kapitola 3. Technické a legislativní požadavky na kolejové autobusy, podkapitola 3.3. Upevnění komponent na skříní vozidla – ČSN EN 12 663 na str. 25.

8. Závěr

V úvodní kapitole 1 (od str. 8) jsem vysvětlil motivaci pro tvorbu kolejového elektrobuse. Současná vozidla pro regionální tratě zastarávají a je nejvyšší čas začít řešit vývoj nového lehkého kolejového vozidla pro regionální tratě. Inspirací mohou být v dnešní době silniční elektrobusey.

Silničními elektrobusey jsem se zabýval v kapitole 2. (od str. 12). Celá kapitola se týkala rešerše vozidel s bateriovým pohonem a byla zaměřena také na kolejové elektrobusey. Bateriový pohon však není v železniční dopravě příliš rozšířen. Přesto je možné si vzít příklad alespoň ze silničních elektrobuseů, případně trolejbusů. Baterie kolejového elektrobuse by měly mít alespoň dvojnásobnou kapacitu oproti silničním elektrobuseům, lépe však vyšší. Nejvýhodnějším typem bateriových článků pro trakční účely jsou nikl-mangano-kobaltové články (NMC).

Bylo by možné použít dobíjení ve stanicích při stání vozidla. Detailněji by mohla být například rozvinuta myšlenka průběžného dobíjení elektrobuse za jízdy. Také by bylo vhodné analyzovat možnost provozu na střídavé trakční soustavě 25 kV 50 Hz, jako v případě japonské jednotky BEC 819, tedy s využitím transformátoru.

Na kolejové autobusy či elektrobusey budou kladeny různé technické podmínky. Těmi jsem se zabýval v kapitole 3. (od str. 23). Zde bych zdůraznil potřebu úpravy hrubé stavby skříně kolejového autobuse / elektrobuse, který by splňoval požadavky kategorie P-II dle normy ČSN EN 12 663. To by mohlo být předmětem další diplomové práce.

Před návrhem vlastního koncepčního řešení pohonu bylo potřeba stanovit základní parametry kolejového elektrobuse, jeho typový výkres a hmotnostní bilanci. Tím jsem se zabýval v kapitole 4. (od str. 30). Došel jsem k závěru, že ideální by bylo uspořádat sedadla za sebou. Uspořádání sedadel proti sobě je nevyhovující z hlediska komfortu pro cestující. Sedadla bych preferoval uspořádat za sebou tak, že řady na každé straně vozidla jsou proti sobě, jak je patrné z poslední varianty v typovém výkrese v Příloze 1 (poslední varianta dole).

Dalším krokem k vlastnímu návrhu pohonu kolejového elektrobuse byla analýza řešení individuálního pohonu dvojkolí v kapitole 0. (od str. 38). Zde jsem jako nejvýhodnější shledal variantu pohonu plně odpruženého, s kloubovou dutou hřídelí.

Velmi důležitou byla kapitola 6. (od str. 49), týkající se trakčních výpočtů a rekuperace. Z této kapitoly vyplynula důležitá srovnání s předchozími návrhy pohonu kolejového autobuse. Rekuperace by mohla jedním z hlavních důvodů pořízení kolejového elektrobuse pro potenciálního dopravce.

Nevýhoda spočívající v krátkém dojezdu by mohla být řešena průběžným dobíjením z troleje či nabíjením v konečných stanicích, případně průběžně v zastávkách na trati.

Dále bych považoval za vhodné detailněji dořešit problematiku energetické náročnosti pomocných pohonů. U kolejového elektrobuse se nevyskytují pohony nutné pro provoz např. spalovacího motoru. Na druhou stranu jsem však zmiňoval management bateriových systémů (BMS) zajišťující optimální teplotu bateriových článků. Spotřebu elektrické energie na chlazení či ohřívání baterií je dle mého názoru vhodné také dále detailněji dořešit.

V poslední kapitole 7. (od str. 63) jsem se již věnoval vlastnímu koncepčnímu řešení pohonu kolejového elektrobuse. Hlavním výstupem je výkres zástavby pohonu v Příloze 2 a také 3D model pohonu zobrazený v Příloze 5.

Další vývoj pohonu kolejového elektrobuse by mohl spočívat např. v použití jiného motoru, aby mohla být použita pouze jednostupňová převodovka a tím byla zajištěna vyšší účinnost převodu oproti mnou navržené verzi pohonu. Jinou variantou by mohl být plně odpružený přímý pohon bez převodovky. V této diplomové práci jsem se nezabýval detailním řešením celého podvozku, pouze jsem naznačil možný vývoj. Detailní zpracování konstrukce podvozku by mohlo být tématem další diplomové práce.

Přes jisté nevýhody baterií, o kterých jsem se v této diplomové práci zmiňoval, však pevně věřím, že při dostatečné sériovosti výroby bateriových článků se bateriový pohon stane jedním z nejvýhodnějších typů pohonů kolejových vozidel nezávislé trakce oproti konvenčnímu pohonu se spalovacím motorem.

