

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Simulační porovnání energetické náročnosti
elektrické a hybridní jednotky**

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal Lokvenc**
Osobní číslo: **D18168**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Kolejová vozidla**
Téma práce: **Simulační porovnání energetické náročnosti elektrické a hybridní jednotky**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

Dekarbonizace mobility je i na železnici aktuálním tématem. Jedním z řešení, která umožňují náhradu motorových vozů a jednotek, poháněných spalovacími motory, je provoz hybridních vozidel. Hybridní jednotky jsou vhodné zejména pro nasazení na vozebních ramenech, která jsou elektrifikovaná pouze v části své délky. Oproti čistě elektrické jednotce však hybridní jednotka vykazuje vyšší hmotnost, což se nutně projeví ve vyšší energetické náročnosti. Cílem této práce je proto porovnání energetické náročnosti provozu elektrické a hybridní jednotky na vybrané trati.

Vypracujte:

1. rešerši v současné době používaných hybridních jednotek pro regionální dopravu;
2. výběr traťového úseku pro realizaci porovnávacích trakčních výpočtů a jeho popis;
3. výběr hybridní jednotky a adekvátní čistě elektrické jednotky pro realizaci výpočtů;
4. trakční výpočty obou jednotek na vybrané trati;
5. zhodnocení výsledků provedených výpočtů.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] MICHÁLEK, T., ZELENKA, J.: *Trakční mechanika*. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [2] MICHÁLEK, T., ŠLAPÁK, J.: Vliv elektrifikace trati Klatovy-Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie. In: *Vědeckotechnický sborník ČD č. 42/2016*. Praha: GŘ ČD, 2016. 17 s. ISSN 1214-9047.
- [3] POHL, J.: Elektrická osobní železniční doprava na tratích bez liniové elektrizace. In: *Vědeckotechnický sborník Správy železnic č. 3/2020*. Praha: Správa železnic, s.o., 2020. 26 s. ISSN 2694-9172.
- [4] Tabulky traťových poměrů vybraných traťových úseků.
- [5] Firemní prospekty výrobců hybridních jednotek.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. února 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2021**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Prohlašuji:

Práci s názvem Simulační porovnání energetické náročnosti elektrické a hybridní jednotky jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Michal Lokvenc

PODĚKOVÁNÍ

Největší poděkování patří mému vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D. za jeho metodické a odborné vedení, mnoho cenných rad, připomínek a doporučení, které mi pomohly při tvorbě této práce. Také za nemálo času, který mi přitom věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům za jejich rady a pomoc nejen při tvorbě bakalářské práce.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během celé doby studia a své přítelkyni za její ochotu, podporu a pomoc při kontrole.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá porovnáním energetické náročnosti hybridní a elektrické jednotky. Práce obsahuje popis funkce hybridních jednotek a dále příklady jednotlivých, v současnosti vyráběných nebo vyvíjených typů s uvedením dostupných technických parametrů. Je zvolen vhodný traťový úsek a k tomu odpovídající jednotky pro simulační výpočet včetně stanovení jejich parametrů. Dále je zvoleno řešení pohybové rovnice vlaku pomocí numerické metody. Jsou vypočteny hodnoty spotřeby trakčních energií a jízdních dob. Pomocí vypočtených rozdílů spotřeb trakční energie mezi jednotlivými jednotkami je posuzována vhodnost použití bateriových jednotek pro daný úsek v porovnání s případnou elektrifikací dosud neelektrizovaného úseku trati.

KLÍČOVÁ SLOVA

hybridní jednotky, spotřeba energie, akumulátory, trakční mechanika, elektrifikace

TITLE

Comparison of energy consumption of electric and hybrid multiple unit by means of simulations.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a comparison of energy consumption of a hybrid and electric multiple unit. The thesis contains a description of the function of hybrid units and examples of currently produced or development types with their technical parameters. A suitable section of railway line and corresponding multiple units (including determination of their parameters) are chosen for simulations. A numerical method is used for solution of equation of motion of the train. Values of traction energy consumption and travel times are calculated in this way. Using the calculated differences of traction energy consumption for the individual considered multiple units, a suitability of the battery trains is compared for the given railway line in comparison with a possible electrification of the currently non-electrified track section.

KEYWORDS

hybrid units, energy consumption, batteries, traction mechanics, electrification

OBSAH

1	Úvod	13
2	Hybridní jednotky.....	14
2.1	Negativní dopady spalování fosilních paliv.....	14
2.2	Princip a rozdělení.....	14
2.3	Elektro-dieselové jednotky	15
2.3.1	Stadler Flirt bimodal multiple unit.....	16
2.3.2	Bombardier BGC	16
2.3.3	Newag Class 36WEh Impuls.....	18
2.3.4	Alstom Coradia Régiolis.....	18
2.4	Vodíkové palivočlánkové jednotky	19
2.4.1	Princip	19
2.4.2	Alstom Coradia iLint.....	21
2.4.3	Siemens Mireo Plus H	22
2.5	Elektro-akumulátorové jednotky	22
2.5.1	Historie	22
2.5.2	Princip	22
2.5.3	Akumulátorové nároky	24
2.5.4	Siemens Desiro ML Eco	25
2.5.5	Siemens Mireo Plus B.....	26
2.5.6	Stadler Flirt Akku.....	26
2.5.7	Stadler Flirt trimodal multiple unit.....	28
2.5.8	Bombardier Talent 3 hybrid	28
2.6	Přehled.....	29
3	Traťový úsek a jednotky pro trakční výpočty	30
3.1	Výběr traťového úseku	30
3.1.1	Historie a současnost.....	30
3.1.2	Popis vybraného úseku	31
3.2	Výběr jednotek pro trakční výpočty.....	32
3.2.1	Popis elektrické jednotky 7Ev (řada 640).....	32
3.2.2	Popis hybridních jednotek.....	34
4	Stanovení vstupních dat pro trakční výpočty	35
4.1	Sestrojení trakční charakteristiky.....	35
4.1.1	Maximální využitelná tažná síla na obvodu kol na mezi adheze.....	35

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

4.1.2	Maximální tažná síla na obvodu kol.....	35
4.1.3	Maximální výkon.....	36
4.1.4	Porovnání parametrů trakčního motoru	37
4.1.5	Porovnání trakčních charakteristik jednotlivých vozidel.....	40
4.2	Výpočet součinitele rotačních hmot.....	40
4.3	Elektrodynamická brzda	41
4.4	Shrnutí údajů potřebných k výpočtu.....	41
5	Trakční výpočty obou jednotek	43
5.1	Pohybová rovnice vlaku	44
5.2	Jízdní odpory	44
5.2.1	Vozidlové odpory.....	44
5.2.2	Traťové odpory	45
5.2.3	Jízda vlaku tunelem.....	46
5.3	Zrychlování vlaku.....	47
5.4	Jízda vlaku konstantní rychlostí.....	47
5.5	Jízda vlaku výběhem	48
5.6	Zpomalování vlaku	48
5.7	Jízdní doba a spotřeba trakční energie.....	48
5.8	Rekuperovaná energie	49
5.9	Výpočet jednotlivých účinností	50
6	Zhodnocení výsledků provedených výpočtů.....	52
6.1	Přehled spotřeby trakční energie.....	52
6.1.1	Měrná spotřeba trakční energie	55
6.2	Jízdní doba.....	55
6.3	Tachogramy a průběh výkonu	61
6.4	Ekvivalentní vzdálenost	66
6.5	Rozbor průběhu energie v akumulátorech.....	67
6.5.1	Doplnění energie do akumulátorů.....	67
6.6	Náklady na trakční energii	69
6.6.1	Porovnání s elektrifikací daného úseku	71
7	Závěr	73
	Literatura.....	74

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

Seznam zkratek

AC	Alternating current – střídavý proud, střídavé napájení vozidla
AGC	Autorail à Grande Capacité – vysokokapacitní vozidla od firmy Bombardier pro francouzského dopravce SCNF
B. R.	Akumulátorový režim vozidla – vůz je napájen z akumulátorů
BaWü	Bádensko-Württembersko – spolková země Německa
BEMU	Battery Electric Multiple Unit – elektro-akumulátorová jednotka
BGC	Typ jednotky AGC
ČSD	Československé státní dráhy
DC	Direct current – stejnosměrný proud, stejnosměrné napájení vozidla
E. R.	Elektrický režim vozidla – vůz je napájen z trolejového vedení
ED R.	Elektro-dieselový režim vozidla – vůz je napájen ze spalovacího motoru
EDB	Elektrodynamická brzda
EDMU	Electro Diesel Multiple Unit – elektro-dieselová jednotka
FCMU	Fuel Cell Multiple Unit – palivočlánková jednotka
HE	High Energy – typ akumulátoru
HMU	Hydrogen Multiple Unit – jednotka využívající vodík
HP	High Power – typ akumulátoru
JŘ	Jízdní řád
KFNB	k.k. privilegierte Kaiser Ferdinands-Nordbahn – Severní dráha císaře Ferdinanda
LTO	Lithium Titanát Oxid
ML	Mainline – rodina elektrických jednotek Siemens Desiro
N130	Traťová rychlost pro nedostatek převýšení 130 mm
Ni-Fe	Nikl železo
NMC	Lithium nikl mangan kobalt
NStB	k.k. Nördliche Staatsbahn – Severní státní dráha
Os	Osobní vlak
SCNF	Société nationale des chemins de fer français – národní železniční dopravce ve Francii
SFBW	Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg – Státní úřad pro kolejová vozidla v BaWü
Sp	Spěšný vlak
TER	Transport express régional – vlaková doprava provozována společností SCNF po celé Francii
TNS	Trakční napájecí soustava
TTP	Tabulky traťových poměrů 2021 od Správy železnic
WTB	Wire train bus – vlaková komunikační sběrnice

Seznam značek**Latinská písmena**

B	[N]	Brzdná síla
B_{\max}	[N]	Maximální brzdná síla EDB
d	[mm]	Průměr kola
d_i	[mm]	Průměr daného ozubeného kola
e_0	[kWh/km]	Gradient nevratné trakční práce
E_A	[kWh]	Energie potřebná k obnovení do akumulátorů
E_B	[kWh]	Celková rekuperovaná energie
E_C	[kWh]	Celková spotřebovaná energie po odečtení rekuperované energie
E_F	[kWh]	Celková spotřebovaná trakční energie
E_k	[J]	Kinetická energie vlaku
$E_{k,\text{pos}}$	[J]	Kinetická energie posuvného pohybu
$E_{k,\text{rot}}$	[J]	Kinetická energie rotačního pohybu
F_{adh}	[kN]	Maximální adhezní tažná síla na obvodu kol
F_k	[N]	Síla působící na ozubené kolo nápravy
F_{ok}	[N]	Tažná síla na obvodu kol celého vlaku
F_{ok1}	[N]	Tažná síla na obvodu kol jednoho dvojkolí
F_{TM}	[N]	Reakce na sílu působící na ozubené kolo nápravy
F_x	[N]	Síla působící ve směru osy x
$F_{\Delta l}$	[N]	Skutečná tažná síla na jeden krok Δl
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$
i	[1]	Převodový poměr ozubených kol
I_A	[A]	Odběrový proud z TNS pro nabíjení akumulátorů
J_d	[kg·mm ²]	Kvadratický moment setrvačnosti dvojkolí a rotoru trakčního motoru k ose rotace dvojkolí
J_i	[kg·mm ²]	Kvadratický moment setrvačnosti
L_{ekv}	[km]	Ekvivalentní vzdálenost
l_i	[m]	Délka určitého úseku tratě
l_{vl}	[m]	Délka vlaku přes spřáhla
m	[kg]	Hmotnost
M_{adh}	[t]	Adhezní hmotnost vlaku
m_{be}	[kg]	Hmotnost akumulátorové jednotky BEMU
m_{ej}	[kg]	Hmotnost elektrické jednotky
M_j	[t/m]	Hmotnost soupravy na jednotku délky 1 m
M_L	[t]	Provozní hmotnost vlaku
m_o	[mm]	Modul ozubeného kola
M_P	[t]	Hmotnost prázdného vlaku
M_{TM}	[(k)N·m]	Kroutící moment trakčního motoru

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

m_v	[kg]	Hmotnost vozidla
m_{vl}	[kg]	Hmotnost vlaku
M_{vl}	[t]	Hmotnost vlaku
N_{cest}	[1]	Počet míst k sezení
N_d	[1]	Počet dvojkolí dané jednotky
n_{vl}	[1]	Počet úseků obsazených vlakem
O_j	[N]	Jízdní odpor vlaku
o_R	[N/kN]	Měrný odpor z oblouku koleje
o_s	[N/kN]	Měrný odpor ze sklonu koleje
o_t	[N/kN]	Měrný traťový odpor
O_T	[N]	Traťový odpor vlaku
o_v	[N/kN]	Měrný vozidlový odpor
O_V	[N]	Vozidlový odpor vlaku
P	[W]	Výkon celého vlaku
P_A	[kW]	Nabíjecí výkon akumulátorů
P_{trv}	[kW]	Trvalý výkon
r_d	[m]	Poloměr kol dvojkolí
r_k	[m]	Poloměr ozubeného kola nápravy
r_{TM}	[m]	Poloměr ozubeného kola trakčního motoru
S_n	[‰]	Náhradní sklon
$S_{n,i}$	[‰]	Náhradní sklon na určitém úseku
S_{red}	[‰]	Redukovaný sklon
t_c	[s]	Celková jízdní doba
t_n	[h]	Doba doplnění energie do akumulátorů
U_A	[kV]	Napětí TNS
V	[km/h]	Rychlost
v	[m/s]	Rychlost
v_i	[m/s]	Rychlost na začátku aktuálního úseku
v_{i+1}	[m/s]	Rychlost na začátku následujícího úseku
V_{max}	[km/h]	Maximální rychlost
V_R	[km/h]	Mezní rychlost EDB (5 km/h)
$V_{\Delta l}$	[km/h]	Rychlost na začátku posledního kroku před zastavením
$W_{\Delta l}$	[kWh]	Energie v posledním kroku rekuperace před zastavením při B_{max}
z_i	[1]	Počet zubů daného ozubeného kola
z_k	[1]	Počet zubů ozubeného kola nápravy
z_{TM}	[1]	Počet zubů ozubeného kola trakčního motoru
Δl	[m]	Integrační krok
Δt_i	[s]	Čas pro překonání daného úseku
ΔW_B	[kWh]	Práce brzděné síly na jeden krok
ΔW_F	[kWh]	Práce tažné síly na jeden krok

Řecká písmena

μ	[1]	Součinitel adheze
\ddot{x}	[m/s ²]	Zrychlení
\ddot{x}_i	[m/s ²]	Zrychlení na daném úseku
ε	[1]	Součinitel využití adheze
η	[1]	Účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou práci
η_B	[1]	Účinnost jednotky BEMU
η_{AP}	[1]	Účinnost akumulátoru a pohonu
η_{TA}	[1]	Účinnost TNS a akumulátoru
η_{TP}	[1]	Účinnost TNS a pohonu
ρ_{be}	[1]	Součinitel rotačních hmot jednotky BEMU
ρ_{ej}	[1]	Součinitel rotačních hmot elektrické jednotky ř. 640
ρ_{vl}	[1]	Součinitel rotačních hmot vlaku
τ	[1]	Tunelový faktor
ω_d	[s ⁻¹]	Úhlová rychlost dvojkolí
ω_i	[s ⁻¹]	Úhlová rychlost

1 Úvod

Železnice je už nerozlučně spojena s naším životem. Dráhu člověk začal využívat už za dávných dob v 1. pol. 19. století. Prvně byla sestrojena dráha na koňské povozy v trase České Budějovice – Linec. Někteří lidé se tenkrát báli, zda dráha neohrozí jejich bydlení či životy a někteří naopak tento krok uvítali.

S rozrůstající technikou byl vynalezen parní stroj. Koňský povoz byl náhle nahrazen modernějším „ořem“. Rychlost a síla byly na prvním místě. Éra páry trvala dlouhá léta, a i dnes patří neodmyslitelně k srdci železnice, i když už její provoz ustal.

Nahrazení parních strojů strojem, který spaluje fosilní paliva přineslo spoustu dnes již známých vymožeností. Jedná se o nezávislou trakci, kde pro pohon již není potřeba koňská síla ani uhlí a voda. Spalováním paliva vzniká tepelná energie, která se přeměňuje na mechanickou práci a dále je využívána pro pohon vozidla. Spalováním fosilních paliv také vznikají nežádoucí účinky, které je nutné redukovat (viz kap 2.1).

K dosažení větší rychlosti na železnici se v dnešní době využívá konvenční metoda elektrizace. Lokomotiva poháněná elektrickou energií je v moderních případech vybavena rekuperačním brzděním, které umožňuje přeměnu kinetické energie na energii elektrickou a určitou část ji vrátit zpět do napájení. Vlivem vyšší účinnosti je elektrický pohon ekologicky šetrnější k životnímu prostředí.

Problém nastává v místech, kde elektrifikace není provedena, ať už z finančních nebo jiných důvodů. Proto se dnes testují nejnovější typy vozidel, které si vozí zásobníky energie s sebou. Jednotky poháněné akumulátory jsou kombinací závislé a nezávislé trakce (polozávislá trakce). Nabíjí se elektrickou energií a umožňují jednotce dojezd i na neelektrifikované trati.

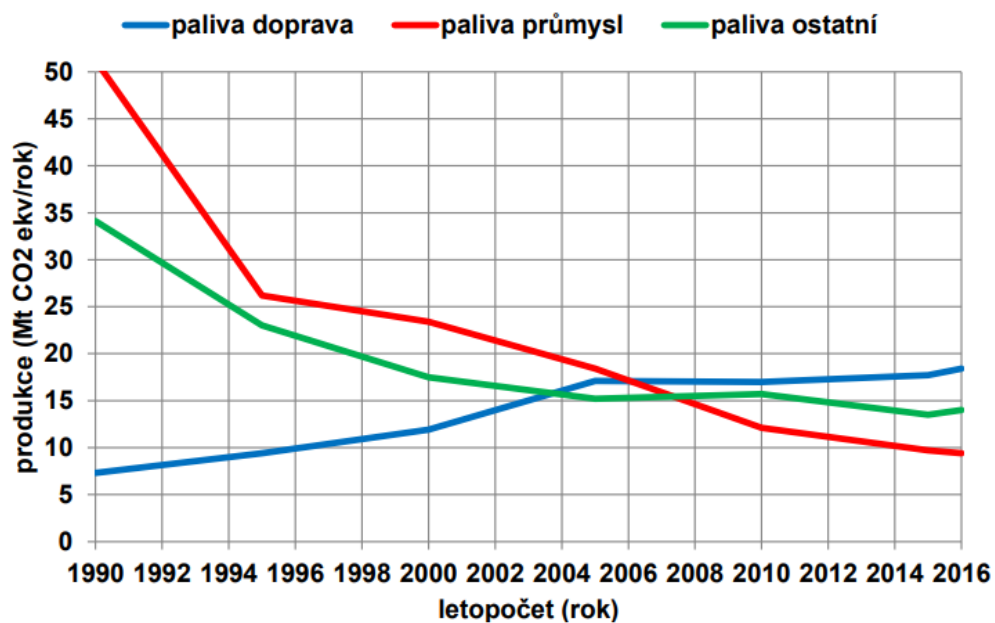
Otázkou zůstává, zda je energeticky výhodnější použít závislou či polozávislou trakci. S použitím závislé trakce zde nastává nutnost elektrifikace daného úseku. U hybridních jednotek se zástavbou baterií roste hmotnost a tím roste energetická a finanční náročnost provozu.