Použité zdroje

- [1] *Svět železnice - (28) - motorové lokomotivy ČKD, od páry k motorům* [online]. b.r. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.postreh.com/phprs/view.php?cisloclanku=2009071501>
- [2] *Internetová diskuse: M120.0 Kolejový autobus H0* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://diskuze.modely.biz/viewtopic.php?f=3&t=9811>
- [3] *Elektrobusesy Škoda Perun v Třinci* [online]. b.r. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2017/2/22/elektrobusesy-koda-perun-v-tinci>
- [4] *Hradec chce jezdit na elektřinu, do nových vozů MHD dá čtvrt miliardy* [online]. b.r. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://hradec.idnes.cz/hradec-kralove-koupi-elektrobusesy-a-bateriove-trolejbusy-pex-/hradec-zpravy.aspx?c=A170220_2307026_hradec-zpravy_the
- [5] *Praha chce dalších 14 elektrobusesů* [online]. b.r. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2017/2/7/praha-chce-dalch-14-elektrobuses>
- [6] *Třinec má největší flotilu elektrobusesů v republice* [online]. b.r. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://ostrava.idnes.cz/trinec-ma-nejvetsi-flotilu-elektrobusesu-v-republice-fhi-/ostrava-zpravy.aspx?c=A170310_2311392_ostrava-zpravy_jog
- [7] *O modernizaci železničních vozidel: Rozhovor s ing. Jiřím Kolářem, Ph.D., náměstkem generálního ředitele ČD pro osobní dopravu* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-05-11].
- [8] *Poslední Regionova opustila Šumperk* [online]. b.r. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/regiony/1129029-posledni-regionova-opustila-sumperk>
- [9] *ČD 810, 809* [online]. b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.vagonweb.cz/fotogalerie/CZ/CD_810.php
- [10] *ČD 814 + 914 Regionova* [online]. b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.vagonweb.cz/fotogalerie/CZ/CD_814,914.php
- [11] ŠÍP, Milan. *Návrh skříně pro nízkopodlažní kolejový autobus*. 2014.
- [12] VÁGNER, Pavel. *Podvozek pro nízkopodlažní kolejový autobus*. 2014.
- [13] HRÍBAL, Pavel. *Hybridní pohon pro nízkopodlažní kolejový autobus*. 2014.
- [14] *Doc. Ing. Josef Kolář, CSc., Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, ČVUT v Praze, konzultace s vedoucím diplomové práce, 2017*. b.r.
- [15] *Produktový list Škoda Perun HE* [online]. b.r. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobuses-skoda-hp-perun/Contents.3/0/A40FEF085B7DAC421E41CA61D6A56F92/resource.pdf>
- [16] *Produktový list Perun HE* [online]. b.r. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobuses>

- skoda-hp-perun/Contents.3/0/A40FEF085B7DAC421E41CA61D6A56F92/resource.pdf
- [17] *Elektrobus Škoda Perun HE* [online]. b.r. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobus-skoda-perun-he/>
- [18] JEŘÁBEK, Jakub. *E-mobilita, elektrobusy, koncepce elektrického pohonu, bateriové systémy a infrastruktura (přednáška)*. Fakulta strojní, ČVUT v Praze, b.r.
- [19] *Produktový list Perun HP* [online]. b.r. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobus-skoda-hp-perun/Contents.3/0/A40FEF085B7DAC421E41CA61D6A56F92/resource.pdf>
- [20] *Projekt ZeEUS v Plzni* [online]. b.r. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-demo-plzen-skoda-perun-hp-flyer.pdf>
- [21] *Produktový list Škoda Perun HP* [online]. b.r. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobus-skoda-hp-perun/Contents.3/0/A40FEF085B7DAC421E41CA61D6A56F92/resource.pdf>
- [22] *Projekt ZeEUS v Plzni* [online]. b.r. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-demo-plzen-skoda-perun-hp-flyer.pdf>
- [23] *SOR Libchavy - Výrobce a prodejce autobusů pro městskou, meziměstskou a turistickou dopravu* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/site/elektrobusy>
- [24] *Městský elektrobus SOR EBN 10,5* [online]. b.r. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/site/elektrobus-sor-ebn-105>
- [25] *Elektrobusy v Ostravě: úspěchy v pravidelném provozu* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/22.php>
- [26] *Elektrobus SOR EBN 11 po roce provozu v Praze* [online]. b.r. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/elektrobus-sor-ebn-11-po-roce-provozu-v-praze-98069>
- [27] NESVEDA, Zdeněk. *Elektrobusy SOR jsou perspektivní řešení pro veřejnou dopravu* [online]. b.r. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/upload/file/%C4%8D%C3%A1nek%20M%C4%9Bstsk%C3%A1%20doprava%205-2012.pdf>
- [28] HONDIUS, Harry. Ein Batteriebus SOR/Cegelec EBN 11 bei den Prager Verkehrsbetrieben DPP. *Stadtverkehr : die Fachzeitschrift für den öffentlichen Personen-Nahverkehr auf Schiene und Strasse*. 2016, **61**(7-82016), 28-31. ISSN 0038-9013.

- [29] *EV-Power - WB-LYP300AHA LiFeYPO₄ (3.2V/300Ah)* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.ev-power.eu/Winston-300Ah-1000Ah/WB-LYP300AHA-LiFeYPO4-3-2V-300Ah.html?listtype=search&searchcnid=735>
- [30] *Elektrobus BYD v Ostravě: výsledné zhodnocení zkušebního provozu* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/145.php>
- [31] *Elektrobus BYD v Ostravě* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/101.php>
- [32] *A New Level of BYD Advanced Technology in New Energy Vehicles: The wheel-hub motor provides BYD ebus with greater efficiency, as well as saving space.* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://bydeurope.com/innovations/technology/index.php#motor>
- [33] *BYD ebus , electric bus - Auto BYD* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.byd.com/la/auto/ebus.html>
- [34] *China starts replacing LiFePO₄ with NMC for EVs* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://pushevs.com/2016/06/10/china-starts-replacing-lifepo4-with-nmc-for-evs/>
- [35] *BYD Fe Battery for HEV/EV* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/250000-274999/251704-in-01-en-BYD_LITHIUM_FE_BLOCK_12V_10_AH_B_BMS.pdf
- [36] MORKUS, Josef. *Hybridní pohony, 8. část (prezentace z přednášek)*. b.r.
- [37] *Solaris Trollino 12* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Solaris_Trollino_12#/media/File:Tr%C3%A5dbuss_Landskrona.JPG
- [38] *Citadis Dualis tram-train* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/citadis-dualis/>
- [39] KOLÁŘ, Josef. *Teorie vozidel, část kolejová vozidla (prezentace z přednášek)*. 2016.
- [40] *Dovolené traťové třídy zatížení* [online]. b.r. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://provoz.szdc.cz/PORTAL/Show.aspx?path=/Data/Mapy/trz.pdf>
- [41] KOLÁŘ, Josef. *Konstrukce kolejových vozidel (prezentace z přednášek)*. 2017.
- [42] KOLÁŘ, Josef. *Příslušenství kolejových vozidel (prezentace z přednášek)*. b.r.
- [43] *Dopravní plán Středočeského kraje 2016 - 2020* [online]. b.r. [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: <https://www.kr-stredocesky.cz/web/doprava/dopravni-plan>
- [44] *Řazení vlaků - Sp 1885* [online]. b.r. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.zelpage.cz/razeni/17/vlaky/cd-1885>
- [45] *Aktualizovaný Plán dopravní obslužnosti Plzeňského kraje na léta 2012 - 2016* [online]. b.r. [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.plzensky->

kraj.cz/cs/clanek/aktualizovany-plan-dopravni-obsluznosti-plzenskeho-kraje-na-leta-2012-2016-0