2 Hybridní jednotky

2.1 Negativní dopady spalováním fosilních paliv

Při spalování fosilních paliv vzniká odpad v podobě výfukových plynů, které jsou škodlivé jak pro životní prostředí (ve kterém mají dopad v podobě globálního oteplování), tak i pro lidské zdraví. I přes snahu eliminovat toto nebezpečí, je provoz spalovacích motorů na fosilní paliva ve světě příliš rozsáhlý.

Z obr. 1 můžeme vidět, že v posledních letech se rapidně zvýšila produkce CO₂ v dopravě, zatím co v průmyslu se zdatelně snížila. I přes zpřísňování emisních norem Euro, je kritický růst zejména polyaromatických uhlovodíků, benzo (a) pyrenu a jemných prachových částic, které nejsou těmito normami limitovány [1]. Evropská agentura [2] pro životní prostředí na svém webu uvádí, že v posledním desetiletí můžeme více než 400 000 předčasných úmrtí ročně přičíst právě následkům špatného ovzduší.



Obr. 1 - Produkce oxidu uhličitého v ČR [1]

2.2 Princip a rozdělení

Hybridní jednotkou se rozumí takové vozidlo, které je složené ze dvou nebo více běžně nerozpojitelných vozidel, které pro pohon používají dva nebo více zdrojů energie.

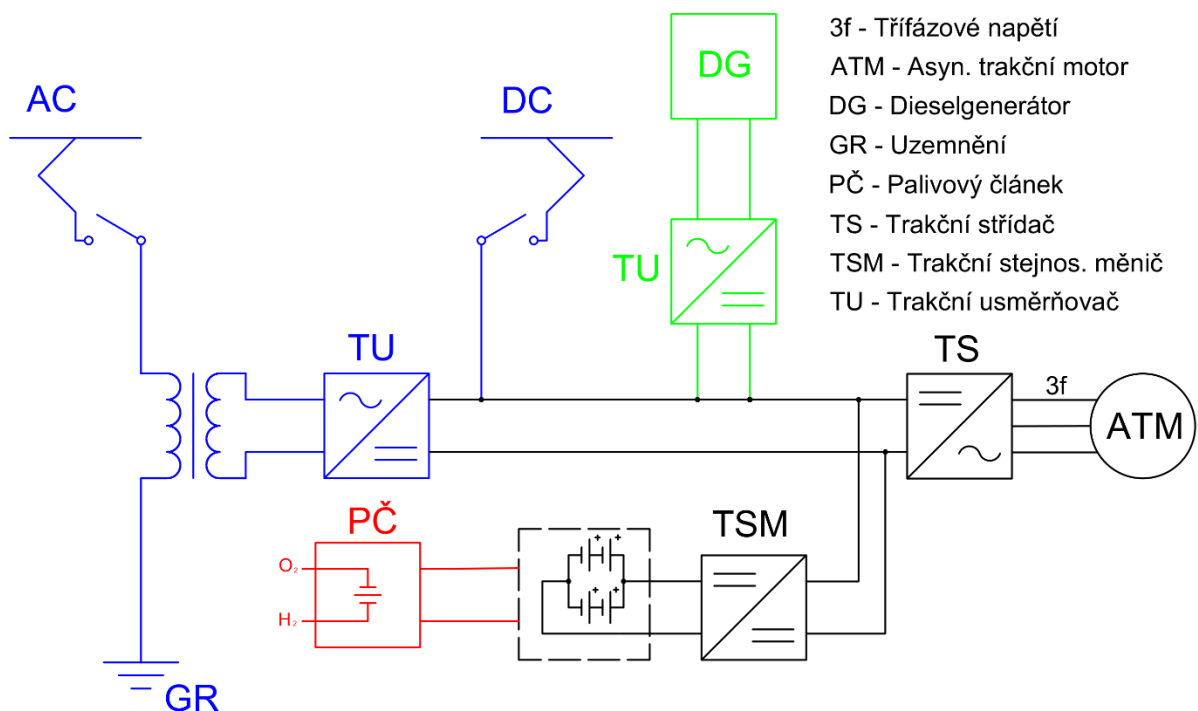
Vozidla obvykle využívají elektrický pohon (dnes asynchronní motory). K napájení se používá buď elektrické liniové napájení, nebo se energie uchovává v zásobnících energie (akumulátor/superkapacitor), nebo se na vozidle přímo vyrábí (dieselgenerátor/palivový článek); takové vozidlo je pak závislé pouze na statických napájecích stanicích.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Principiální schéma na obr. 2 popisuje jednotlivé způsoby napájení trakčního motoru. Podle kombinací barev, ale vždy s černou barvou, je možné uspořádat jednotlivé koncepce. Je zřejmé, že každé vozidlo má vnitřní meziobvod na stejnosměrný proud. Z tohoto meziobvodu jsou napájeny např. pomocné pohony (kompresor, ventilátor atd.) a přes řízený střídač je napájen asynchronní trakční motor.

Hybridní jednotky lze rozdělit podle typu zdrojů [3]:

- Elektro-dieselové (EDMU – zeleně a modře na obr. 2)
- Vodíkové palivočlánkové (HMU, příp. FCMU – červeně na obr. 2)
- Elektro-akumulátorové (BEMU – modře na obr. 2)
- Diesel-akumulátorové (zeleně na obr. 2)



Obr. 2 - Principiální schéma hybridních jednotek

2.3 Elektro-dieselové jednotky

Elektro-dieselové jednotky (EDMU) jsou založeny na principu získávání elektrické energie buď z liniového trolejového vedení, nebo z dieselgenerátoru. Spalovací motor (nejčastěji spalující naftu) pohání alternátor, který vyrábí střídavé napětí. To je následně usměrňováno v trakčním usměrňovači. Dále následuje stejnosměrný mezi obvod, který napájí pomocné pohony a trakční střídač pro pohon asynchronních elektromotorů. Již zmíněný stejnosměrný mezi obvod může být též napájen právě z trolejového vedení, a to buď přímo (v případě stejnosměrné napájecí soustavy), nebo přes transformátor a usměrňovač (v případě střídavé napájecí soustavy).

2.3.1 Stadler Flirt bimodal multiple unit

V květnu 2015 zadala oblast v Itálii (Valle D'Aosta) firmě Stadler zakázku na dodávku pěti EDMU jednotek (obr. 3). První vozidlo bylo uvedeno do provozu na trati Aosta-Turin v květnu 2018. [4]

Technická specifikace

Třídílná jednotka je určena pouze pro napájení 3 kV DC. Dva spalovací motory (osmi válcové) jsou umístěné ve zvláštním separovaném voze, který je v případě nutnosti oddělitelný od zbytku soupravy. Maximální výkon v elektrickém režimu je 2 600 kW (max. rychlost 160 km/h), zatímco v dieselelektrickém je pouze 700 kW (max. rychlost 140 km/h). Délka vlaku činí 66,8 m a míst k sezení je 176. [5]



Obr. 3 - Stadler Flirt bimodal multiple unit [5]

2.3.2 Bombardier BGC

V letech 2005 až 2011 byla dodána flotila 700 jednotek typu AGC francouzským regionům pro provoz na sítích TER od firmy Bombardier Transportation. Mezi ně patří i skupina jednotek typu BGC (obr. 4), které jsou založeny na elektro-dieselovém způsobu získávání energie. Vyrobeno bylo celkem 325 kusů, přičemž se dělí na dvě skupiny:

- 185 kusů řady B 81500 (1,5 kV DC + spalovací motor)
- 140 kusů řady B 82500 (1,5 kV DC / 25 kV AC + spalovací motor). [6]

Technická specifikace

Obě řady BGC jsou stejné, liší se pouze ve schopnosti provozu na střídavý proud. Vlaky B 81500 byly vyráběny ve třídílné a čtyřdílné formě, zatímco B 82500 pouze ve čtyřdílné formě. Důvodem

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

je místo pro umístění transformátoru na střechnu vozidla. V jednotkách se nachází čtyři asynchronní motory a dva spalovací motory od firmy MAN (každý s objemem nádrže 1 500 l pro naftu). V elektrickém režimu disponují výkonem 1 900 kW a v elektro-dieselovém režimu to činí 1 324 kW. Provozní hmotnost třídílné soupravy řady B 81500 je 135 t a čtyřdílné 163 t. Maximální rychlost je 160 km/h. Délka třídílné jednotky je 57,4 m (148 míst) a čtyřdílné 72,8 m (194 míst). [7] [8]

Podle zdroje [6] výrobce uvedl, že přestaví všech 325 EDMU na bateriové BEMU do roku 2023. Přičemž na přestavbu přispívají SCNF, Bombardier a francouzské regiony. Na nové jednotky bude záruka 10 let a odhadovaný dojezd v bateriovém režimu je 80 km.



Obr. 4 - Bombardier BGC, B 81500 (třídílný) [9]



Obr. 5 - Newag 36WEh Impuls, „Hybryda“ [10]

2.3.3 Newag Class 36WEh Impuls

Na veletrhu TRAKO 2019 byla vystavena nová jednotka 36WEh-001 (prototyp) od polské firmy Newag. Po podepsání smlouvy mají být do 20. prosince 2021 dodány dva kusy EDMU typu 36WEh Impuls (obr. 5) Západopomořanskému vojvodství v Polsku. Při podepisování dohody byla zároveň podepsána i opce na dalších deset souprav, a to do 20. prosince 2022. [11]

Technická specifikace

Třídílná jednotka je schopna provozu na napájecí soustavě 3 kV DC s výkonem 1 600 kW nebo na dva naftové motory, z nichž každý má jmenovitý výkon 390 kW. Jedná se zde o naftové motory firmy MAN (šestiválcové) umístěné pod podlahou v každém koncovém vozu. Objem nádrže na naftu je 720 l. Při provozu na naftu je dojezd až 1 000 km. Hmotnost prázdné soupravy činí 119 t a plně obsazené potom 143 t. Maximální rychlost v elektrickém režimu, resp. dieselelektrickém činí 160 km/h, resp. 120 km/h. Délka přes spřáhla třídílné jednotky je 59,3 m s kapacitou 160 míst k sezení. [11]

2.3.4 Alstom Coradia Régiolis

Régiolis (tovární název Polyvalent, obr. 6) jsou vlaky založené na platformě Coradia. Byly uvedeny do provozu v roce 2014. Vyráběny byly jak EMU, tak i EDMU (bimodální režim) pro francouzské regiony k provozování na sítích TER. Zajímavostí je, že si SCNF objednala jednotky o 20 cm širší, takže bylo nutné upravit nástupiště, přičemž to celé stálo 80 mil. €. Od května 2018 jsou všechny jednotky omezeny na rychlost 140 km/h, protože nevyhovovaly zábrzděné vzdálenosti při nouzovém brzdění (odstranění mělo proběhnout v říjnu téhož roku). [12] [13]

Vlaky byly vyráběny v následujících sériích:

- **Z 31500**, 27 kusů čtyřdílných EMU,
- **Z 51500**, 65 kusů čtyřdílných EMU,
- **Z 54900**, 26 kusů čtyřdílných EMU,
- **Z 54500**, 16 kusů šesticílných EMU,
- **B 83500**, 31 kusů čtyřdílných a 19 kusů šesticílných EDMU,
- **B 84500**, 73 kusů čtyřdílných a 42 kusů šesticílných EDMU,
- **B 84900**, 10 kusů čtyřdílných EDMU,
- **B 85000**, 39 kusů šesticílných EDMU.

Celkem bylo dodáno 361 jednotek (13 neznámých, takže nejsou zahrnuty v přehledu). [12] [14]

Technická specifikace řady B 83500

Jednotky jsou dodávány ve dvou variantách, tj. čtyřdílné (71,8 m) a šesticílné (110,0 m). Oba typy mohou být napájeny jak z 25 kV AC, tak z 1,5 kV DC. Maximální rychlost je 160 km/h. Maximální dosažitelný výkon je přehledně uveden v tab. 1. Hmotnost kratší soupravy v provozním stavu je

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

147 t a delší soupravy 222 t. Čtyřdílná jednotka má 222 míst k sezení a šestidílná má 354 míst k sezení. Vlaky jsou poháněny synchronními motory s permanentními magnety. [15] [16] [17]

Tab. 1 - Přehled použitých výkonů řady B 83500 [14] [16] [17]

	25 kV AC	1,5 kV DC	Dieselový režim
Čtyřdílná jednotka [kW]	2600	2500	1352
Šestidílná jednotka [kW]	3940	3780	2028

Dne 1. prosince 2020 bylo oznámeno dokončení testů EDMU jednotek s akumulátory na bázi LTO a do budoucna se plánuje sériová výroba [18]. Francouzský web [19] uvádí, že 5. března 2021 mají být objednány tři vlaky Régiolis na vodíkový pohon, přičemž testy mají začít počátkem roku 2023 a do provozu mají být uvedeny 2025.



Obr. 6 – Coradia Régiolis [18]

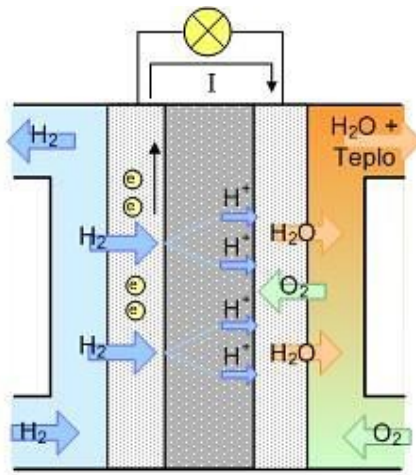
2.4 Vodíkové palivočlánkové jednotky

2.4.1 Princip

Vodíkový vlak (HMU) je založen na získávání elektrické energie z palivového článku, která je následně ukládána v akumulátorech. Akumulátory jsou zde nutné, a to z důvodu nesnadné regulace palivového článku (dodává trvalý výkon). Energie z akumulátorů je následně v elektromotoru přeměňována na mechanickou práci. Používají se převážně tam, kde je délka úseku bez elektrifikace daleko větší (dojezd až 1000 km), než by zvládlo vozidlo BEMU.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Aby bylo možné použít vodík v palivovém článku, je potřeba ho nejdříve připravit. Jeden kilogram vodíku při normálním atmosférickém tlaku zaujímá přibližně objem 11 m³, z čehož vyplývá nutnost stlačení. Se stlačením se zmenšuje objem, ale roste tloušťka stěny nádoby, která je potřebná k uchování vodíku, tudíž i její hmotnost. Pokud by byl vodík přepravován automobily, brutto hmotnost by byla přibližně 100x větší než netto hmotnost, což má za následek zbytečnou zátěž automobilu při cestě zpět pro vodík do výroby. Nejvýhodnější je tedy vyrábět stlačovaný vodík v místě odběru, odkud by mohl být využit i pro ostatní dopravu. Pokud se k výrobě použije elektrolyza s energií získanou z obnovitelných zdrojů (např. větrná, vodní elektrárna), výsledná účinnost se pohybuje okolo 35 %. [20] [21]



Obr. 7 - Funkce palivového článku [22]

Palivový článek

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které kombinuje vodíkové palivo s kyslíkem. Používá dvě elektrody oddělené elektrolytem. Funkci můžeme vidět na obr. 7. Na anodu je přiváděn vodík, kde ho katalyzátor rozděljuje na kladně nabitě ionty a elektrony. Elektrony prochází oddělenou cestou a jsou příčinou vzniku elektrického proudu, zatímco protony prochází skrz elektrolyt, kde se mísí s kyslíkem, což má za důsledek vznik odpadních látek. Vodík je skladován v tlakové nádobě a kyslík se odebírá ze vzduchu. Jediným produktem je čistá voda (vodní pára). Jeho účinnost se pohybuje okolo 40-60 %. [22]

Spotřeba vodíku

Z emailu od zástupce firmy Siemens vyplývá, že pro jednotku s přepravní kapacitou 120 sedadel lze uvažovat gradient spotřeby vodíku přibližně 0,2 kg/km (netto). Je zde nutné přičíst hmotnost nádoby (tara), která činí přibližně 50 kg na 1 kg vodíku u ocelových nádob a cca 20 kg na 1 kg vodíku u kompozitních nádob. Z toho vyplývá, že pro jednotku s dojezdem 900 km (standardní délka dojezdu vozidla HMU) je potřebná hmotnost vodíku 180 kg. Pokud je uvažována ocelová nádoba, bude brutto hmotnost 9,18 t. S kompozitní nádobou to činí 3,78 t.