- [46] *CD SBÍRKA POMŮCEK SŽDC 2017 .zip, III.změna, platné od 11.6.2017* [online]. b.r. [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: http://www.gvd.cz/cz1/CD_SZDC17_zm3.zip
- [47] *Vlaky jako letadla. Vozy s kupé mizí z českých kolejí* [online]. b.r. [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: http://ekonomika.idnes.cz/kupe-mizi-z-ceskych-vagonu-dc9-/eko-doprava.aspx?c=A140726_2085314_eko-doprava_spi
- [48] *Konec nevolnosti ve vlaku proti směru jízdy! Japonci mají řešení* [online]. b.r. [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: http://cestovani.idnes.cz/japonske-vlak-y-a-otocna-sedadla-dmy-/kolem-sveta.aspx?c=A140724_111232_kolem-sveta_tom
- [49] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce: kolejová vozidla*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [50] KOLÁŘ, Josef. *Pohony kolejových vozidel (prezentace z přednášek)*. 2017.
- [51] PETRÁS, Jan. *Přehled elektrických lokomotiv světových výrobců*. 2008.
- [52] Litra SA. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: https://da.wikipedia.org/wiki/Litra_SA
- [53] *Alstom - Motors* [online]. b.r. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/components/motors/>
- [54] *Prof. Ing. Jaroslav Novák CSc., Ústav přístrojové a řídicí techniky, ČVUT v Praze, konzultace, 2017*. b.r.
- [55] *EV Pack Brochure* [online]. b.r. [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: http://kokam.com/data/Kokam_EV_Pack_Brochure_V_1.4.compressed.pdf
- [56] Powerpack (drivetrain). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-06-31]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Powerpack_\(drivetrain\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Powerpack_(drivetrain))

Seznam obrázků

Obr. 1 – Kolejový autobus M 120.0 [2].....	8
Obr. 2 – Elektrobús Perun HE pro Třinec [3].....	9
Obr. 3 – Motorový vůz ČD řady 810 [9]	10
Obr. 4 – Motorová jednotka ČD řady 814 Regionova [10].....	10
Obr. 5 – Koncept moderního vozidla pro regionální trať v ČR [11].....	11
Obr. 6 – Škoda Perun HE [16].....	13
Obr. 7 – Škoda Perun HP [19]	14
Obr. 8 – SOR EBN 10,5 [24].....	15
Obr. 9 – BYD 12M electric bus [31]	16
Obr. 10 – Hnací náprava BYD 12M [32]	17
Obr. 11 – BYD 12M electric bus [31]	17
Obr. 12 – Trolejbus Solaris Trolino 12 ve švédském městě Landskrona [37]	18
Obr. 13 – Alstom Citadis Dualis [38].....	19
Obr. 14 – Hitachi BEC 819 „Dencha“	20
Obr. 15 – Dovolené traťové třídy zatížení [40]	24
Obr. 16 – Dovolené traťové třídy zatížení (vlastní úprava).....	25
Obr. 17 – Ergonomické požadavky dle normy UIC 567, Sedadla uspořádána za sebou [42].....	28
Obr. 18 – Řazení vlaku Sp 1885 [44]	28
Obr. 19 – Typový výkres – výřez	32
Obr. 20 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – druhotně odpružené hmoty ..	35
Obr. 21 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – prvotně odpružené hmoty	36
Obr. 22 – Hmotnostní bilance kolejového elektrobuse – neodpružené hmoty.....	36
Obr. 23 – Podélně orientovaný pohon [49].....	39
Obr. 24 – Návrh power packu Pavla Hříbala [13]	39
Obr. 25 – Škoda 15T – řez přímým odpruženým pohonem dvojkolí [50]	41
Obr. 26 – Příčně orientovaný částečně odpružený pohon [49].....	43
Obr. 27 – Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou kloubovou hřídelí [51] ..	44
Obr. 28 – Elektrická jednotka Litra SA [52]	45
Obr. 29 – Elektrická jednotka Litra SA – podvozek [14].....	46
Obr. 30 – Elektrická jednotka Litra SA – výkres podvozku [14].....	46
Obr. 31 – Účinnost přenosu energie na dvojkolí a na pomocné pohony.....	61
Obr. 32 – Účinnost přenosu brzděné energie do baterie.....	61
Obr. 33 – Návrh duté kloubové hřídele	65
Obr. 34 – Zvolené baterie Kokam 114E [55]	66
Obr. 35 – Navržený kontejner s použitými bateriovými moduly Kokam	66

Seznam grafů

Graf 1 – Porovnání energetické hustoty pro různé typy bateriových článků [18].....	22
Graf 2 – Trakční charakteristika kolejového elektrobusu.....	51
Graf 3 – Trakční charakteristika s odpory	54
Graf 4 – Trakční charakteristika – porovnání variant kolejového autobusu.....	55
Graf 5 – Dráhový tachogram – traťový úsek 3,5 km.....	56
Graf 6 – Vynesení tažné síly do dráhového tachogramu – traťový úsek 3,5 km.....	57
Graf 7 – Časový tachogram – traťový úsek 3,5 km.....	57
Graf 8 – Dráhový tachogram – traťový úsek 2 km.....	58
Graf 9 – Časový tachogram – traťový úsek 2 km.....	58
Graf 10 – Dráhový tachogram – traťový úsek 3,5 km – porovnání variant kolejového autobusu.....	59
Graf 11 – Časový tachogram – traťový úsek 3,5 km – porovnání variant kolejového autobusu.....	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Porovnání parametrů vybraných silničních a kolejových elektrobusů.....	21
Tabulka 2 – Dělení tratí podle zatížení dle vyhlášky UIC 700 [39].....	23
Tabulka 3 – Rozdělení kolejových vozidel do kategorií dle ČSN EN 12 663 [41] [11].....	26
Tabulka 4 – Statické zatížení pro upevnění zařízení na vozidle kategorie P-II.....	26
Tabulka 5 – Provoz na trati č. 184 Domažlice – Planá u Mariánských Lázní [45].....	29
Tabulka 6 – Základní technické údaje kolejového elektrobusu.....	30
Tabulka 7 – Hmotnostní bilance pohonu variant kolejového autobusu.....	34
Tabulka 8 – Indexy tíhy a hmotnosti.....	35
Tabulka 9 – Podélně orientovaný pohon – výhody a nevýhody.....	40
Tabulka 10 – Přímý pohon nábojovými motory – výhody a nevýhody.....	42
Tabulka 11 – Příčně orientovaný částečně odpružený pohon – výhody a nevýhody.....	43
Tabulka 12 – Příčně orientovaný plně odpružený pohon s dutou hřídelí -.....	47
Tabulka 13 – Zhodnocení a výběr optimálního pohonu pro kolejový elektrobus.....	48
Tabulka 14 – Parametry kolejového elektrobusu pro trakční výpočty.....	49
Tabulka 15 – Časový tachogram – porovnání variant kolejového autobusu.....	60
Tabulka 16 – Účinnost rekuperace.....	62
Tabulka 17 – Výpočet převodového poměru pro zvolený pohon.....	64

Seznam použitých veličin a jednotek

a	$[mm]$	rozvor kolejového elektrobusu – pouze v kontextu kapitoly 4. Základní parametry, typový výkres a hmotnostní bilance kolejového elektrobusu
a	$[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení vozidla – mimo kapitolu 4.
a_b	$[m \cdot s^{-2}]$	zábrzdné zpomalení
a_{roz}	$[m \cdot s^{-2}]$	rozjezdové zrychlení
A	$[kN]$	nápravové zatížení
A_1	$[kN]$	nápravové zatížení prvního dvojkolí
A_2	$[kN]$	nápravové zatížení druhého dvojkolí
A_b	$[kWh]$	energie získaná elektrodynamickým brzděním
A_{max}	$[kN]$	maximální nápravové zatížení
A_{PP}	$[kWh]$	energie využitá na pomocné pohony
A_{tr}	$[kWh]$	energie využitá na trakci
B	$[kN]$	zatížení jedné pružiny prvního stupně vypružení
B_{Σ}	$[kN]$	celková síla v pružinách prvního stupně vypružení
c	$[-]$	parametr pro výpočet svislého zatížení od zařízení upevněného na skříni vozidla ve svislém směru dle normy ČSN EN 12 663
C_x	$[-]$	činitel tvaru vozidla
d_{min}	$[mm]$	průměr opotřebovaných kol
F	$[kN]$	odporová síla
F_a	$[kN]$	odpor ze zrychlení
F_{aero}	$[kN]$	aerodynamický odpor vzduchu
F_b	$[kN]$	brzdná síla elektrodynamické brzdy
F_f	$[kN]$	odpor valení
F_L	$[kN]$	odpor v ložiskách
F_{mech}	$[kN]$	odpor mechanismů

F_o	[kN]	vozidlový odpor
F_{p2}	[kN]	zatížení jedné pružiny druhého stupně vypružení
F_r	[kN]	odpor z jízdy obloukem
F_s	[kN]	odpor ze sklonu trati (při jízdě do stoupání)
F_{sr}	[kN]	traťový odpor
F_t	[kN]	tažná síla
$F_{t\text{roz}}$	[kN]	rozjezdová tažná síla se zvoleným motorem
$F_{t\text{rozmax}}$	[kN]	maximální rozjezdová tažná síla
F_{tun}	[kN]	odpor z jízdy v tunelu
g	[$m \cdot s^{-2}$]	tíhové zrychlení
G_0	[kN]	tíha neodpružených hmot
G_1	[kN]	tíha prvotně odpružených hmot
G_2	[kN]	tíha druhotně odpružených hmot
G_j	[kN]	tíha j-tých hmot vozidla (neodpružené, prvotně odpružené, druhotně odpružené)
G_{uz}	[kN]	tíha od cestujících (užitečné zatížení)
h	[m^{-2}]	plošná hustota cestujících
i	[–]	převodový poměr nápravové převodovky
l	[mm]	celková délka vozidla
l_{p1}, l_{p2}	[mm]	délka představku
m	[t]	hmotnost při provozním obsazení
m_{1cest}	[t], [kg]	hmotnost jednoho cestujícího
m_{ad}	[t]	adhezní hmotnost při provozním obsazení
m_{Amax}	[t]	maximální nápravové zatížení
m_j	[t]	hmotnost j-tých hmot vozidla (neodpružené, prvotně odpružené, druhotně odpružené)
m_{pv}	[t]	hmotnost prázdného vozidla

m_{uz}	[t]	hmotnost od tíhy cestujících (užitečné zatížení)
m_z	[t]	hmotnost zařízení upevňovaných na skříň vozidla
M_{roz}	[Nm]	rozjezdový moment zvoleného motoru
n_{max}	[min ⁻¹]	maximální otáčky zvoleného motoru
n_t	[-]	počet dvojkolí kolejového elektrobusu
N_C	[-]	celkový počet cestujících při uvažování stojících
N_{mot}	[-]	počet motorů
N_{se}	[-]	počet sedících cestujících
N_{st}	[-]	počet stojících cestujících
p	[N/kN]	měrný odpor
p_f	[N/kN]	měrný odpor valení
p_L	[N/kN]	měrný odpor v ložiskách
Q	[kN]	kolová síla
s	[‰]	sklon trati
S_{st}	[m ²]	plocha ke stání
S_x	[m ²]	čelní plocha vozidla
v	[km · h ⁻¹]	rychlost jízdy
v_{max}	[km · h ⁻¹]	maximální rychlost kolejového elektrobusu
$\eta_{do\ baterie}$	[%]	účinnost přenosu rekuperované brzděné energie do baterie
$\eta_{na\ dvojkoli}$	[%]	účinnost přenosu energie z baterií na dvojkolí
$\eta_{na\ PP}$	[%]	účinnost přenosu energie z baterií na pomocné pohony
$\eta_{rek\ bat}$	[%]	účinnost rekuperace vztažená na veškerou energii využitou z baterií
$\eta_{rek\ trak}$	[%]	účinnost rekuperace vztažená na energii využitou k trakci
ρ	[kg · m ⁻³]	hustota vzduchu
ξ	[-]	součinitel rotačních hmot