2.4.2 Alstom Coradia iLint

Jednotka uvedená na obr. 8, byla představena v roce 2006 francouzskou firmou Alstom. Je založena na dieslovém vlaku Lint 54, kde pohonná jednotka byla vyjmuta a nahrazenou zcela novou koncepcí. V listopadu roku 2017 bylo vysoutěženo 14 jednotek pro německou spolkovou zemi Niedersachsen s 30letou zárukou. Se změnou jízdního řádu má být v roce 2020 uvedeno do provozu 27 těchto vlaků dopravce Fahma ve spolkové zemi Hessen. [23] [24]

Technická specifikace

Na střeše každého vozu se nachází nádrž na 94 kg vodíku (tj. celkem 188 kg) a palivový článek. Dále pohon zajišťuje trakční střídač a trakční elektromotory doplněné lithiem iontovými bateriemi. Vlak na jedno naplnění ujede cca 1000 km. Maximální rychlost je 140 km/h. Předpokládaná cena jedné jednotky je přibližně 350 mil. Kč, což je asi o 40 % více než v případě dieslového vlaku. Převážná kapacita je 160 míst k sezení. [23]



Obr. 8 - Coradia iLint [25]



Obr. 9 - Siemens Mireo Plus H [26]

2.4.3 Siemens Mireo Plus H

Společnost Siemens aktuálně vyvíjí jednotku na vodíkový pohon (obr. 9), která by měla být otestována v roce 2024 v německé spolkové zemi BaWü. Je plánované jezdit v pravidelné železniční dopravě s nájezdem přibližně 120 000 km za daný testovací rok. Mělo by se tím ušetřit až 330 t CO₂. [26]

Technická specifikace

Dvoudílná varianta nabízí dojezd 600 km a třídílná až 1000 km. Doplnění paliva by mělo trvat nejdéle 15 minut. Vodíková jednotka nabízí maximální rychlost 160 km/h s trakčním výkonem 1700 kW. Nabíjení baterií je možné pomocí rekuperace za jízdy, čímž se značně ušetří vodíkové palivo. Zrychlení udávané výrobcem je 1,1 m/s². Dvoudílná, resp. třídílná souprava má délku přes spráhla 47 m, resp. 63 m a 120, resp. 160 míst k sezení. [26] [27]

2.5 Elektro-akumulátorové jednotky

2.5.1 Historie

Přesto, že se zdá, že využívání akumulátorových jednotek přichází s nástupem moderní doby, historie tohoto principu sahá až do roku 1890, jak uvádí [28]. Podle zdroje [29] byl v roce 1926 provozován na Novém Zélandu prototypový drážní vůz založený na Edisonově Ni-Fe baterii. U nás také v těchto letech uvedly tehdejší ČSD do provozu dvě posunovací lokomotivy E 407.0 s olověnými akumulátory. Naposledy bylo dodáno 12 lokomotiv řady E 417.0 a E 416.0 v roce 1949. V roce 1959 až 1965 bylo dodáno 161 vozů řady Eta 150 používaných v Německu, a to až do roku 1995. V provozu je následně nahradily motorové lokomotivy produkující škodliviny a hluk. [28] [30]

2.5.2 Princip

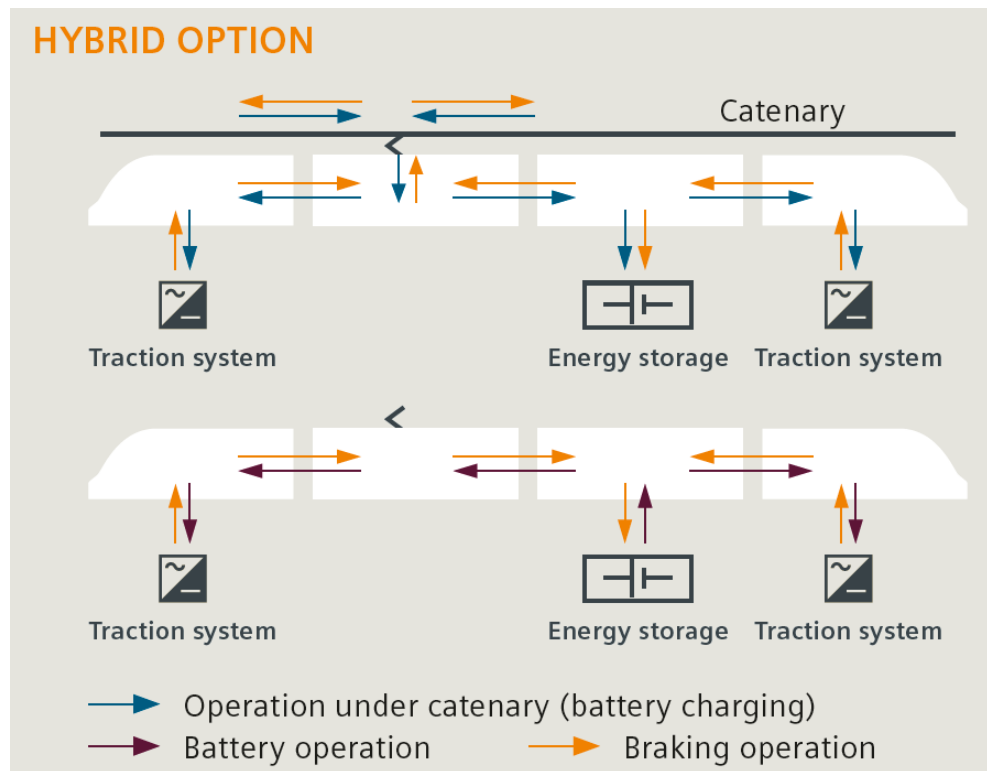
Tyto hybridní vlaky jsou založeny na principu elektro-bateriového napájení. Do konvenční elektrické jednotky lze umístit na vhodné místo akumulátory nebo superkapacity, které budou napájeny elektrickou energií. Energie se v nich ukládá a je možnost ji dále využívat. Získanou energii lze využít pro pohon elektromotorů v případě, že nebudou napájeny z líniového napájení. Zjednodušený princip funkce (včetně rekuperace energie) lze vidět na obr. 10.

Kvůli zajištění bezbariérovosti je nutné baterie umístit na vhodné místo. Řešením se nabízí umístění do zvláštního separovaného vozu jen pro akumulátory (např. 2.5.7) či umístění na střechu (např. 2.5.4). Je zřejmé, že s rostoucím počtem baterií rostou i nároky na zástavbu prostoru.

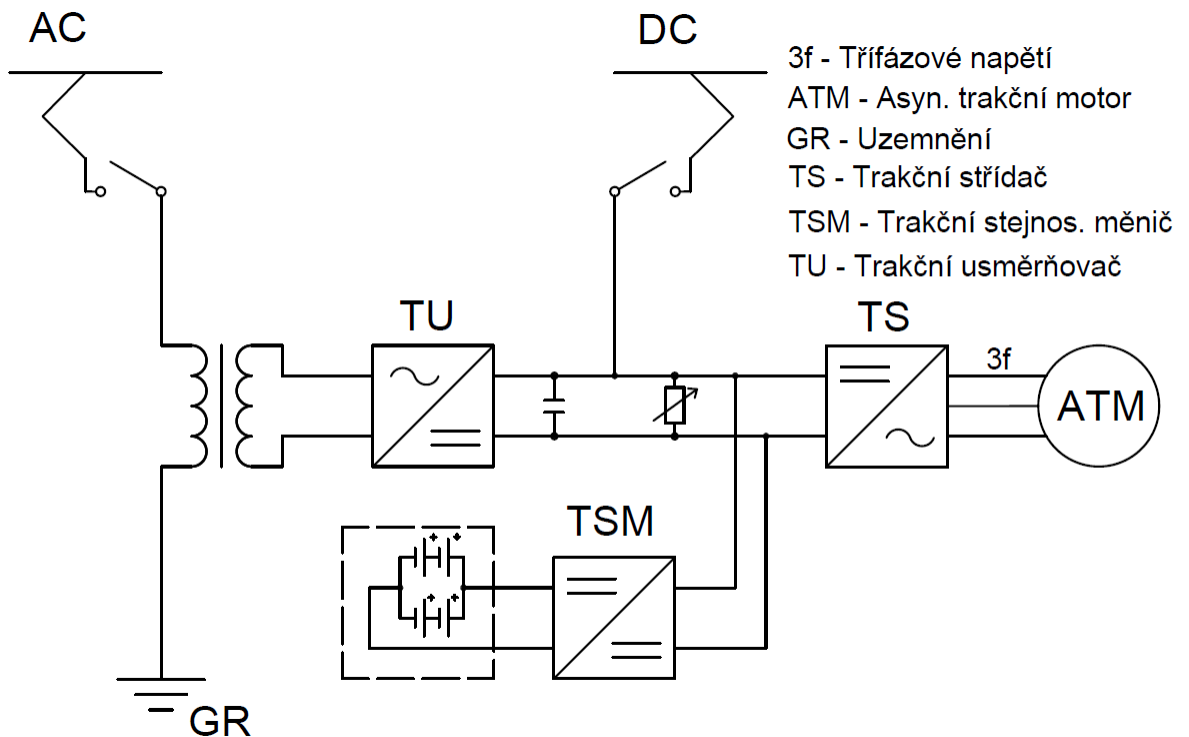
Na obr. 11 je možné vidět zjednodušené schéma napájení akumulátorů z různých trakčních napájecích systémů. Výhodou těchto jednotek je rekuperační brzdění, které zajišťuje nabíjení akumulátorů, popř. vracení elektrické energie zpět do trolejí. Tím se značně prodlužuje délka

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

dojezdu a snižuje výsledná spotřeba energie. Pokud jsou akumulátory již plně nabití, je možné energii mařit v brzdových odporcích, kde se elektrická energie přeměňuje v tepelnou.



Obr. 10 – Schéma napájení akumulátorů v jednotlivých režimech [31]



Obr. 11 - Elektrické funkční schéma BEMU

2.5.3 Akumulátorové nároky

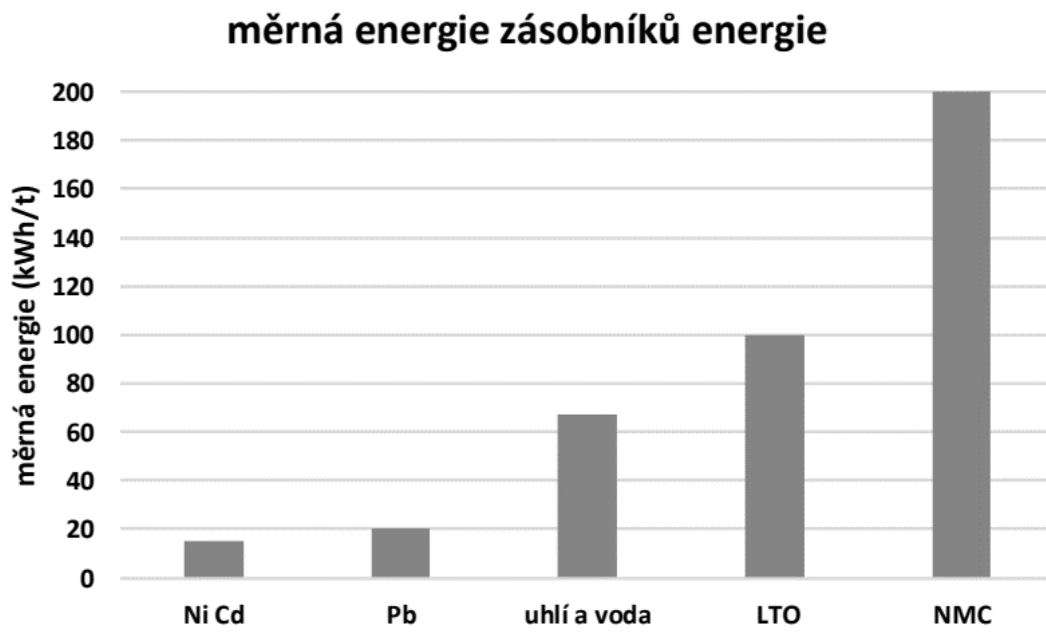
Na železnici je kladen vysoký nárok na životnost baterií. Energie z akumulátorů se používá nejen pro pohon vozidla, ale i pro pomocné pohony (ventilátorové chlazení, klimatizace, kompresor atd.), což znatelně ovlivňuje dojezd vozidla. Vzhledem k velikosti a zástavbě by náklady na výměnu byly nemalé, proto se dnes počítá v řádech tisíců nabíjecích cyklů (např. 7000). Hodnoty cyklů jsou pouze orientační a liší se v závislosti na konstrukci, využití, kapacitě baterie apod. Akumulátor je těžký a drahý. „Akumulátor o kapacitě 1 000 Ah/750 kW (při 750 V napájení) složený z 235 článků má hmotnost 7 755 kg a jeho cena může být přes 8,2 mil. korun!“ [32]

Existuje více druhů baterií – olovené, niklkadmiové, lithiové atd. Dnes používané se dají rozdělit do následujících dvou skupin:

- High power (HP) – založené na vysokém měrném výkonu (např. LTO)
- High energy (HE) – založené na vysoké měrné energii (např. NMC) [20]

V obr. 12 můžeme vidět porovnání měrné energie různých druhů akumulátorů doplněné o parní trakci (uhlí a voda). Měrná energie nafty je přibližně 12 000 kWh/t; po uvážení účinnosti klesne energetická hodnota přibližně na 4 200 kWh/t. [30]

Jak již bylo výše zmíněno, nejlepší měrnou energii mají NMC akumulátory. Tyto baterie jsou levnější než LTO, ale mají nižší nabíjecí/vybíjecí výkon, nižší účinnost a životnost cca 2 000 cyklů. Zatímco LTO jsou sice dražší, ale nabízí životnost cca 20 000 cyklů, vyšší účinnost a vyšší nabíjecí/vybíjecí výkon. [20]



Obr. 12 - Porovnání měrné energie jednotlivých druhů zásobníků energie [20]

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Z výše kladených nároků na životní cykly vyplývá nutnost použít LTO akumulátory typu HP. To je velmi důležité, protože regionální doprava je založena na plošné obslužnosti. Vlivem neustálého zastavování a rozjíždění se zásadním způsobem zvyšuje spotřeba trakční energie. Podle zdroje [30] je za jistých podmínek celková spotřeba energie třikrát vyšší než jízda vlaku ustálenou rychlostí. Zde se např. pozitivně projevuje rekuperační brzdění, u kterého je kladen velký požadavek na účinnost.

Opakovaným nabíjením a vybíjením akumulátoru klesá jeho životnost. Ta je definována do poklesu na úroveň 80 % z jeho celkové kapacity (to odpovídá zhruba polovině životnosti vozidla). [20]

Princip LTO akumulátorů

Akumulátory na bázi LTO mají bezvodý elektrolyt (na rozdíl od jiných akumulátorů). Anoda je z lithium-titanát oxidu a katoda může být např. z lithium-kobalt oxidu. Ionty lithia se vmísí do mřížky záporné elektrody, čímž se akumulátor nabíjí. V podstatě zde neprobíhá žádná chemická reakce, takže nevzniká žádné teplo, což má znatelně pozitivní dopad na životnost. Nevýhodou je nižší jmenovité napětí 2,4 V, proto se články spojují do série. [33]

2.5.4 Siemens Desiro ML Eco

Jedním z produktů firmy Siemens Mobility je BEMU Desiro ML Eco (obr. 13). Vlak je založen na platformě Desiro ML (elektrické jednotky). Ekologicky šetrná jednotka byla představena na veletrhu Innotrans 2018 v Berlíně. O rok později v září byl zahájen testovací provoz na trati Kamptalbahn z St. Pölten do Horn v Dolním Rakousku. Předpokládaný dojezd na baterie je 80 km. [34] [35]



Obr. 13 - Siemens Desiro ML Eco [35]

Technická specifikace

Třívozová (nemá Jakobsovy podvozky) vícesystémová jednotka je stavěna pro provoz na napájecích trakčních soustavách 15 kV AC 16,7 Hz / 25 kV AC 50 Hz. Disponuje trakčním výkonem 2600 kW (v bateriovém režimu 1287 kW) a kapacitou baterií 528 kWh. Baterie jsou umístěny na střeše středního (netrakčního) vozu jednotky. Dle emailové komunikace se zástupcem firmy Siemens vyplývá, že celková hmotnost jednotky činí přibližně 159 t (145 t + 14 t akumulátorů vč. příslušenství). Maximální rychlost vozidla v bateriovém režimu činí 120 km/h a v režimu napájeném z troleje 140 km/hod. Délka přes spřáhla je 75,152 m. Bezbariérový přístup, wifi, klimatizace, stolky atd. jsou dnes již samozřejmostí v nových konstrukcích. Nabízí 244 míst k sezení. Také plně vyhovuje dnešním normám interoperability TSI. [36] [37]

2.5.5 Siemens Mireo Plus B

Dvoudílná jednotka pro SFBW

V březnu 2020 Siemens získal uplatnění pro nová dvoudílná BEMU vozidla Mireo Plus B, které můžeme vidět na obr. 14. Německá spolková země BaWü si objednala 20 těchto nízkopodlažních elektrických jednotek, které mají být dodány do prosince roku 2023. Smlouva o údržbě byla uzavřena na období 29,5 let. Předpokládaný dojezd na baterie je stejný jako u jednotky Desiro ML Eco, tj. 80 km. [38]

Technická specifikace

Jednotka se skládá ze dvou článků a je stavěna pouze pro trakční napájecí soustavu 15 kV AC 16,7 Hz. Kapacita baterií umístěných pod podlahou je 700 kWh. Dosahuje maximálního výkonu 1700 kW a rychlosti až 140 km/h. Délka vozidla přes spřáhla je 46,56 m a má 120 míst k sezení. Jeho podvozky jsou tvořeny nekonvenčním provedením s vnitřním uložením ložisek. [39]

Třídílná jednotka

Firma také nabízí třídílné jednotky. Jsou vícesystémové 15 kV AC 16,7 Hz / 25 kV AC 50 Hz s maximální rychlostí 160 km/h a stejným trakčním výkonem 1700 kW. Nabízí až 160 míst k sezení s délkou přibližně 63 m. Předpokládaný dojezd je až 120 km. [27]

2.5.6 Stadler Flirt Akku

Jednotka Flirt Akku (obr. 15) byla představena na veletrhu Innotrans 2018. Následně firma Stadler vyhrála výběrové řízení pro dodávku 55 akumulátorových jednotek pro německou spolkovou zemi Schleswig-Holstein. Začátkem roku 2023 mají být plně nasazeny v této severní zemi. [40]

Dvoudílná jednotka

Dojezd je odhadovaný na 150 km. Baterie jsou napájené soustavou 15 kV AC 16,7 Hz. Míst k sezení je 124, zatím co celkový počet míst je 198. Moderní vozidlo je bezbariérové, klimatizované, se zásuvkami a WLAN připojením. Maximální rychlost v bateriovém režimu až 140 km/h. [40] [41]

Třídílná jednotka

Třídílná souprava se liší hlavně počtem míst k sezení, kterých má 154. Maximální rychlost je 160 km/h v trolejovém režimu, v bateriovém to činí 140 km/h. Odhadovaný dojezd je 80-150 km. Délka přes nárazníky je 58,6 m. [39]



Obr. 14 - Siemens Mireo Plus B [38]



Obr. 15 - Stadler Flirt Akku [41]

2.5.7 Stadler Flirt trimodal multiple unit

Trimodální jednotka (obr. 16) spadá pod již zmiňovanou platformu Flirt, kterou vyrábí švýcarský výrobce Stadler. Celkem 24 vlaků má být dodáno společnosti Keolis Amey ve Walesu. Do provozu mají být uvedeny do začátku roku 2023. Přičemž má být dodáno sedm jednotek třídílných a 17 čtyřdílných. [42]



Obr. 16 - Stadler - Flirt trimodal multiple unit (třídílná jednotka) [43]

Technická specifikace

Vlak využívá pohonu elektrickými trakčními motory, které mohou být napájeny z trakčního vedení 25 kV AC nebo z akumulátorů, přičemž akumulátory mohou být nabíjeny i z trakčního diesel-generátoru. Specifikem je vložený vůz uprostřed (tzv. power modul), který s sebou veze akumulátory a naftový motor. Maximální výkon je 2600 kW při trolejovém napájení, kdežto v bateriovém módu to činí polovinu. Maximální rychlost je 120 km/h. Třídílná, resp. čtyřdílná forma nabízí 144, resp. 194 míst k sezení a délka přes spřáhla je 65,0 m, resp. 80,7 m. [42]

2.5.8 Bombardier Talent 3 hybrid

Společnost Bombardier v roce 2018 představila novou hybridní jednotku typu Talent 3 (obr. 17), vyrobenou závodem v německém Hennigsdorfu. Jednotka je založena na elektrické platformě Talentu 3. Vlak měl být testován v roce 2019 v německém regionu u Bodensee. Testovací provoz má ale zpoždění, protože se čeká na schválení vlaků. [44]



Obr. 17 - Talent 3 od firmy Bombardier [44]

Technické údaje

Třídílný prototyp je vybaven čtyřmi trakčními bateriemi MITRAC (na bázi NMC) s kapacitou 440 kWh a hmotností 6,9 t umístěnými na střeše. Nabíjení je pouze na 15 kV AC 16,7 Hz.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Maximální výkon v bateriovém režimu je 1000 kW, zatímco v elektrickém režimu to jsou 2000 kW. S touto technologií ujede až 40 km. U dalších souprav je plánovaný dojezd až 100 km, přičemž výrobce to aktuálně stvrzuje na svém webu. Maximální rychlost je 140 km/h v bateriovém režimu a 160 km/h v režimu napájení z trolejového vedení. Délka jednotky činí 56,2 m. Jednotka může mít až 6 dílů. Vlak je také vybaven polohovatelnou nástupní plošinou pro všechny typy úrovní nástupišť. [39] [45] [46] [47]

2.6 Přehled

V tab. 2 je uveden přehled všech výše zmíněných vozidel se základními údaji.