μ_b	[-]	součinitel adheze při brzdění
μ_t	[-]	součinitel adheze při rozjezdu (trakci)

Přílohy

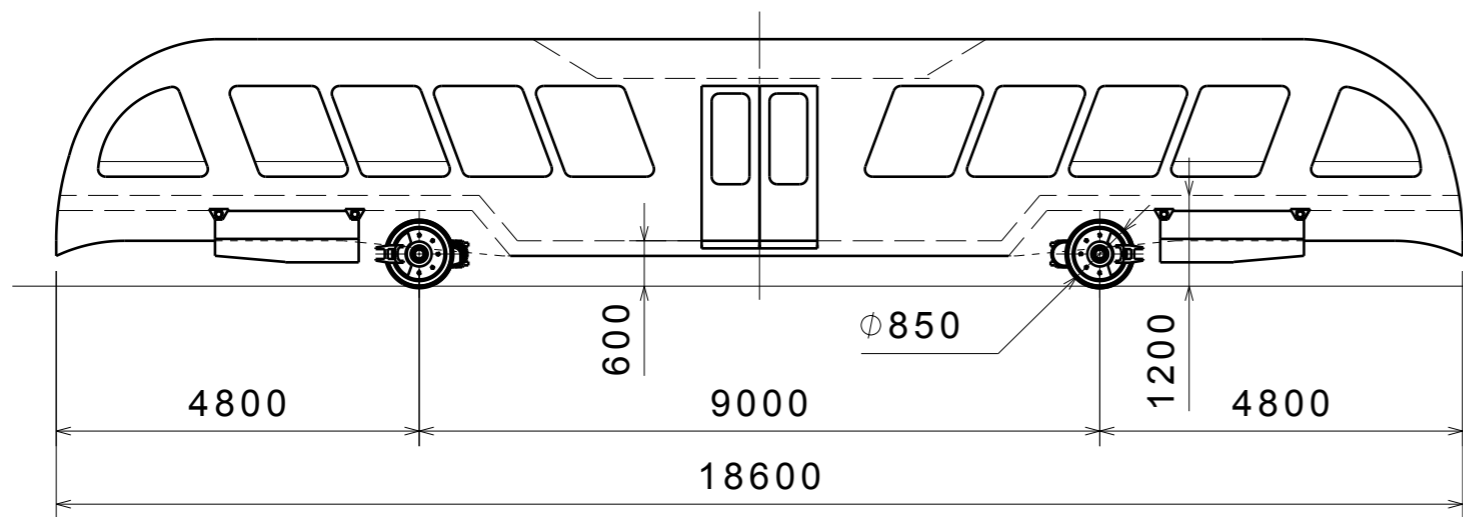
Příloha 1 – Typový výkres

Příloha 2 – Výkres pohonu

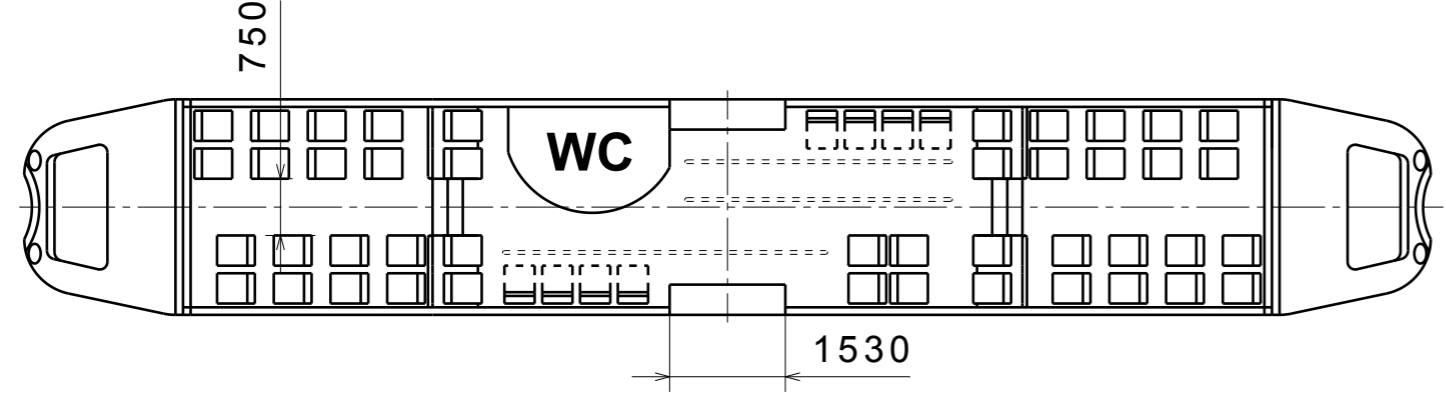
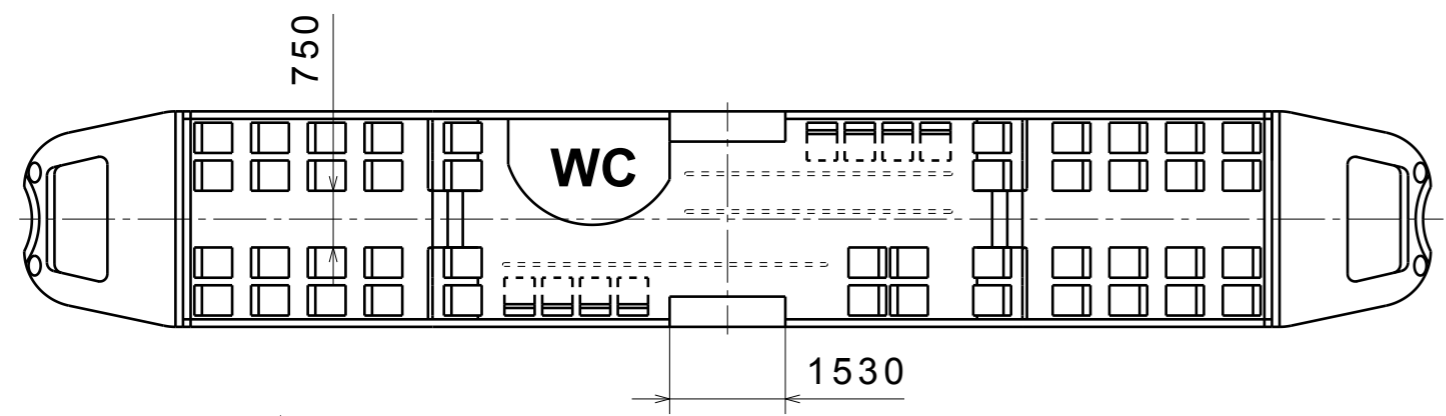
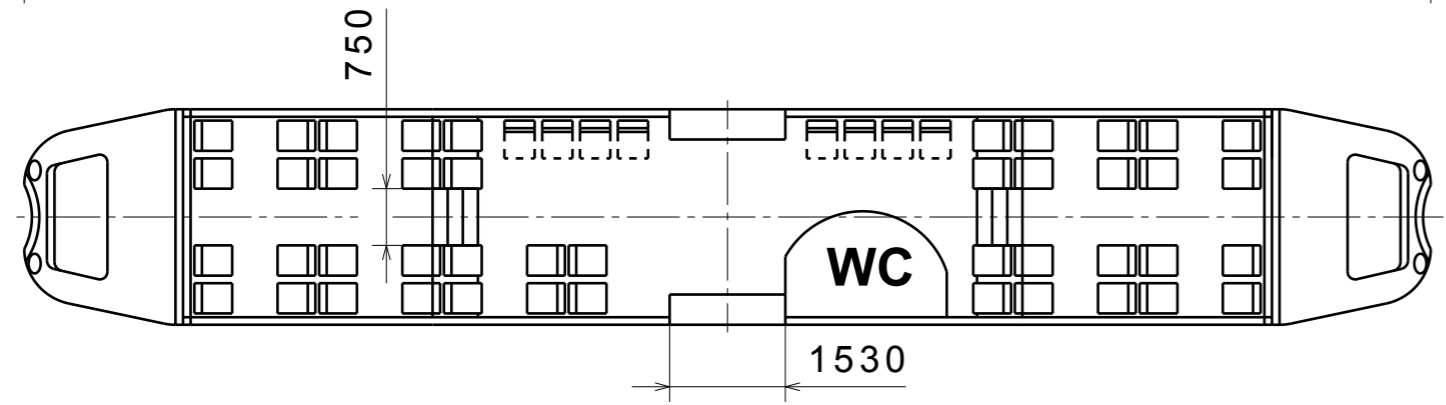
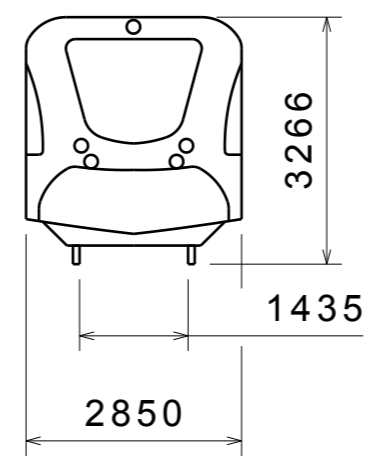
Příloha 3 – Použitý trakční motor