Tab. 2 - Přehled základních technických parametrů jednotlivých hybridních vlaků

Typ vlaku	Počet vozů (dílů)	Výkon [kW]	Odhadovaná délka dojezdu [km]	Max. rychlost [km/h]	Míst k sezení
Flirt bimodal EDMU	3	2600 (700 ED R.)	-	160 (140 ED R.)	176
BGC	3	1900 (1324 ED R.)	-	160	148
Class 36WEh Impuls	3	1600 (780 ED R.)	1000	160 (120 ED R.)	160
Coradia Régiolis	4	2600 (25 kV) (1352 ED R.)	-	160	222
Coradia iLint	2	-	1000	140	160
Mireo Plus H	2	1700	600	160	120
Desiro ML Eco	3	2600 (1287 B. R.)	80	140 (120 B. R.)	244
Mireo Plus B	3	1700	120	160	160
Flirt Akku	3	-	150	160 (140 B. R.)	154
Talent 3	3	2000 (1000 B. R.)	40 (plánováno 100)	160 (140 B. R.)	-
Trimodal multiple unit	3	2600 (1300 B. R.)	-	120	144

Některé údaje se mohou lišit. Důvodem je rychlý vývoj a flexibilita konstrukce vozidel. Např. maximální rychlost soupravy se přizpůsobuje zadavateli zakázky. Tab. 2 slouží pouze jako orientační.

3 Traťový úsek a jednotky pro trakční výpočty

3.1 Výběr traťového úseku

Pro porovnání spotřeby trakční energie akumulátorového a „čistě“ elektrického vozidla se nabízí zvolit trať takovou, kde bude využito bateriové vozidlo (tudíž bude část neelektrifikovaná). Alternativně bude uvažováno, že se chybějící úsek pro elektrickou jednotku elektrifikuje. Zároveň je vhodné zvolit část takovou, aby vyhovovala dnešním potřebám cestujících a umožnila co nejjednodušší spojení frekventovaných měst. Názornou ukázkou takového úseku je spojení Pardubice hl. n. – Lanškroun.

Spojení Pardubice hl. n. - Lanškroun

Aktuálně, pokud chce cestující jedoucí z Pardubic (Chocně, Ústí n. Orlicí apod.) jet do Lanškrouna, musí přestoupit v České Třebové. Důvodem je chybějící elektrifikace z Rudoltic v Čechách do Lanškrouna. Pokud by v celé trase byla provozována motorová jednotka, bylo by to drahé, neekonomické, a hlavně nepříznivé k životnímu prostředí.

Nabízí se zde možnost zavést přepřah v železniční stanici Česká Třebová, to by ovšem znamenalo nutnost použití vozů s lokomotivou, nikoli ucelenou jednotkou, takže by nastala potřeba objíždět soupravu v cílové stanici Lanškrouně a Pardubicích. To vše by mělo za následek prodloužení jízdní doby, více hnacích vozidel (elektrické trakce a motorové trakce) a také zvýšení spotřeby trakční energie při objíždění soupravy. Možnost použití řídicích vozů s elektrickým hnacím vozidlem by znamenalo elektrifikaci úseku. Pro použití dvouzdrojových lokomotiv by bylo pravděpodobně nutné řídicí vozy upravit. Optimalizace linky však není předmětem této práce.

3.1.1 Historie a současnost

V první polovině 19. st. nastala nutnost propojit Vídeň se saskými hranicemi. Výstavbou Severní státní dráhy byl pověřen inspektor Alois Negrelli. Celkem bylo vytipováno sedm tras. Nakonec baronem Kübeckem (prezident dvorské komory) byla zvolena sedmá varianta, která využila z Vídně Severní dráhy Císaře Ferdinanda (KFNB) do Olomouce, odkud dále vedla přes Zábřeh, Českou Třebovou, Choceň, Pardubice až dostihla Prahu. V pátek 9. září 1842 počala skutečná realizace. První vlak projel 20. srpna 1845 a od 1. září 1845 započal pravidelný provoz. [48]

Největší stavbou na trati byl Třebovický tunel, který vedl skrz jílové prostředí. Vyšel na neskutečných 1 002 432 zlatých (tj. přibližně jedna osmina z úseku Olomouc – Praha). Prostředí tunelu začalo záhy poznamenávat a v roce 1865 byl trvale uzavřen a nahrazen objízdou tratí. Až při zdvojkolejňování roku 1932 byl opět opraven a uveden do provozu. Při modernizaci v roce 2005 byl definitivně zasypan. [48]

Dne 1. června roku 1885 (40 let po otevření NStB) byla konečně otevřena trať z Rudoltic v Čechách do Lanškrouna, o kterou tolik usilovalo obyvatelstvo Lanškrouna a okolí. Dne 2. února 1928 byl

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

na trati zahájen pravidelný provoz prvních motorových vozů M 132.0. V roce 1983 byly nasazeny vozy M 152.0 (dnes 810). V roce 2012 byly tyto vozy nahrazeny modernějšími bezbariérovými vozidly od firmy Stadler (RegioShuttle RS1). [49] [50]

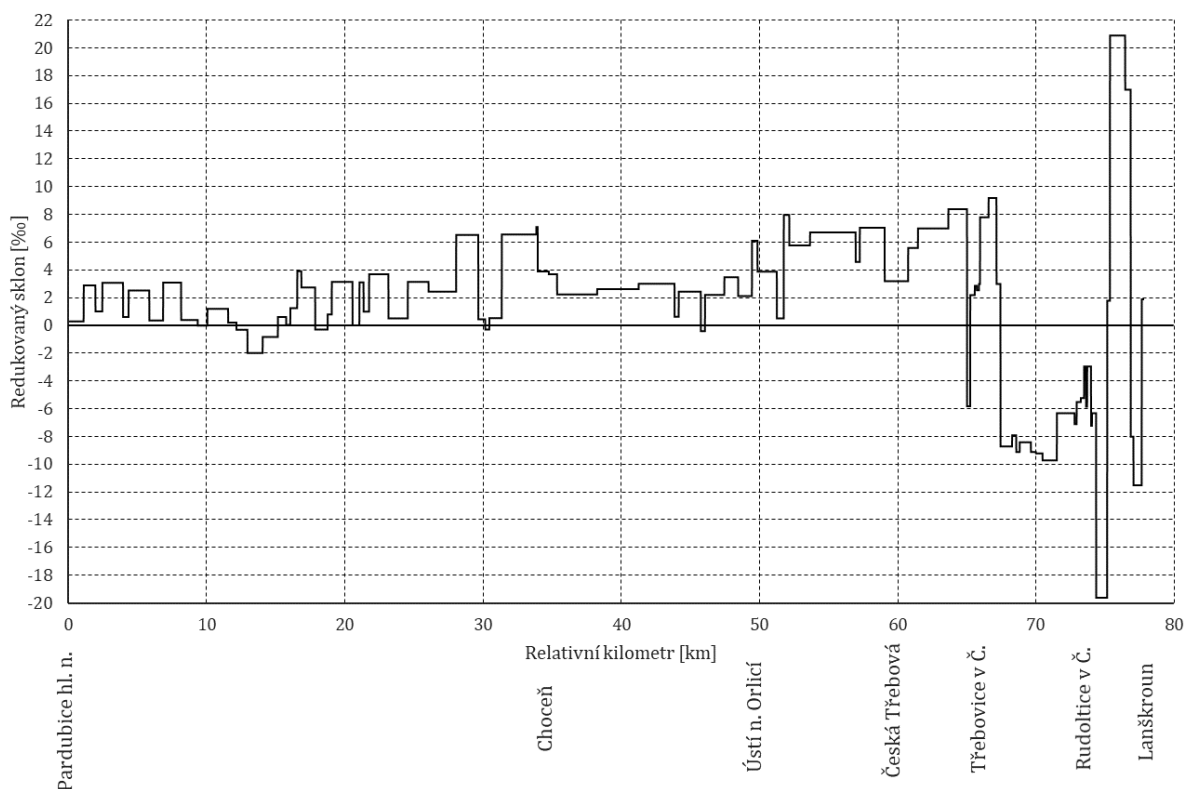
Současnost

Motorová vozidla RegioShuttle RS1 aktuálně jezdí na trase Česká Třebová – Lanškroun. Jezdí tedy přibližně čtyři pětiny své trasy pod trolejovým vedením, což má za následek dražší provoz. Podle JŘ 2021 zde jezdí v pracovní dny průměrně 24 párů vlaků denně a 20 párů vlaků o víkendech. Jízdní doba je 18 až 20 minut (z Pardubic s přestupem v České Třebové to činí přibližně 70 minut).

3.1.2 Popis vybraného úseku

Vybraný úsek Pardubice hl. n. – Lanškroun o délce necelých 78 km je dnes složen celkem ze tří traťových úseků. První vede z Pardubic do České Třebové (1. koridor), což je podle JŘ 2021 část tratě vedené pod číslem a 010 (TTP – 501). Další úsek je mezi Českou Třebovou a Rudolticemi v Čechách (2. koridor), který má číslo 270 podle JŘ (TTP – 309). Nově od roku 2021 je regionální dráha do Lanškrouna vedena též pod č. 270 (TTP – 314), dříve nesla označení 019.

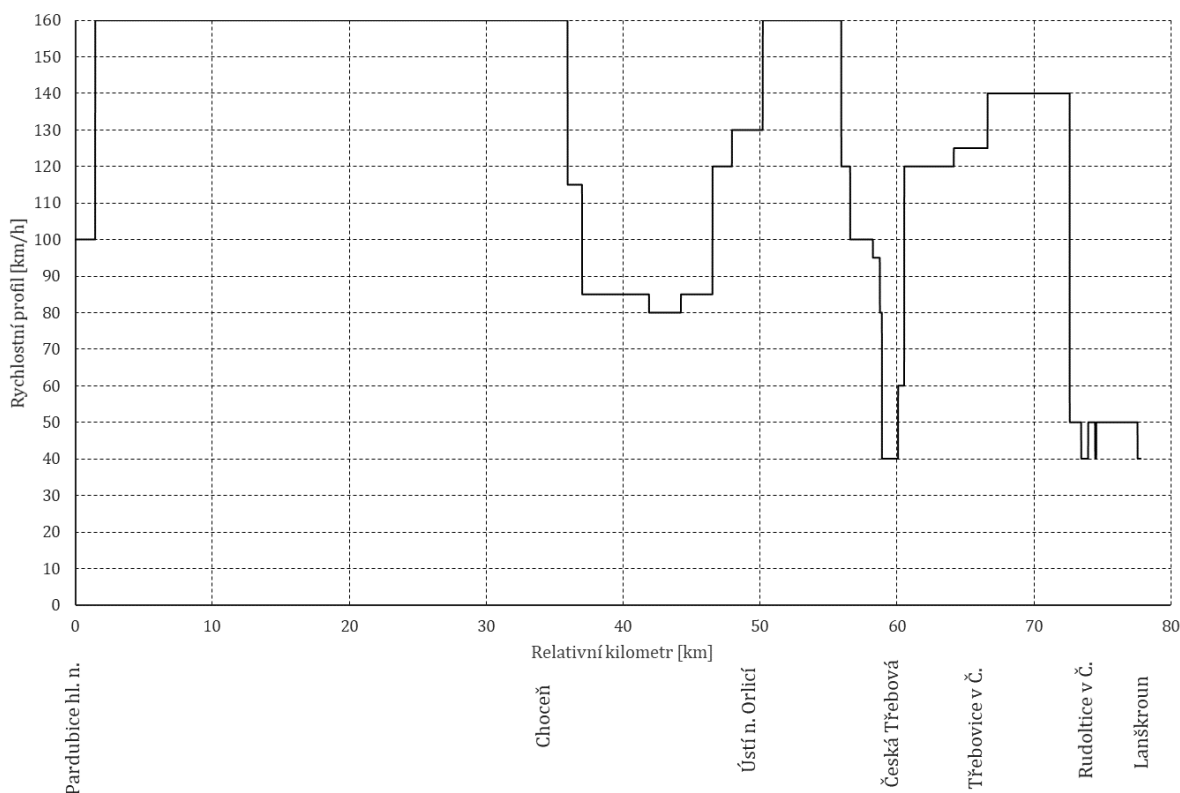
Ve vybraném úseku se nachází celkem 13 stanic a 7 zastávek. Za zmínku stojí stanice Pardubice hl. n., Choceň, Ústí n. Orlicí a Česká Třebová. Jsou to největší města, ze kterých, mimo jiné, odbočují jiné tratě. Předpokládá se zde tedy zvýšený nástup a výstup cestujících.



Obr. 18 - Redukovaný sklon vybraného úseku

Technický popis

Na trati se nachází rozhodné stoupání 20,9 ‰, rozhodný spád -19,6 ‰, a to v posledním úseku za Rudolticemi v Č. (viz obr. 18). Maximální rychlost je 160 km/h (viz obr. 19). Trakční napájecí síť liniového vedení je zavedena v celé části obou koridorů, přičemž je napájena 3 kV DC s povolenou rekuperací. Bez elektrifikace je pouze 4 km dlouhý zbylý úsek do Lanškrouna. Traťová třída prvního a druhého koridoru je D4 (22,5 t na nápravu, 8 t na metr délky) a regionální dráhy C3 (20 t na nápravu, 7,2 t na metr délky) [51]. Nachází se zde Třebovický tunel dlouhý 95 m [52]. Nenachází se zde žádná stálá návěst ke stažení sběrače.



Obr. 19 - Rychlostní profil vybraného úseku pro „N130“

3.2 Výběr jednotek pro trakční výpočty

Pro porovnávací výpočty je nutné zvolit dvě jednotky, z nichž jedna bude s polozávislou trakcí (BEMU) a druhá pouze elektricky napájená z trakčního liniového vedení (závislá trakce). Vzhledem k aktuální situaci na železnici, je nejvhodnější použít jednotku typového označení Škoda 7Ev. Konkrétně je zvolena řada, která pro České dráhy nese označení 640 a obchodní název „RegioPanter“. Dnes je to moderní elektrická jednotka jezdící na českých železnicích.

3.2.1 Popis elektrické jednotky 7Ev (řada 640)

Elektrická jednotka řady 640 (obr. 20) byla vyrobena v říjnu 2012 na základě objednávky od dopravce České dráhy. Dodány byly tři kusy a v roce 2014 dalších pět. Je to vícesystémová

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

jednotka vyrobená pro provoz na TNS 3 kV DC a 25 kV AC 50 Hz. Dnes je provozována hlavně na ramenech Šumperk – Zábřeh na Moravě, Olomouc – Nezamyslice a také v příměstské dopravě Brna. [53]



Obr. 20 – Elektrická jednotka řady 640 „RegioPanter“ [54]

Skládá se z vozů řady 640/642/641 (viz obr. 21) o celkové délce 79,4 m (26,45 m/ 26,50 m/ 26,45 m). Na střeše hlavového vozu jedna (řada 640) se nachází přístroje vstupních obvodů – klimatizační jednotka, trakční měnič, brzdový odporník, hlavní vypínač DC, kompresor, pulzní usměrňovač, trakční transformátor s chladičem, sběrač a pomocné měniče. Vložený vůz (řada 642) má na střeše vedení pro AC napájení a hlavový vůz tři (řada 641) je stejný jako hlavový vůz jedna, ale neobsahuje kompresor a vstupní obvody (je napájený právě z vozu řady 640). [53] [55]



Obr. 21 - Boční pohled na jednotku Škoda 7Ev [56]

Uspořádání pojezdu je $Bo'2' + Bo'2' + 2'Bo'$, přičemž každý hnací podvozek je osazen dvěma asynchronními trakčními motory Škoda ML 3942 K/4 o trvalém výkonu 340 kW. Dosahuje maximální rychlosti 160 km/h. Je vybavena adhezními brzdami, jako je elektropneumatická (kotoučová) a elektrodynamická s možností zpětné rekuperace. Na vozidle se také nachází magnetická kolejnicová brzda. Celkem lze za sebe zařadit až čtyři jednotky řízené pomocí WTB. [53]

Hmotnost prázdné jednotky činí 153,2 t (54,4 t/45,8 t/52,3 t), ve službě je to 159,5 t (pro výpočet lze zaokrouhlit na hodnotu 160 t). První tři vyrobené kusy (tj. 001–003) nabízí celkem 241 míst k sezení, přičemž zbylých pět (tj. 004–008) nabízí 237 sedadel. [53]

V tab. 3 je uveden přehled charakterizujících údajů. Součinitel rotačních hmot je zvolen.

Tab. 3 - Technické údaje jednotky 640 "RegioPanter"

Jednotka 640 „RegioPanter“			
Trakční napájecí soustava	-	-	3 kV DC, 25 kV AC 50 Hz
Trvalý výkon trakčních motorů	P_{trv}	[kW]	2040
Max. rychlost	V_{max}	[km/h]	160
Hmotnost prázdné soupravy	M_p	[t]	153,2
Délka jednotky přes spřáhla	l_{vl}	[m]	79,4
Součinitel rotačních hmot	ρ_{ej}	[-]	0,08
Počet míst k sezení (vč. 1. třídy)	N_{cest}	[míst]	241 nebo 237

3.2.2 Popis hybridních jednotek

Hybridní vozidlo je vhodné uvažovat velice podobné elektrické jednotce zmíněné v kap. 3.2.1. Aby bylo dosaženo potřebného výsledku, budou uvažovány pouze změny, které charakterizují dvouzdvojevo vozidlo. Vzhledem k délce neelektrifikovaného úseku (tj. cca 4 km) je zvoleno hybridní vozidlo typu BEMU. Pro lepší přehlednost výsledků, jsou pro výpočet zvoleny dvě odlišné BEMU jednotky.

Těžší vozidlo BEMU

První vozidlo má přepokládanou kapacitu akumulátorů 528 kWh (LTO) o hmotnosti 14 t (to činí 174 t na celý vlak) a výkonem v bateriovém režimu 1 287 kW. Toto je např. případ vlaku Desiro ML Eco (viz kap. 2.5.4). Předpokládaný dojezd je 80 km.

Lehčí vozidlo BEMU

Druhé vozidlo má poloviční kapacitu akumulátorů 264 kWh (LTO) o hmotnosti 7 t. Výkon v bateriovém režimu je 1 000 kW. Zde bylo inspirováno hybridní jednotkou Talent 3 (viz kap. 2.5.8). Předpokládaný dojezd je 40 km.

Ve výpočtech je tedy uvažován „bateriový“ vlak ř. 640, na základě dostupných údajů o podobné jednotce, která je již v provozu. Zde jsou uvedeny důvody k tomuto rozhodnutí:

- K porovnání spotřeby trakční energie je nutné zvolit dvě podobné jednotky (jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly).
- Aktuálně provozní vozidla s polozávislou trakcí by měla problém s přechodností (např. TNS).
- Dnes se vyrábí vozidla „na míru“, takže by stejně byla zadána zakázka pro výrobu nových vozidel.

Výpočet všech zbylých údajů potřebných k výpočtu je uveden v kapitole 4.