Příloha 4 – Použité baterie

Příloha 5 – Pohledy na 3D model navrženého pohonu

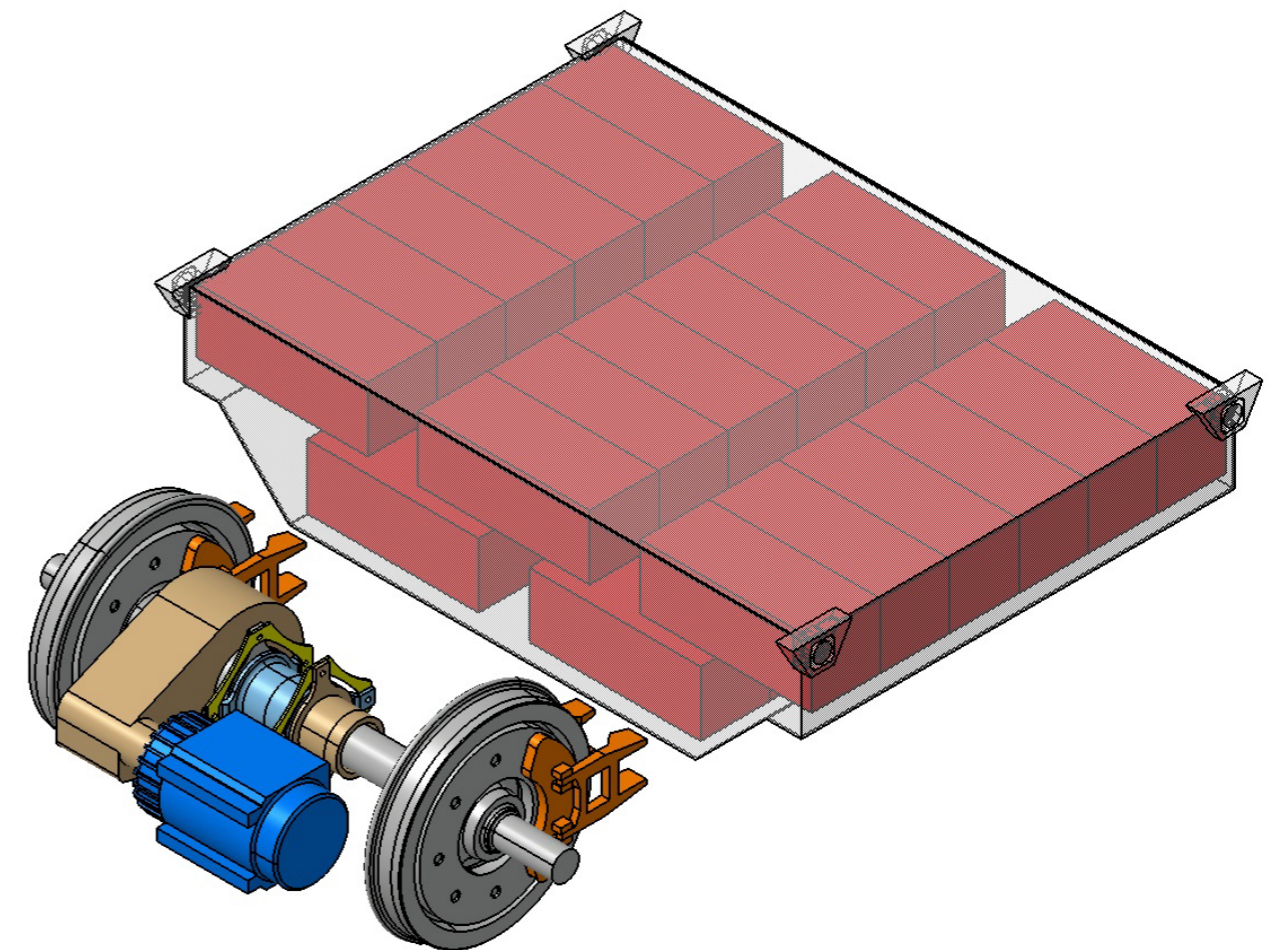
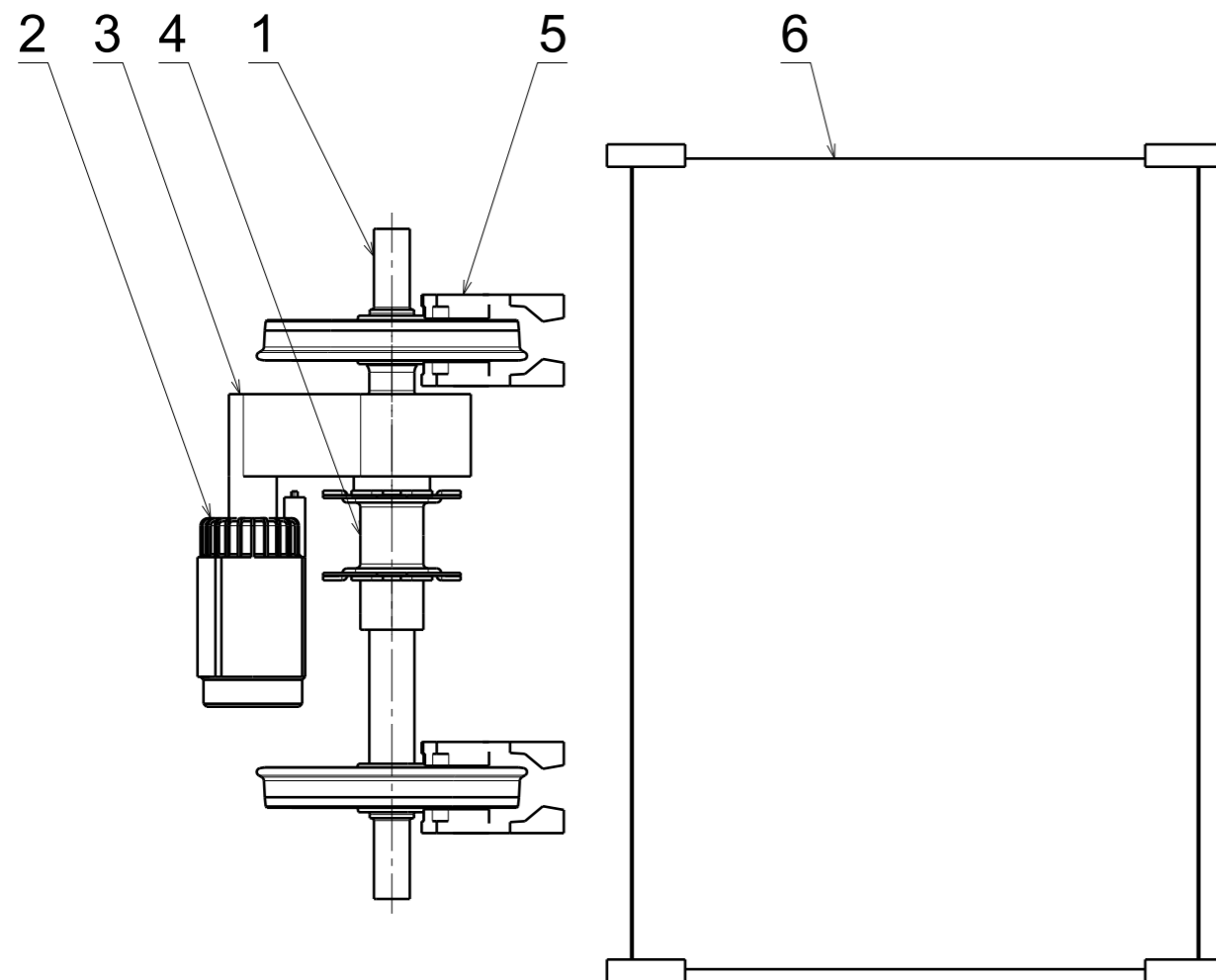
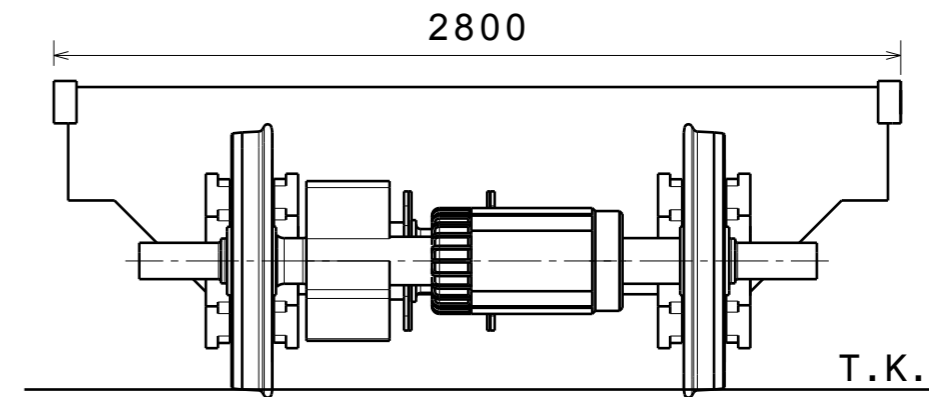
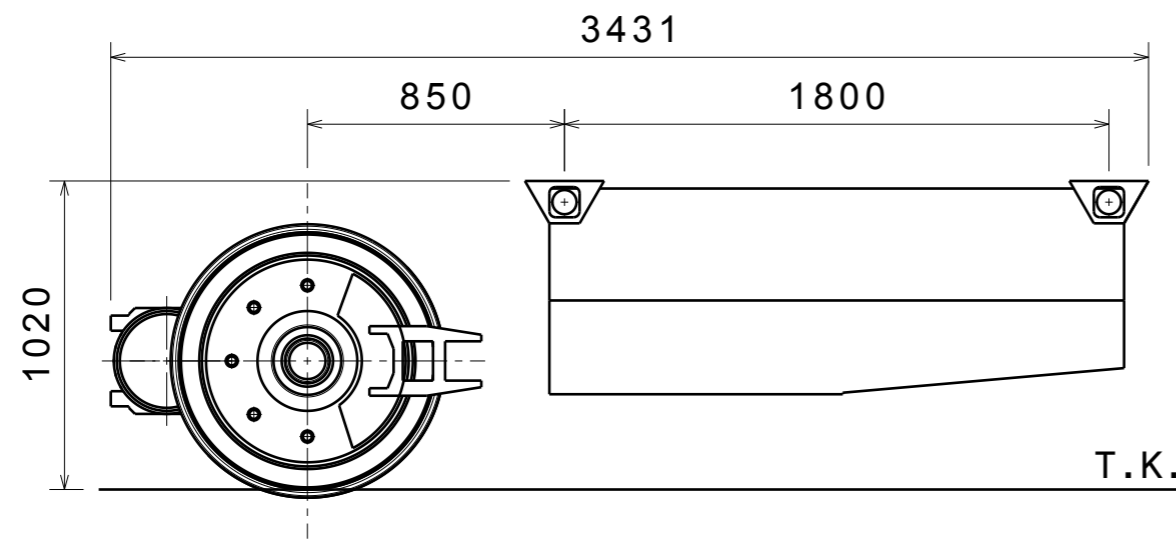