4 Stanovení vstupních dat pro trakční výpočty

Vstupní data jednotlivých vlaků jsou zvolena tak, aby se co nejvíce přiblížila realitě a zároveň vynikl požadovaný rozdíl v hmotnosti. Hmotnost je převzata z předchozí kapitoly. Maximální rychlost a délka vlaku jsou statické (neměnné) hodnoty, které jsou převzaty z jednotky 7Ev (čili kap. 3.2.1). Zbylé údaje stojí za rozsáhlejší zmínku.

4.1 Sestrojení trakční charakteristiky

Trakční charakteristika je závislost tažné síly na rychlosti jízdy vozidla (v ideálním případě hyperbolického průběhu). Důležitá je pro každé železniční vozidlo. Udává stěžejní parametry, které jsou jedny z nejsledovanějších. Pro výpočet je nutné také sestavit charakteristiku, protože bez ní by nemohly být provedeny trakční výpočty.

K sestavení obálky trakční charakteristiky je nutné znát následující parametry:

- maximální využitelná tažná síla na obvodu kol na mezi adheze,
- maximální tažná síla na obvodu kol,
- maximální výkon,
- maximální rychlost vozidla.

4.1.1 Maximální využitelná tažná síla na obvodu kol na mezi adheze

V reálných podmínkách existuje mez využitelné tažné síly. Tato mez je dána aktuálním stavem povrchu kola a povrchu kolejnice, počtem hnacích náprav, hmotností vlaku a řadou dalších jevů. Maximální adhezní sílu, kterou je možno přenést tečně mezi kolem a kolejnicí, lze vypočítat pomocí (1).

$$F_{adh} = \mu \cdot M_{adh} \cdot g \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Součinitel adheze je uvažován dle současných norem TSI [57]. Vzhledem k polovině hnacích a polovině běžných náprav u elektrické jednotky, je uvažována poloviční hmotnost vlaku jako adhezní. Součinitel využití adheze je zvolen 0,98. Výsledná křivka pro jednotku 7Ev je zobrazena na obr. 24.

4.1.2 Maximální tažná síla na obvodu kol

Maximální tažná síla je obecně dána hnacím momentem motorů. Při rozjezdu se postupně zvyšuje výkon (aby nedošlo k prokluzu), až dosáhne svého maxima, odkud se začíná hyperbolicky snižovat tažná síla. To je dáno platností vzorce (2).

$$F_{ok} = \frac{P}{v} \quad (2)$$

Elektrická jednotka řady 640

Maximální tažná síla bývá zpravidla uváděna v podobě hodnoty od výrobce. Časopis Dráha [58] udává maximální tažnou sílu 196,5 kN pro jednotku řady 640. Z emailové komunikace se zástupcem výrobce vozidla z firmy Škoda vyplývá, že maximální hodnota tažné síly při středně ojetých kolech je 174 kN. Jejich porovnání je vidět na obr. 24.

Pro výpočet a trakční charakteristiku byla zvolena hodnota z emailové konzultace, tj. 174 kN pro všechny jednotky v elektrickém režimu.

Těžší akumulátorová jednotka

V dostupných údajích o jednotce Desiro ML Eco (kap. 2.5.4) není bohužel uvedena maximální tažná síla na obvodu kol v bateriovém režimu a nebyla sdělena ani na vlastní žádost od výrobce. Bylo by možné počítat se silou stejnou jako v elektrickém režimu, ale katalog výrobce [37] udává maximální zrychlení při rozjezdu v akumulátorovém režimu:

$$\ddot{x} = 0,77 \text{ m/s}^2, \quad (3)$$

a v elektrickém režimu:

$$\ddot{x} = 1,0 \text{ m/s}^2. \quad (4)$$

Pro potřeby výpočtů je určena maximální tažná síla ve stejném poměru, jako je poměr jednotlivých zrychlení. Po výpočtu vychází 134 kN.

Lehčí akumulátorová jednotka

V dostupných údajích o jednotce Talent 3 hybrid bohužel nejsou uvedena jeho jednotlivá zrychlení. Avšak pro vystižení rozdílu mezi elektrickou a akumulátorovou jednotkou je vhodné použít stejnou maximální tažnou sílu jako u těžší jednotky, tedy 134 kN.

Přiblížení reality

Tažná síla ve skutečnosti nenarůstá skokem z nuly na maximální hodnotu. Při výpočtech by mohl být uvažován postupný (lineární) nárůst na maximální hodnotu po dobu přibližně pěti sekund. To však numerická metoda neumožňuje ani s krokem $\Delta l = 1 \text{ m}$. Nabízí se možnost analytického řešení; to však lze jen obtížně skloubit s numerickým výpočtem.

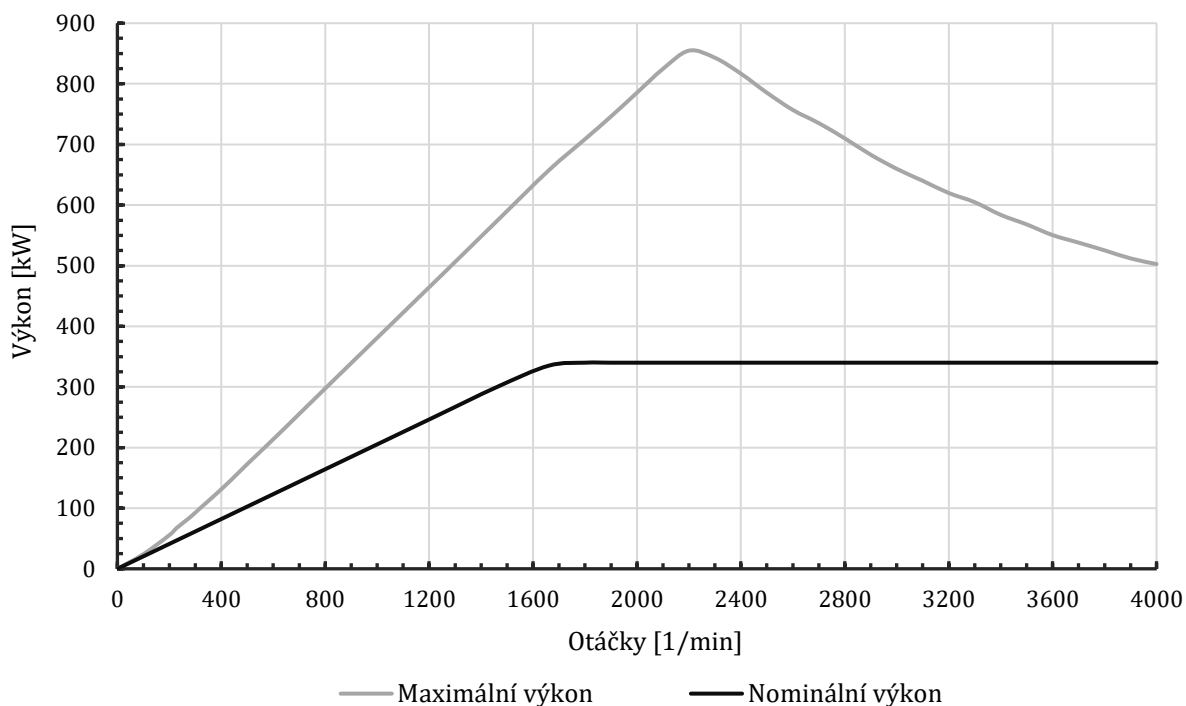
Byla tedy zvolena varianta, že při rozjezdu v prvním úseku Δl bude počítáno s poloviční tažnou silou. Výsledná spotřebovaná energie se poté ve výsledku promítne nepatrným nárůstem.

4.1.3 Maximální výkon

Momentová charakteristika trakčního motoru typu 3942 K/4 (motory pro jednotku 7Ev) ze zdroje [59] uvádí nominální kroutící moment 1960 Nm (odečteno z grafu) konstantní až do

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

1660 ot./min., odkud dál hyperbolicky klesá. Asynchronní motory lze chvilkově přetěžovat. V nominálních otáčkách lze motor přetížít až na 3780 Nm (to odpovídá zhruba 652 kW). Toto přetížení je pro motor nepříznivé, a to z důvodů vzniku vysokých teplot nebo např. nižší účinnosti. Na obr. 22 je graf zhotovený podle [59].



Obr. 22 - Graf závislosti výkonu na otáčkách motoru 3942 K/4

Vzhledem k rozdílu nominálního a maximálního výkonu by bylo vhodné pro výpočet zvolit hodnotu uprostřed. Je proto tedy zvolena hodnota 420 kW, která je uvedena v [58] jako maximální a má mezní rychlost 46 km/h. Hodnota nominálního výkonu bude překračována jen chvilkově, což je pro motory nezávadné (viz kap. 6.3). Pro přiblížení výpočtů realitě bude uvažována 97% účinnost nápravové převodovky.

Výpočtový výkon 2444,4 kW bude platit pro obě jednotky v režimu jízdy jedoucí pod trolejovým vedením, zatím co pro těžší vozidlo BEMU v „beztrolejovém“ režimu bude výkon 1248,4 kW (viz kap. 2.5.4) a pro lehčí jednotku to bude 970 kW (viz kap. 2.5.8).

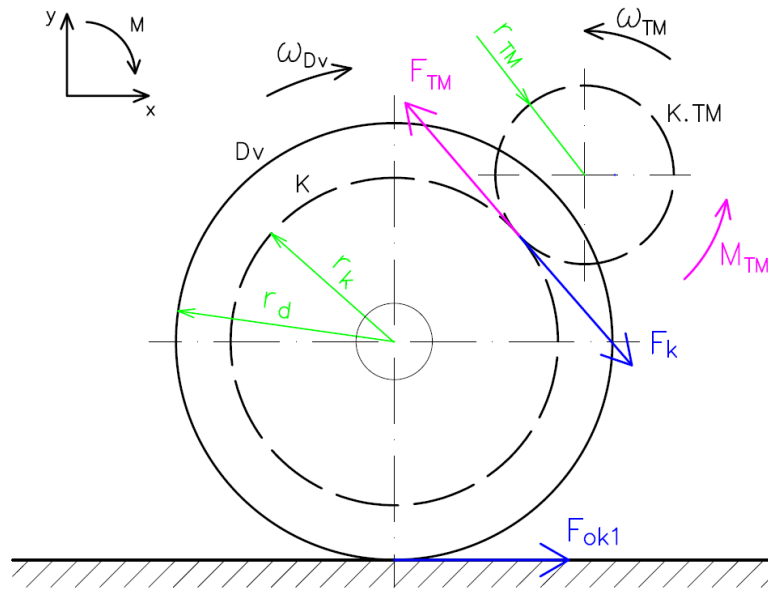
4.1.4 Porovnání parametrů trakčního motoru

Bude-li uvažována tažná síla pro elektrickou jednotku uvedenou v kap. 4.1.2 (174 kN) a výkon motorů uvedený v 4.1.3 (6x 420 kW), je vhodné posoudit, jak budou trakční motory zatíženy. To bude posuzováno s momentovou charakteristikou uvedenou v [59]. Aby byla zjištěna, jaký má daná tažná síla vliv na zatížení motorů, je nutné vypočítat si tažnou sílu z momentové charakteristiky trakčního motoru a následně ji porovnat se zvolenými parametry. Pro výpočet je vzorec dále odvozen. Dle obr. 23 je zavedena rovnice statické rovnováhy (5) (pro dvojkolí), (6) (pro trakční motor) a (7) (vnitřní účinky dle zákona akce a reakce).

$$F_k \cdot r_k - F_{ok1} \cdot r_d = 0 \quad (5)$$

$$F_{TM} \cdot r_{TM} - M_{TM} = 0 \quad (6)$$

$$F_k - F_{TM} = 0 \quad (7)$$



Obr. 23 - Rozbor přenosu sil ozubeným převodem;

Legenda: Dv – dvojkolí, K – ozubené kolo na nápravě, K. TM – ozubené kolo trakčního motoru

Z rovnic (5), (6) a (7) je po úpravách získána rovnice (8).

$$F_{ok1} = \frac{M_{TM}}{r_d} \cdot \frac{r_k}{r_{TM}} \quad (8)$$

Dále je možno zavést převodový poměr s použitím vzorce $d_i = m_o \cdot z_i$. Získaná rovnice má tvar

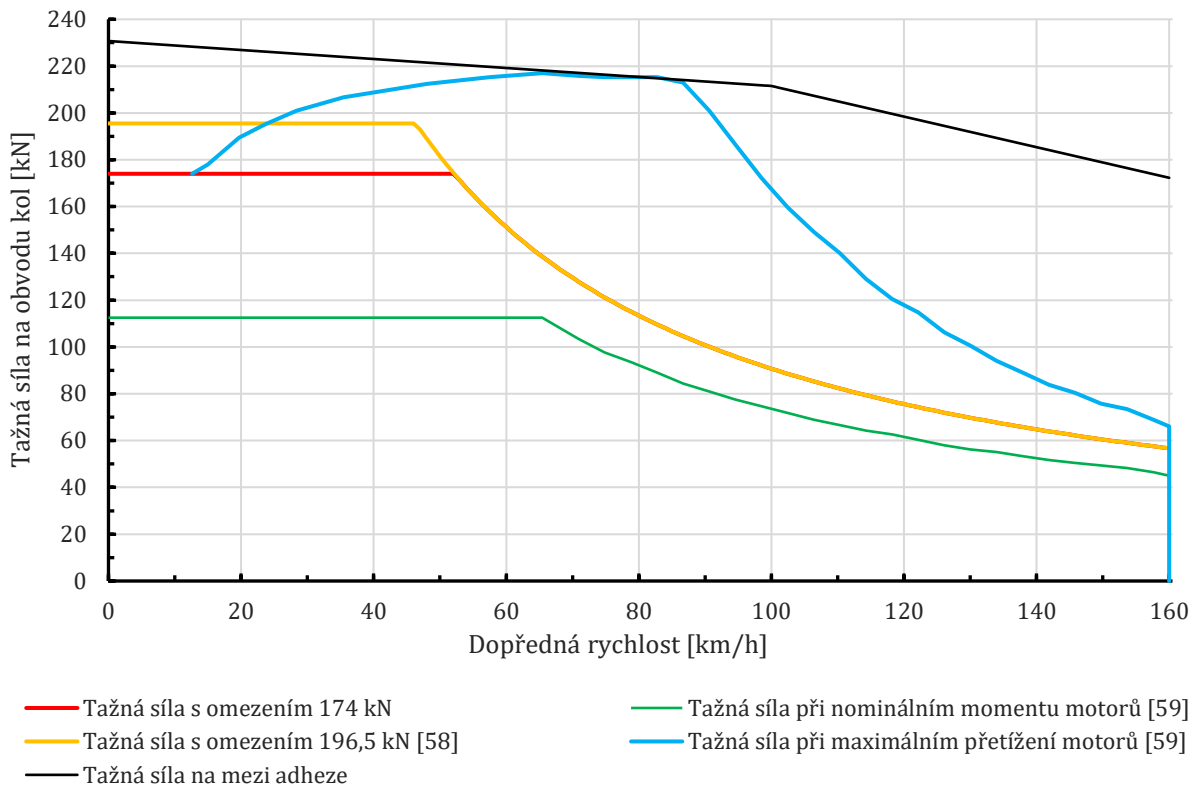
$$\frac{r_k}{r_{TM}} = \frac{z_k}{z_{TM}} = i. \quad (9)$$

Je nutné podotknout, že ve skutečnosti je tažná síla snížena o účinnost ozubeného převodu. Tuto účinnost lze vzhledem k výpočtům zanedbat. Výsledný vzorec má tedy následující podobu:

$$F_{ok1} = \frac{M_{TM}}{r_d} \cdot i. \quad (10)$$

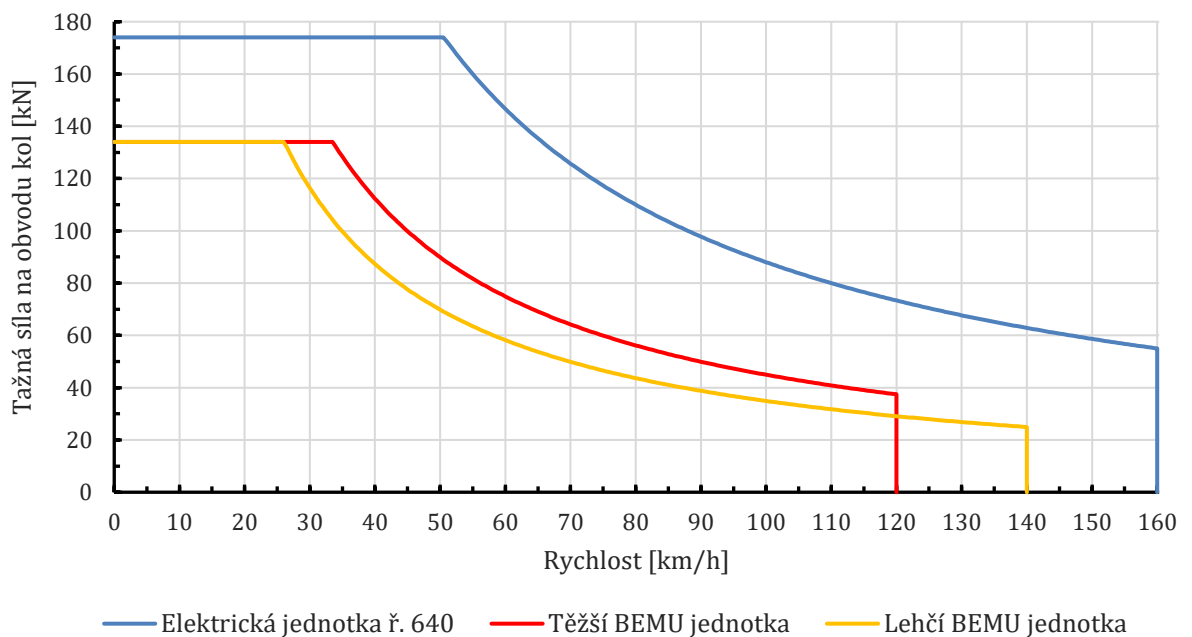
Výsledné křivky je možno vidět na obr. 24. Tažná síla při nominálním momentu motorů je znázorněna zelenou křivkou a při maximálním momentu motorů modrou křivkou. Dále je zde vidět žlutou křivku, která značí trakční charakteristiku s tažnou silou použitou ze zdroje [58] a trakční charakteristiku červenou s tažnou silou uváděnou zástupcem výroby vozidla.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



Obr. 24 – Porovnání trakčních charakteristik jednotky ř. 640

Z obr. 24 je vidět, že zvolená tažná síla 174 kN je vhodnou volbou, protože zde nedochází k výraznému zatěžování motorů na maximální přetížení; pouze při rozjezdu, a to jen na krátkou chvíli. Zároveň se nachází nad křivkou nominálního zatížení, což má sice za následek horší účinnost (tudíž větší spotřebu), ale také větší tažnou sílu (větší zrychlení → zkrácení jízdní doby).



Obr. 25 – Porovnání trakčních charakteristik jednotlivých jednotek

4.1.5 Porovnání trakčních charakteristik jednotlivých vozidel

Doted' byla řešena pouze trakční charakteristika elektrické jednotky řady 640. Nyní však už jsou vypočtené všechny potřebné hodnoty pro sestavení trakčních charakteristik všech „simulačních“ vozidel. Výsledné křivky se nachází na obr. 25. Jsou tam znázorněny trakční charakteristiky těžšího (červeně) a lehčího (žlutě) vozidla BEMU v akumulátorovém režimu a elektrické jednotky 7Ev (modře). Maximální rychlost v tomto případě není důležitá.

4.2 Výpočet součinitele rotačních hmot

Pro snazší výpočet je vlak zjednodušen na hmotný bod. Pohybuje-li se tento vlak/bod rychlostí v (např. pomocí tažné síly, tlačné síly od postrkové lokomotivy, jízdou ze spádu atd.), jeho kinetická energie je dána především posuvným pohybem. Na vozidle se ale nachází části, které zároveň konají rotační pohyb. Hmotnost ani úhlová rychlost těchto částí není zanedbatelná, tudíž ani jejich kinetickou energii z rotačního pohybu nemůžeme zanedbat. Celková kinetická energie vozidla je tedy vyjádřena jako součet energie posuvného pohybu a energie rotačního pohybu

$$E_k = E_{k,pos} + E_{k,rot}. \quad (11)$$

Energie posuvného pohybu je dána hmotností celého vozidla, zatímco rotační části jsou hlavně dvojkolí a rotor elektromotoru (ozubená kola a další komponenty jsou s těmito tělesy svázaná a lze je považovat za jejich součást). Tuto problematiku lze popsat dle rovnice (12).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v^2 + \sum_{(i)} \frac{1}{2} \cdot J_i \cdot \omega_i^2 \quad (12)$$

Ve výpočtech je moment setrvačnosti J_d uvažován včetně rotorů trakčních motorů a dvojkolí; jedná se o redukovanou hodnotu vypočtenou k ose rotace dvojkolí. Lze tedy rovnici (12) psát v jednodušším tvaru

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v^2 + N_d \cdot \frac{1}{2} \cdot J_d \cdot \omega_d^2. \quad (13)$$

Bude-li předpokládáno valení bez skluzu, může být rovnice (13) vyjádřena ve tvaru (14).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v^2 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot N_d \cdot J_d}{d^2 \cdot m_v}\right) \quad (14)$$

V rovnici (14) je následně zavedeno

$$\frac{4 \cdot N_d \cdot J_d}{d^2 \cdot m_v} = \rho_{vl}, \quad (15)$$

čímž je získán tzv. součinitel rotačních hmot, který je důležitý pro výpočet pohybové rovnice vlaku (viz kap. 5.1), protože značně ovlivňuje setrvačnou hmotnost vozidla.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Pro soupravy se stejným počtem náprav stejného typu (jako případ této práce), je možné vhodnou úpravou rovnice (15) dopočítat součinitel rotačních hmot vlaku (BEMU) dle (16) a (17).

$$\frac{4 \cdot N_d \cdot J_d}{d^2} = \rho_{ej} \cdot m_{ej} = \rho_{be} \cdot m_{be} \quad (16)$$

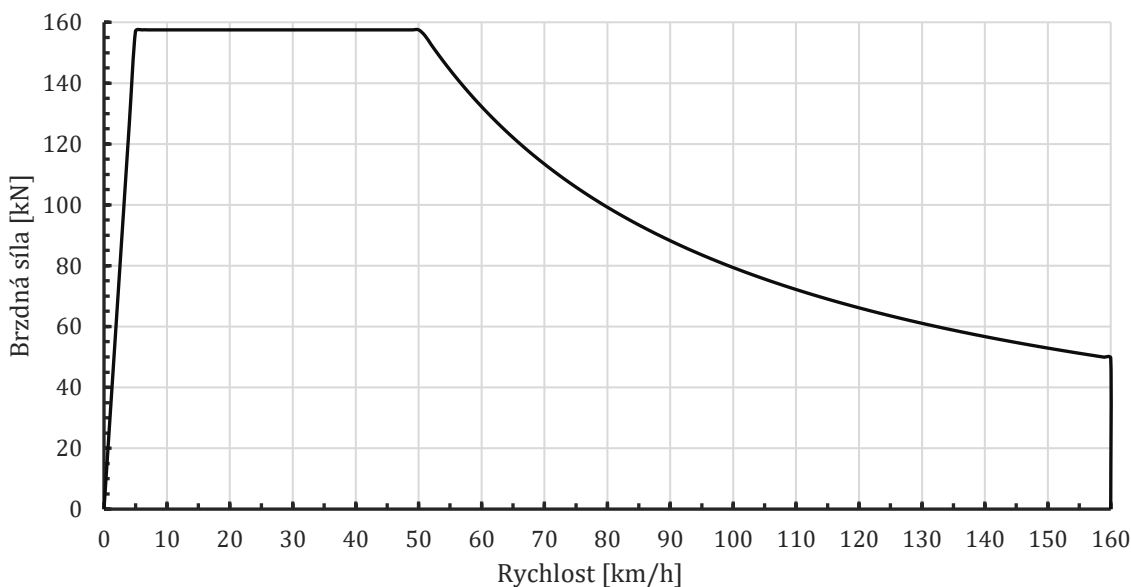
$$\rho_{be} = \frac{\rho_{ej} \cdot m_{ej}}{m_{be}} \quad (17)$$

Je-li předpokládán již zmíněný součinitel rotačních hmot pro elektrické vozidlo 0,080, dle rovnice (17) vychází pro těžší vozidlo BEMU 0,074 a pro lehčí vozidlo to činí 0,077.

4.3 Elektrodynamická brzda

Elektrodynamická brzda je jedna z moderních trendů železnice ať už tím, že nedochází k opotřebení mechanické části brzdy nebo tím, že dokáže zpět vyrábět elektrickou energii. V našem případě se uplatní na všech jednotkách brzda rekuperační, která umožní vrácení elektrické energie zpět buď do trolejového vedení (v případě jízdy v závislé trakci) nebo do zásobníků energie (případ BEMU z Rudoltic v Č. do Lanškrouna).

Zdroj [58] udává maximální výkon EDB při rekuperaci 2205 kW a maximální brzdnu sílu 157,5 kN. Brzda se dá využít pouze do rychlosti 5 km/h, protože na další brzdění již nemají trakční motory dostatečnou sílu. Brzdná charakteristika uvedená na obr. 26 je uvažována stejná pro všechna vozidla v trakčních výpočtech.



Obr. 26 – Brzdná charakteristiky EDB

4.4 Shrnutí údajů potřebných k výpočtu

Pro přehlednost získaných údajů k výpočtu slouží tab. 4. Účinnosti jsou uvedené v kap. 5.7 a 5.8.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Tab. 4 – Shrnutí údajů obou jednotek

Technické údaje			Jednotka ř. 640	Těžší jednotka BEMU	Lehčí jednotka BEMU
Provozní hmotnost		[t]	160	174	167
Délka vlaku		[m]	79,4	79,4	79,4
Maximální rychlost		[km/h]	160	160 (120 B. R.)	160 (140 B. R.)
Součinitel rotačních hmot		-	0,080	0,074	0,077
Maximální výkon	E. R.	[kW]	2444,4	2444,4	2444,4
	B. R.	[kW]	-	1248,4	970
Maximální tažná síla	E. R.	[kN]	174	174	174
	B. R.	[kN]	-	134	134
Maximální výkon EDB		[kW]	2205	2205	2205
Maximální brzdná síla EDB		[kN]	157,5	157,5	157,5

5 Trakční výpočty obou jednotek

Pro správný a přesný výpočet je nejprve nutné stanovit platné podmínky, za kterých budou výpočty provedeny. Pro výpočet byl zvolen spěšný a osobní vlak.

Spěšný vlak zastavuje ve stanicích přesně podle tab. 5, osobní vlak zastavuje ve všech následujících stanicích a zastávkách: Pardubice hl. n., Pardubice – Pardubičky, Pardubice – Černá za Bory, Kostěnice, Moravany, Uhersko, Sedlíštko, Zámorsk, Dobříkov u Chocně, Sruby, Choceň, Brandýs nad Orlicí, Ústí nad Orlicí, Ústí nad Orlicí – město, Dlouhá Třebová, Česká Třebová, Třebovice v Čechách, Rudoltice v Čechách a Lanškroun. Osobní vlak se též řídí dle tab. 5, přičemž ve zbylých stanicích neuvedených v tab. 5 se počítá jízda po správné hlavní koleji (tedy první nebo druhé) až na dvě výjimky, kterými jsou Uhersko a Zámorsk. V těchto dvou stanicích jede osobní vlak do odbočky, protože se nástupiště nenachází u hlavních kolejích.

Tab. 5 - Popis jízdy vlaků

Kolej	Relativní km	Název stanice	Relativní km	Kolej
1.	0,00	Pardubice hl. n.	77,80	2.
1.	34,72	Choceň	43,15	2.
1.	49,28	Ústí n. Orlicí	28,57	2.
12.	59,95	Česká Třebová	17,91	16.
1.	65,94	Třebovice v Č.	11,89	2.
(bez TNS) 8.	73,73	Rudoltice v Č.	4,12	8. (bez TNS)
(bez TNS) 3.	77,82	Lanškroun	0,00	3. (bez TNS)

Relativní kilometr v tab. 5 udává čelo vlaku v místě zastavení. Jedná se o místa nejvhodnější k nástupu a výstupu cestujících (tj. u podchodů, přechodů apod.). Zvolený rychlostní profil odpovídá jízdě při nedostatku převýšení 130 mm podle [60].

Výpočet ve směru Pardubice hl. n. – Lanškroun (BEMU)

Aktuálně se nachází 8. kolej v Rudolticích bez trolejového vedení, které končí v 73,54 km (traťově 14,04 km – tj. 12. výhybka). Ve výpočtech polozávislé trakce je uvažováno, že strojvedoucí stáhne sběrač 70 m (tj. cca 6 s) před návěstí označující jízdu na kolej bez trolejového vedení (poloha výhybky a návěstí je pro výpočet stejná).

Pro udržení konstantní rychlosti v této části tratě je zapotřebí brzdit, takže se zde neuplatní jízda výběhem. Pouze v této části nebude vozidlo schopno rekuperace, a to minimálně po dobu přepínání napájení – je uvažováno 30 sekund od stažení sběrače.

Výpočet ve směru Lanškroun – Pardubice hl. n. (BEMU)

Při jízdě v tomto směru je zřejmé, že rozjezd z Rudoltic v Čechách z 8. koleje bude bez trolejového vedení. Po projetí celého vlaku výhybkou č. 12, strojvedoucí začne zdvihát sběrač, a zároveň se začne odpočítávat doba na přepnutí napájení (tj. 30 s). Vlak přestává vyvíjet tažnou sílu a jede výběhem (kap. 5.5). Kilometrické polohy byly čerpány ze zdroje [60].

5.1 Pohybová rovnice vlaku

Pohybová rovnice vlaku musí vyhovovat druhému Newtonovu zákonu, který je v matematické podobě dán

$$m \cdot \ddot{x} = \sum F_x. \quad (18)$$

Jak již bylo zmíněno v kap. 4.2, pohyb vlaku je zjednodušen na hmotný bod, který se pohybuje pouze v ose x . Vlivy nepřímé koleje jsou zohledněny pomocí odporů. Je-li rovnou zaveden součinitel rotačních hmot, výsledná pohybová rovnice vlaku je dána rovnicí (19).

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B - O_V - O_T \quad (19)$$

Z toho vyplývá, že se jedná o lineární diferenciální rovnici, která se dá řešit analyticky. Jenže vzhledem k obsáhlosti výpočtů a složitosti jednotlivých složek sil, se jeví jako jednodušší zvolit numerické řešení.

Pro výpočet pomocí numerického řešení byl zvolen integrační krok $\Delta l = 10$ m. Tato volba je velmi důležitá, protože ovlivňuje přesnost výsledku. Výpočet byl proveden v programu MS Excel.

5.2 Jízdní odpory

Jízdní odpory jsou takové složky síly, které působí proti pohybu vlaku, čímž znatelně ovlivňují zrychlení a spotřebovanou energii. Dělí se do dvou základních skupin:

- vozidlové odpory,
- traťové odpory.

Výsledná velikost jízdních odporů je poté dána součtem obou hodnot

$$O_j = O_v + O_t. \quad (20)$$

5.2.1 Vozidlové odpory

Vozidlové odpory jsou dány především konstrukcí a technickým stavem vozidla. V případě moderních vozidel a kvalitních tratí se nejvíce projevují následující odpory:

- odpor z valení,
- odpor v ložiskách,
- odpor prostředí.

Pro trakční výpočty jsou těžko použitelné, protože to vyžaduje pokročilou znalost vozidla a složitější výpočty. Je vhodné tedy zavést jednodušší vzorce pro měrný vozidlový odpor. Zdroj [61] uvádí výsledky měření, ze kterých vyplývá vzorec

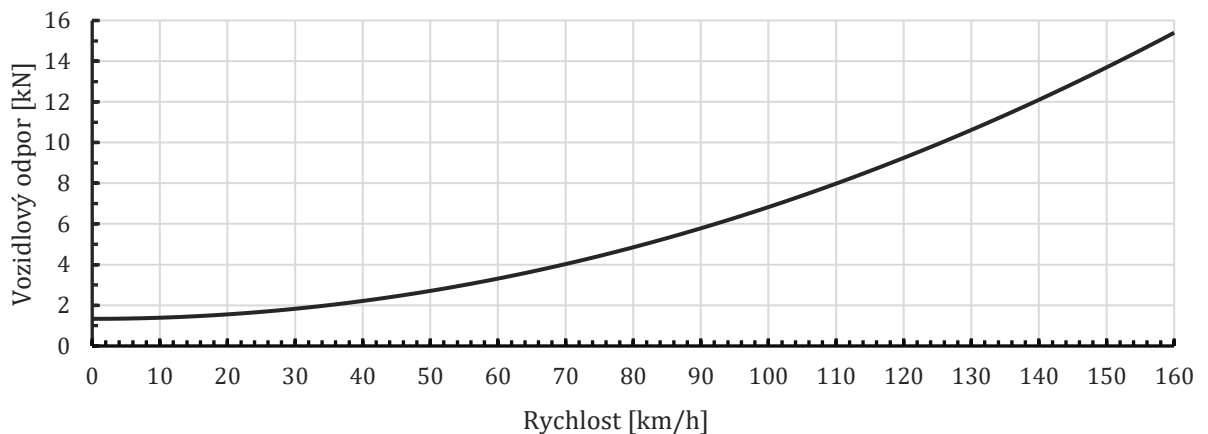
$$o_v = 0,85 + 0,00035 \cdot V^2. \quad (21)$$

Do pohybové rovnice (19) je nutno dosadit odpor v absolutním tvaru

$$O_v = o_v \cdot M_{vt} \cdot g, \quad (22)$$

protože celá rovnice počítá s absolutními tvary.

Měrný tvar je v jednotkách [N/kN]; rovnicí (22) je převeden na tvar absolutní, přičemž výsledek je v [N]. Obr. 27 je důkazem existence aerodynamického odporu závislého na druhé mocnině rychlosti.



Obr. 27 – Graf průběhu vozidlového odporu jednotky ř. 640

5.2.2 Traťové odpory

Další jízdní odpor vyvolávají projevy koleje. Pokud by byla kolej dokonale rovná ve všech rovinách, teoreticky by žádný traťový odpor neexistoval. Ve skutečnosti to však není možné, existují tedy dva základní odpory:

- odpor z jízdy obloukem koleje,
- odpor z jízdy do stoupání/klesání.

Jednotlivé odpory se dají celkem jednoduše určit (vypočítat), jenže při aplikaci na delší traťový úsek by to bylo neefektivní. Proto se zavádí náhradní a redukovaný sklon. Náhradní sklon je prakticky měrný traťový odpor, vypočten dle rovnice (23).

$$s_n = o_t = o_s + o_R \quad (23)$$

Náhradní sklon se mění s každou změnou jednotlivého odporu. Lze ho proto přepočítat na určitý úsek, tedy na redukovaný sklon – průměrný traťový odpor na určitém úseku, který obsahuje všechny jeho složky. Lze vypočítat podle vzorce (24). [62]

$$s_{red} = \frac{\sum_{(i)} s_{n,i} \cdot l_i}{\sum_{(i)} l_i} \quad (24)$$

Hodnoty redukovaného sklonu se dají najít v TTP [60]. Při výpočtech bylo vycházeno z přesnějších dat od Správy železnic.

Zohlednění délky vlaku

Pokud vlak vjíždí do úseku, kde se mění traťový odpor (redukovaný sklon), je třeba zohlednit délku vlaku, protože v každém kroku Δl má různá část soupravy různý traťový odpor. Absolutní tvar odporu je dán hmotností; je proto vycházeno z hmotnosti vlaku na jednotku délky

$$M_j = \frac{M_{vl}}{l_{vl}}. \quad (25)$$

V případě ucelené jednotky, s rovnoměrně rozloženou hmotností lze výsledný odpor O_T rozepsat jako součet traťových odporů každé části soupravy na daném úseku Δl v dané poloze vlaku dle rovnice (26).

$$O_T = \sum_{i=1}^{n_{vl}} s_{n_{vl}-i} \cdot \Delta l \cdot M_j \cdot g \quad (26)$$

5.2.3 Jízda vlaku tunelem

V uvedeném výpočtovém úseku je jeden tunel. Při jízdě tunelem je vzduchový sloupec hrnut před vlakem; vzniká tím větší aerodynamický odpor. Pro jeho výpočet se používá tzv. tunelový faktor, který se projevuje zvýšením aerodynamického odporu. Jeho zavedení je vidět v rovnici (27).

$$o_v = 0,85 + \tau \cdot 0,00035 \cdot V^2 \quad (27)$$

Pro výpočet byl tunelový faktor zvolen $\tau = 2$.

5.3 Zrychlování vlaku

Aby došlo k zrychlování vlaku, musí buď vyvíjet tažnou sílu nebo jet z dostatečně velkého spádu. Rovnice (19) poté přechází do tvaru (brzdná síla je nulová):

$$\ddot{x} = \frac{F_{ok} - O_V - O_T}{m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl})} \quad (28)$$

Při numerickém řešení se jednotlivé úseky počítají s konstantním zrychlením. Vychází se vždy ze znalosti rychlosti z konce předchozího úseku (při rozjezdu je $V = 0$ km/h). Maximální využitelná tažná síla je uvedena v kap. 4.1.1. Po vyřešení diferenciální rovnice (29), s integračními mezemi uvedenými v (30), je možné dle vzorce (31) vypočítat rychlost na konci úseku.

$$\ddot{x}_i = v \cdot \frac{dv}{dx} \quad (29)$$

$$\ddot{x}_i \cdot \int_0^{\Delta l} dx = \int_{v_i}^{v_{i+1}} v \cdot dv \quad (30)$$

$$v_{i+1} = \sqrt{2 \cdot \ddot{x}_i \cdot \Delta l + v_i^2} \quad (31)$$

Čas, za který je dílčí úsek překonán, byl odvozen ze vzorce (32) s mezemi v (33), čímž byl získán výsledný tvar (34).

$$\ddot{x}_i = \frac{dv}{dt} \quad (32)$$

$$\ddot{x}_i \cdot \int_0^{\Delta t_i} dt = \int_{v_{i-1}}^{v_i} dv \quad (33)$$

$$\Delta t_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\ddot{x}_{i-1}} \quad (34)$$

5.4 Jízda vlaku konstantní rychlostí

Jízdě vlaku konstantní rychlostí odpovídá nulové zrychlení. Pro udržení konstantní rychlosti je nutné překonávat jízdní odpory. Pohybová rovnice vlaku má poté tvar:

$$F_{ok} = B + O_V + O_T. \quad (35)$$

Stálá rychlost je udržována tažnou (36) nebo brzdnou (37) silou (dle velikosti jednotlivých odporů).

$$F_{ok} = O_V + O_T \quad (36)$$

$$B = -O_V - O_T \quad (37)$$

Čas k překonání jednotlivých úseků je dán primitivním vztahem (38).

$$\Delta t_i = \frac{\Delta l}{v_i} \quad (38)$$

5.5 Jízda vlaku výběhem

Jízda vlaku výběhem je jízda bez působení tažné či brzdné síly. Tažná síla je tedy nulová a rovnice zrychlení (28) přechází do tvaru:

$$\ddot{x} = \frac{-O_V - O_T}{m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl})} \quad (39)$$

Pokud tedy není traťový odpor dostatečně záporný, bude zrychlení záporné (tzv. odrychlení); vlak bude zpomalovat. Rychlost byla vypočtena podle (31) a čas dle (34).