T.K.



NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	kg	MERITKO	1 : 100
KRESLIL	JAN MOJZIS	12. 07. 2017	NORM. REF.			MIKROFILM		C. SVITKU	
SKUPINAR			PREZK.			SESTAVA SESTAVA		KUSOVNIK KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVALIL			STARÝ V.			

CESKÉ VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV KOLEJOVY ELEKTROBUS
	TYP: DP-2017-JM-01



NAVRHL	Podpis	Datum	STATIK	Podpis	Datum	HMOTNOST	kg	MERITKO	1 : 25
KRESLIL	JAN MOJZIS	12. 07. 2017	NORM. REF.			MIKROFILM		C. SVITKU	
SKUPINAR			PREZK.			SESTAVA SESTAVA		KUSOVNIK KUSOVNIK	
TECHNOL.			SCHVALIL			STARÝ V.			

ČESKÉ VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

NÁZEV TYP:
POHON KOLEJOVEHO ELEKTROBUSU

ČÍSLO VÝKRESU

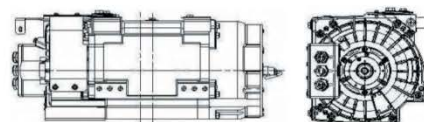
DP-2017-JM-02

LIST:1

Příloha 3 – Použitý trakční motor

MOTOR CATALOGUE **6 LMS 1052**

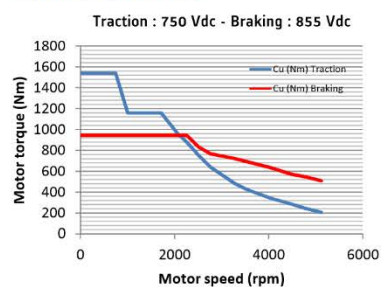
6 LMS 1052



MAIN FEATURES

- power density increased by 80% compared to asynchronous motor
- 25% more compact than asynchronous motor
- enables energy savings
- 400 motors operated on Ixège bogie on Istanbul and Aubagne Citadis tramways, as well as on Lyon and Nantes Citadis Dualis tram-trains, with speed ranging from 70 to 100 kph

TRACTION MOTOR CHART



MAIN MOTOR CHARACTERISTICS

Traction motor type designation	6 LMS 1052
Technology	PMM
Power rating	150 kW @ 2,600 rpm
Continuous torque	550 N.m
Mechanical transmission	Coupling
Cooling system	Self-ventilated
Closed/Open	Closed
Outline: width x height x length (mm)	350 x 350 x 720
Weight (kg)	330

Příloha 4 – Použité baterie

Electrifying Transport

Kokam Battery System is designed for use in commercial truck, bus, tram, and heavy duty transportation. The system can be integrated in parallel and in series to create very high energy and high voltage systems. Furthermore, the "Variable Bulkhead" allows Kokam to customize the packs' electrical and cooling interfaces without having to retool the entire systems.

Superior Lithium Ion Battery

- Exceptionally high power performance
- Extremely safe and wide range of operating temperature

Compact and High Reliability Battery Packs

- Exceptionally efficient direct liquid cooling
- Ease of installation
- Customizable solution
- IP67 Compliant

State-of-the-Art Battery Management Systems

- ISO-26262 compatible RTOS
- Highly configurable for any chemistry
- 12V and 24V compatible
- Designed for system voltages up to 1250V

Complete System Design and Component Selection

- Battery disconnect unit, System controller, Master controller
- Controls up to 300 cells in series; 24 strings in parallel

Extensive R&D, Engineering, and Test & Validation Resources

Kokam Modular Pack

For High Performance E-Mobility

Customizable Design



Single Unit



Scalable Modular Design

Features

- Variable bulkhead design
- Advanced liquid cooling system
- New Kokam BMS, BDU and MCU
- A function to prevent spreading a fire out of the pack in case of internal fire
- Advanced ultrasonic welding of cell tabs to busbars
- Extremely durable and safe under the toughest conditions
- Available with high energy or high power cells
- All external connections at front panel
- Low and stable impedance



	71P 7.1 kWh	114E 11.4 kWh
Cell Configuration	40NMC-2P24S	65NMC-2P24S
Specific Energy (Wh/kg)	≥202	≥152
Energy Density (Wh/L)	≥116	≥186
Capacity (Ah; Rated at C/2)	80	130
Voltage (Nominal; V)	88.8	87.8
Mass (kg)	77	75
Dimensions (L x W x H)	753mm x 303mm x 282mm	

Available 1Q 2017

Available 3Q 2017

Příloha 5 – – Pohledy na 3D model navrženého pohonu