5.6 Zpomalování vlaku

Ke zpomalování vlaku dochází ve dvou případech. Buď přestává vyvíjet tažnou sílu a začíná brzdit nebo vyvíjí nedostatečně velkou tažnou sílu a jízdní odpory působící proti pohybu jsou větší (tato varianta zde nenastává). Výpočet potřebné brzdné síly je poté

$$B = -O_V - O_T - m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x}. \quad (40)$$

Potřebné chybějící odrychlení bylo zvoleno v souladu s předpisem ČSD V7 [63] jako

$$\ddot{x} = -0,45 \text{ m/s}^2. \quad (41)$$

Čas byl vypočten dle vzorce (34).

5.7 Jízdní doba a spotřeba trakční energie

Jízdní doba

Celková jízdní doba je dána součtem všech časů jednotlivých úseků dle (42).

$$t_c = \sum_{(i)} \Delta t_i \quad (42)$$

Spotřebovaná energie

Pro výpočet spotřeby energie je zapotřebí znát skutečnou vynaloženou tažnou sílu. Ta je dána rovnicí

$$F_{ok} = m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} + O_V + O_T. \quad (43)$$

Ta se aplikuje v délce trasy, kde je využita (tzn. kde vlak nebrzdí nebo nejede výběhem). Jsou tím získány hodnoty $F_{\Delta l}$ pro daný úsek Δl . To lze dále přepočítat na vykonanou práci dle vzorce (44).

$$\Delta W_F = \frac{F_{\Delta l} \cdot \Delta l}{3,6 \cdot 10^6} \quad (44)$$

Výsledná spotřebovaná energie je poté dána součtem všech dílčích prací se zahrnutím účinnosti. Účinnost je zvolena dle kap. 5.9. Výpočet se provede podle (45).

$$E_F = \frac{\sum_{(i)} \Delta W_{Fi}}{\eta} \quad (45)$$

5.8 Rekuperovaná energie

Zbývá dopočítat energii, která je pomocí rekuperace vrácena zpět do trolejového vedení nebo do zásobníků energie. Potřebná brzdná síla byla vypočtena z rovnic (37) a (40). Ve výpočtech byla snaha pokrýt co nejvíce brzdícího účinku brzdou EDB s rekuperací; bylo tedy počítáno dle křivky uvedené na obr. 26. V případě, kdy brzdící účinek EDB nestačí, bylo předpokládáno, že zbylou část pokryje pneumatická třecí brzda.

$$\Delta W_B = \frac{B_{\Delta l} \cdot \Delta l}{3,6 \cdot 10^6} \quad (46)$$

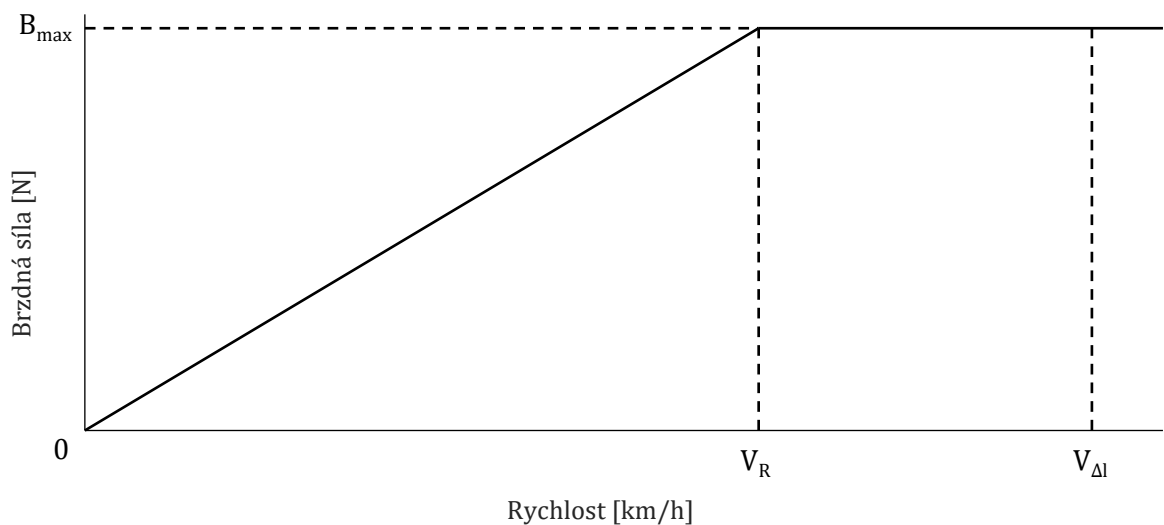
Podle vzorce (46) byla vypočtena práce vykonaná brzdou silou pomocí EDB. V numerickém výpočtu však nastává problém při rychlosti < 5 km/h. Délka integračního kroku nestačí. V posledním integračním kroku (před zastavením) byla tedy brzdná práce $W_{\Delta l}$ při B_{\max} poměrově (dle rychlostí V_R a $V_{\Delta l}$) rozdělena na dvě části, které dělí V_R . Nepotřebná část byla oddělena (vydělením dvěma) a sečtena se zbylou částí. K tomuto výpočtu lépe poslouží obr. 28, pokud je práce jako plocha pod křivkou.

Je nutné tedy nejdříve simulovat jízdu s plnou brzdou silou B_{\max} , která udá energii $W_{\Delta l}$. Rychlost $V_{\Delta l}$ je na začátku posledního kroku před zastavením. Tyto údaje byly dosazeny do vzorce (47), který je odvozen z obr. 28.

$$\Delta W_B = W_{\Delta l} \cdot \left(1 - \frac{V_R}{2 \cdot V_{\Delta l}}\right) \quad (47)$$

Bude-li všechna brzdá práce rekuperována, celková vrácená energie bude dána obdobně jako (45), pouze snížena o účinnost, kterou je uvažována dle kap. 5.9. Rovnice má poté tvar

$$E_B = \sum_{(i)} \Delta W_{Bi} \cdot \eta. \quad (48)$$



Obr. 28 – Pomocné schéma výpočtu rekuperované energie

Vlivem výše zmíněné redukce se energie vrácená zpět do trolejového vedení o nepatrný rozdíl snížila. Avšak pro zpřesnění výsledku a pro zdůraznění nemožnosti EDB brzdit do nulové rychlosti je to podstatné.

Rekuperovanou energii je možné odečíst od spotřebované a tím je získána celková energie, kterou je nutno zaplatit. Tuto záležitost popisuje rovnice (49).

$$E_C = E_F - E_B \quad (49)$$

5.9 Výpočet jednotlivých účinností

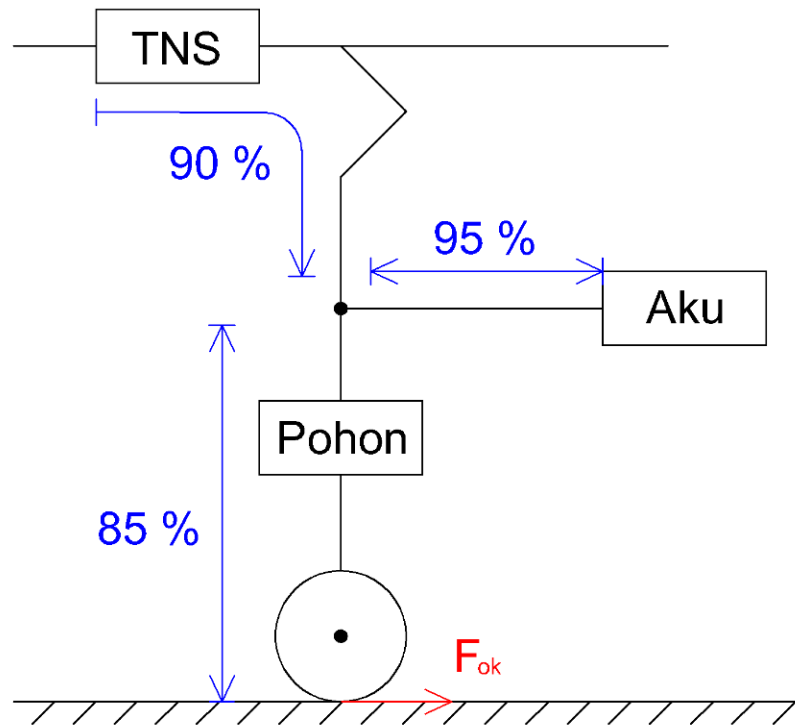
Pro přepočítání z práce na energii je nutné znát účinnost. Ta je ovšem jiná při napájení z trolejového vedení či zásobníků energie. Zdroj [20] udává, že účinnost z distribuční sítě 110 kV až na obvod kol přes zásobníky energie je přibližně 70 %. Pokud by byly vynechány zásobníky energie, účinnost by byla přibližně 80 %. Také je zde uvedeno, že uzavřený cyklus (nabíjení + vybíjení) LTO akumulátoru má účinnost kolem 90 %. Z těchto poznatků je možné sestavit obr. 29.

Obr. 29 je principiální schéma vozidla BEMU, na kterém jsou znázorněny jednotlivé účinnosti tak, aby přibližně vyhovovaly výše uvedeným hodnotám. Všechny jsou počítány k jednomu fiktivnímu uzlu „uprostřed“ vozidla. Účinnost z TNS je 90 %, protože vozidla jsou v tomto případě napájena 3 kV DC, přičemž lze předpokládat, že napájení střídavým proudem 25 kV by mělo nepatrně vyšší účinnost.

Pro náš výpočet jsou rozhodující celkem tři případy:

- TNS → Pohon: $0,90 \cdot 0,85 = 0,765$ (76,5 %); η_{TP}
- Aku → Pohon: $0,95 \cdot 0,85 = 0,808$ (80,8 %); η_{AP}
- TNS → Aku: $0,90 \cdot 0,95 = 0,855$ (85,5 %); η_{TA}

Tyto hodnoty byly dále uvažovány pro všechny jednotky i pro rekuperaci brzdné práce.



Obr. 29 – Schéma jednotlivých účinností vozidla BEMU

Vozidlo jedoucí na bateriový režim má ve skutečnosti účinnost danou jako

$$\eta_B = \eta_{TA} \cdot \eta_{AP} = 0,808 \cdot 0,855 \doteq 0,691 \text{ (69,1 \%)} \quad (50)$$

Je tedy zřejmé, že výsledná účinnost vozidla při jízdě po neelektrifikované trati je o 7,4 % nižší, než kdyby se daná trať elektrifikovala. Je zde nutné podotknout, že hodnota η_{TA} bude použita až při dobíjení akumulátorů z trolejového vedení, nikoli při jízdě z Rudoltic v Č. do Lanškrouna či naopak (nejedná-li se o výjimku k interpretaci výsledků spotřeby trakční energie – viz kap. 6).

6 Zhodnocení výsledků provedených výpočtů

Ve výsledcích jsou uvedeny hodnoty pro různé počítané trasy. Snahou bylo pokrýt různé procento délky neelektrifikovaného úseku na celkové délce trasy, protože BEMU vozidla mají při jízdě v neelektrifikovaném úseku jiné technické parametry. Jedná se o následující úseky:

- Pardubice hl. n. – Lanškroun (a naopak) = 5,5 %
- Choceň – Lanškroun (a naopak) = 10 %
- Ústí nad Orlicí – Lanškroun (a naopak) = 15 %
- Česká Třebová – Lanškroun (a naopak) = 24 %
- Rudoltice v Čechách – Lanškroun (a naopak) = 100 %

Uvedené procento je délka neelektrifikovaného úseku. Pro jízdu elektrické jednotky 7Ev je uvažována elektrifikace v celé délce trasy, tedy i úseku z Rudoltic v Č. do Lanškrouna.

Pro výpočet skutečné celkové spotřebované energie by bylo vhodné brát v potaz i spotřebu pomocných pohonů, jako je HVAC (heating, ventilating, air-conditioning), kompresor, čerpadlo, chlazení atd. To však není obsahem ani účelem této práce. Za zmínku to stojí pouze v případě, kde je zabýváno nabíjením a vybíjením akumulátorů (viz kap.6.5).

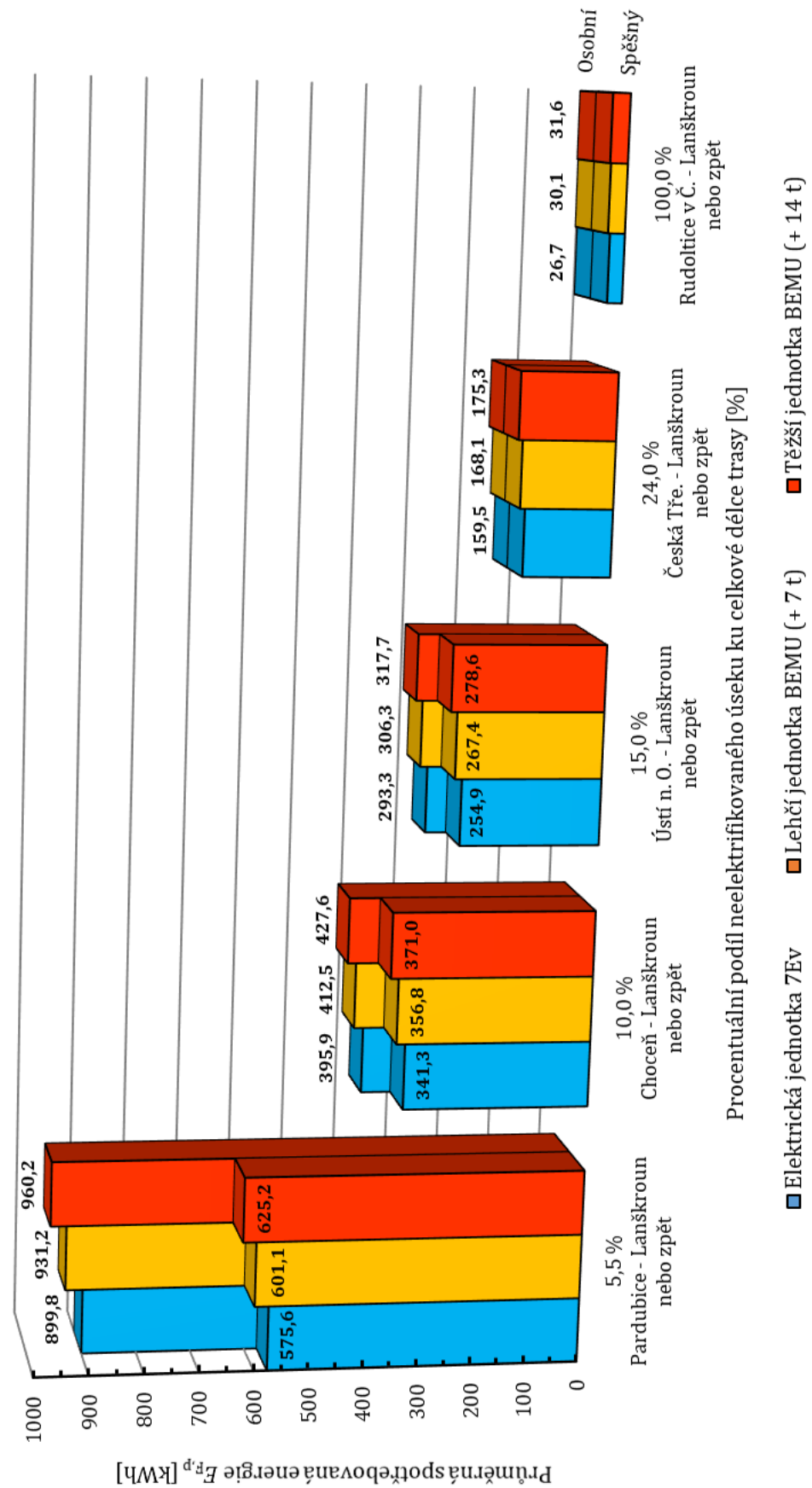
6.1 Přehled spotřeby trakční energie

Pro správnou interpretaci výsledků je nutné brát ohled na dobíjení akumulátorů. Pro přehled spotřeby trakční energie by bylo nevhodné použít dobíjení akumulátorů až při jízdě z Rudoltic směrem na Třebovice, protože by došlo ke zkreslení výsledků, pokud by byl vyhodnocován např. jenom úsek Rudoltice v Č. – Lanškroun. Je zřejmé, že energii do zásobníků je nutno doplnit (snad jen, že by se jednalo o poslední jízdu z celé životnosti vozidla). Zcela teoreticky je ovšem jedno, kdy to bude. Pro přehled spotřeby trakční energie je tedy uvažována celková účinnost η_B vozidla již při jízdě v neelektrifikovaném úseku.

Výsledky výpočtů pro „čistě“ spotřebovanou energii (tedy bez vlivu rekuperace) jsou uvedeny v obr. 30. Na svislé ose je uvedena průměrná spotřeba trakční energie $E_{F,p}$ tzn., že je vypočtena jako součet energií při jízdě do Lanškrouna, z Lanškrouna a vydělena dvěma. Eliminuje se tím vliv sklonu, a navíc se nepředpokládá, že by jednotky jezdili pouze v jednom směru. Obdobně jsou výsledky uvedeny na obr. 31, kde už je uvedena průměrná výsledná energie $E_{C,p}$ (tedy s vlivem rekuperace) vypočtená obdobně jako již zmíněná průměrná spotřeba trakční energie.

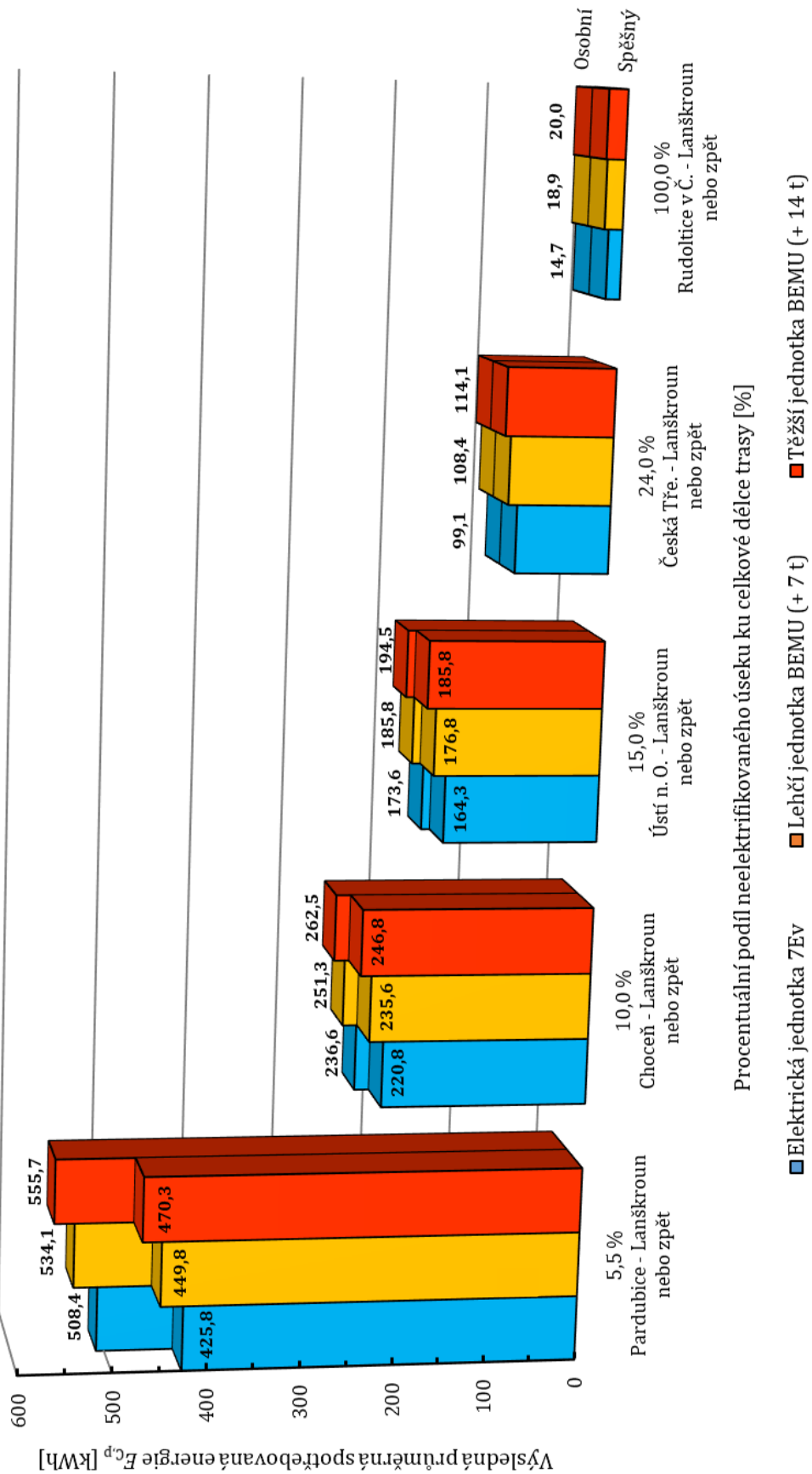
Za všimnutí stojí, že při použití brzdy EDB s rekuperací se energie u osobního vlaku průměrně sníží o 40 % a u spěšného vlaku o 34 %.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



Obr. 30 – Graf porovnávající průměrnou spotřebovanou trakční energii (bez rekuperace)

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



Obr. 31 - Graf porovnávající celkovou průměrnou spotřebovanou trakční energii (s rekuperací)

6.1.1 Měrná spotřeba trakční energie

Pro přehled, jak velká je spotřeba energie na jednoho člověka na ujetí jednoho kilometru, jsou zde uvedeny další grafy. Pro osobní vlak – obr. 32 udává měrnou trakční energii bez rekuperace převedenou na jednotky [kWh/oskm] a obr. 33 udává výslednou měrnou energii s použitím rekuperace. Pro spěšný vlak jsou zde obdobným způsobem uvedeny obr. 34 a obr. 35.

Dnes je paušální hodnota trakční energie vztažena k jednotce [kWh/1000tkm], resp. [Wh/tkm]. Právě proto jsou zde ještě uvedeny grafy, které jsou přepočteny na jednotku [Wh/tkm]. Pro osobní vlak to jsou obr. 36 a obr. 37. Pro spěšný vlak to potom jsou obr. 38 a obr. 39. Tyto hodnoty lze porovnat s hodnotami udávanými SŽ ve smlouvě o dodávkách trakční elektrické energie [64].

6.2 Jízdní doba

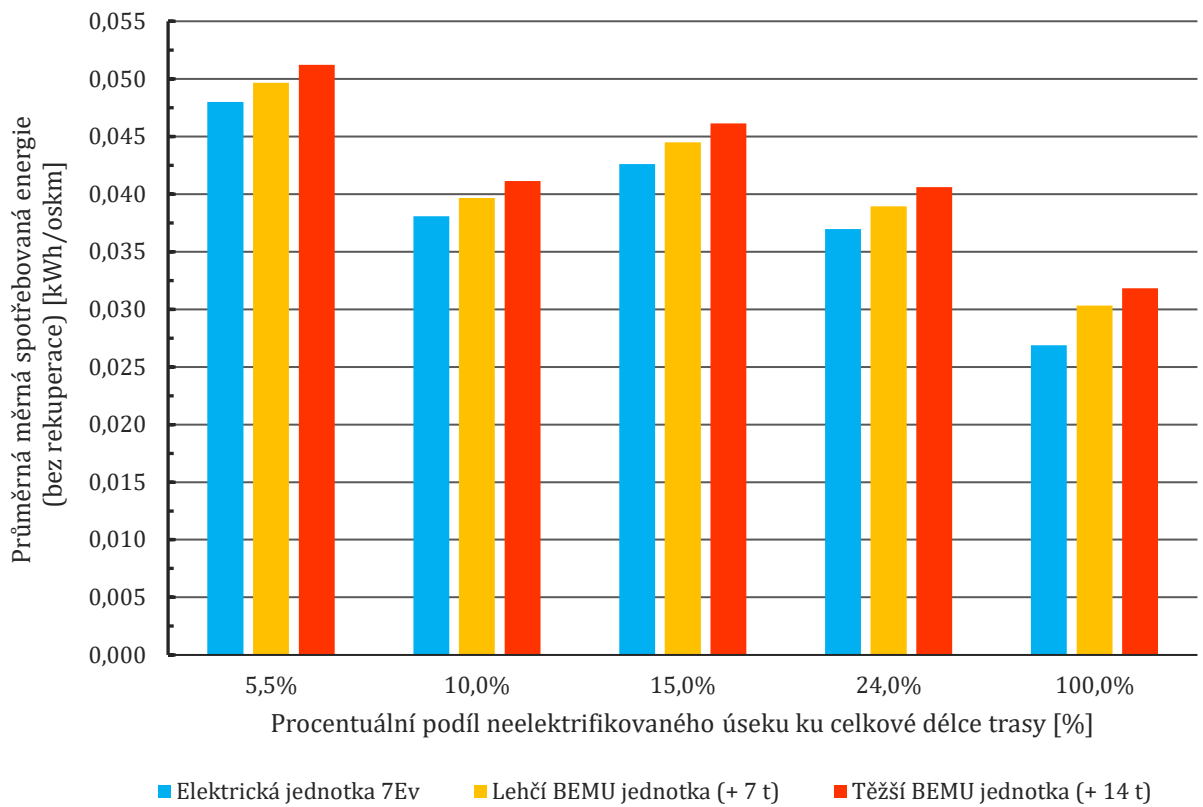
Dle sešitových jízdních řádů uvedených v [60] je průměrná jízdní doba osobního vlaku z Pardubic hl. n. do Lanškrouna 70,8 min. (lokomotiva řady 162 se soupravou tří osobních vozů do České Třebové a motorový vůz ř. 841 z České Třebové). Porovnání s trakčními výpočty je uvedeno na obr. 40. Ze stejného zdroje bylo vycházeno i pro výpočet spěšného vlaku, u kterého je jízdní doba 54,5 min. (jednotka ř. 661 do České Třebové a ř. 841 z České Třebové). Porovnání s výpočty je uvedeno na obr. 41. Je nutné podotknout, že na obrázcích se nachází pouze přímo vypočtené teoretické výsledky jízdních dob. Ve skutečnosti je k jízdním dobám (např. u jízdní doby dle sešitového jízdního řádu) připočtena přírážka. Všechny vypočtené hodnoty nezahrnují pobyty ve stanicích ani časy na přestup.

Přirážky k jízdním dobám

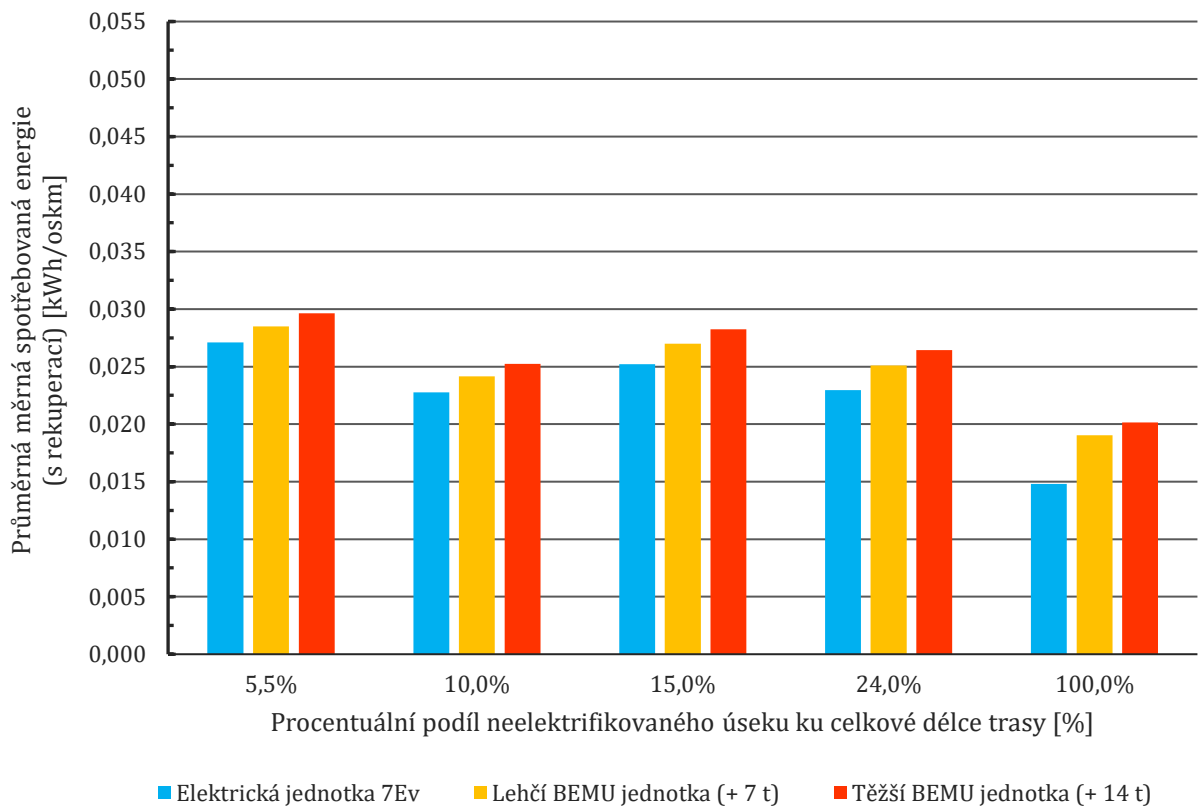
Přirážky k jízdním dobám souvisí hlavně se snahou eliminovat zpoždění. Ve vyhlášce UIC 451-1 [65], která je definována pro mezinárodní železnici, je pro elektrické jednotky s maximální rychlostí 160 km/h uvedena pravidelná přírážka. Ta činí minimálně jednu minutu na 100 ujetých kilometrů plus 4 % jízdní doby. Takto vypočtená přírážka pro celou trasu z Pardubic hl. n. do Lanškrouna pro osobní vlak vychází 3,4 minuty (těžší BEMU) a pro spěšný vlak 2,7 minut (těžší BEMU). Po přičtení těchto přírážek k vypočtené teoretické jízdní době činí celková jízdní doba 66,7 min. pro Os a 49,5 min. pro Sp. Nasazením těžších jednotek BEMU, je získané zkrácení jízdní doby 4,1 min. u Os a 5 min. u Sp oproti aktuálnímu provozu.

Rozdíly v jízdních dobách vypočtených jednotek jsou téměř zanedbatelné. Je zjevné, že nasazení novějších vozidel by přineslo kratší jízdní dobu (aktuálně je nutný přestup v České Třebové, který jízdní doby nezahrnují). Ovšem jestli to bude vozidlo BEMU nebo vozidlo pouze napájené z TNS, je z pohledu jízdních dob bezvýznamné.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

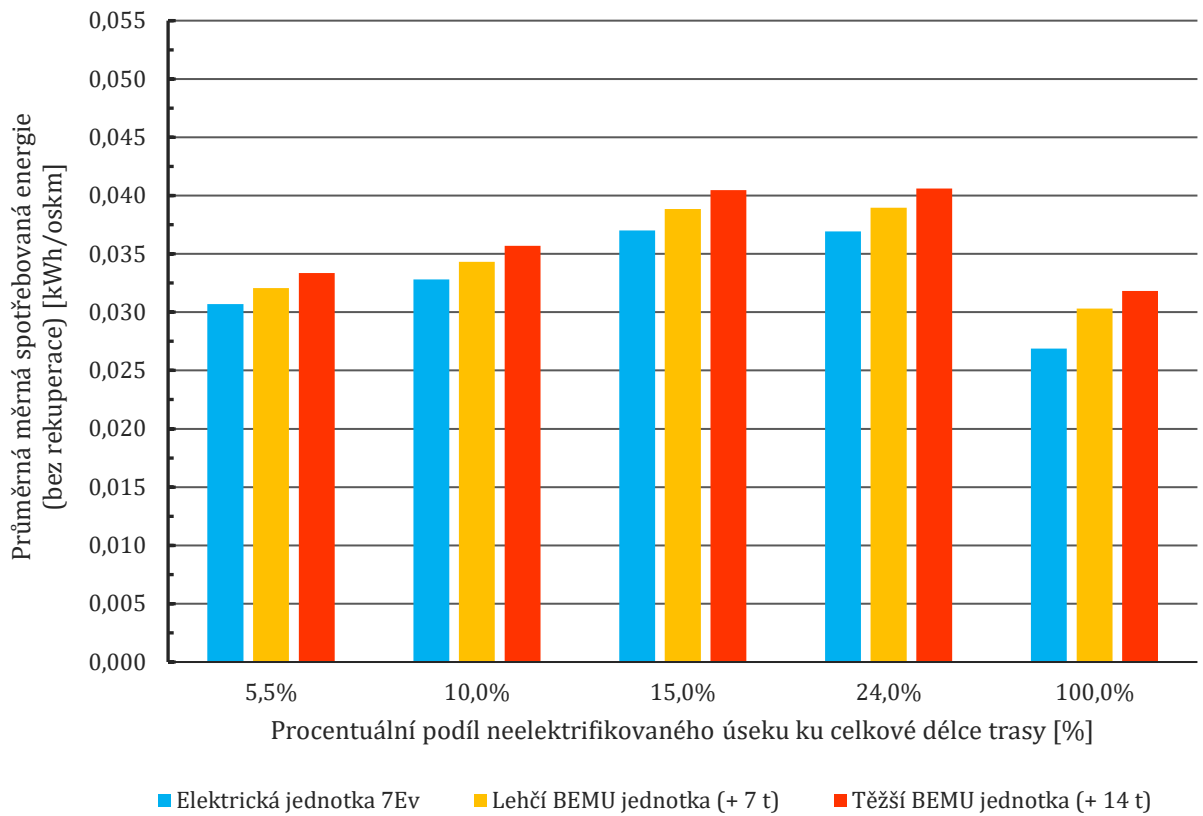


Obr. 32 – Graf udávající průměrnou měrnou spotřebovanou energii osobního vlaku [kWh/oskm]

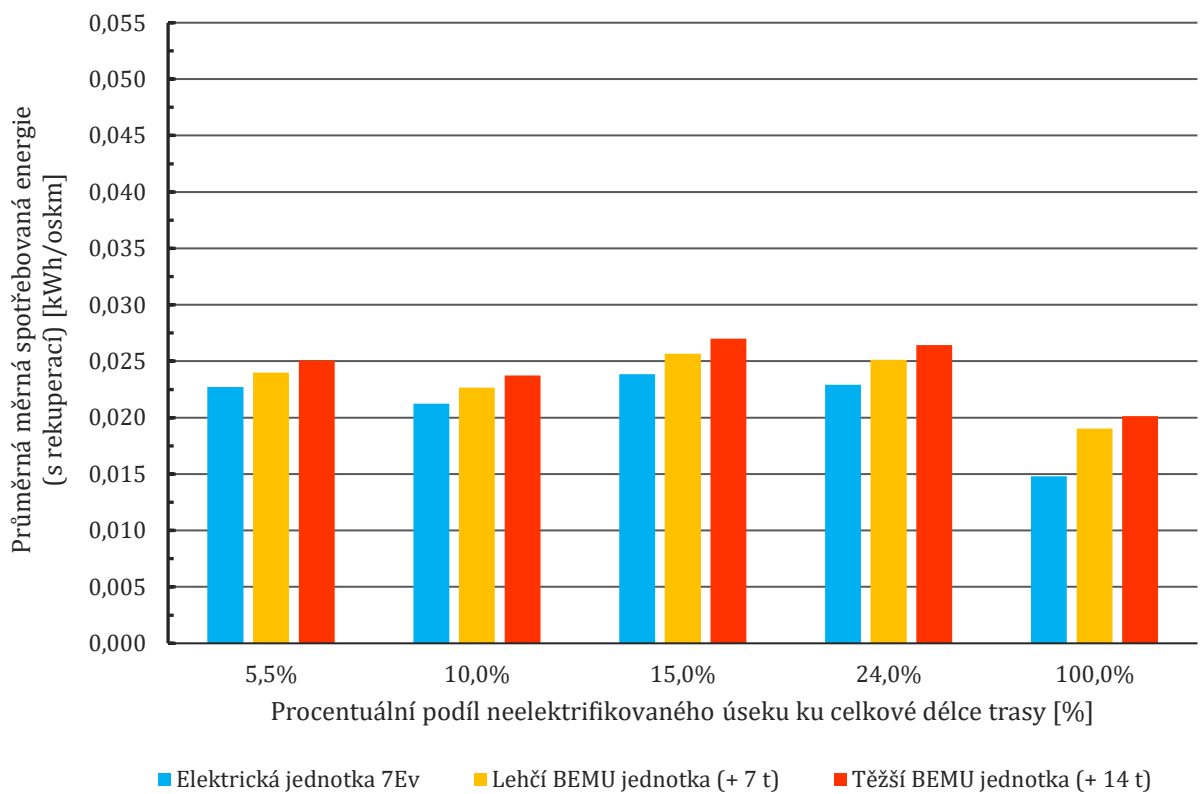


Obr. 33 - Graf udávající celkovou průměrnou měrnou energii osobního vlaku [kWh/oskm]

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

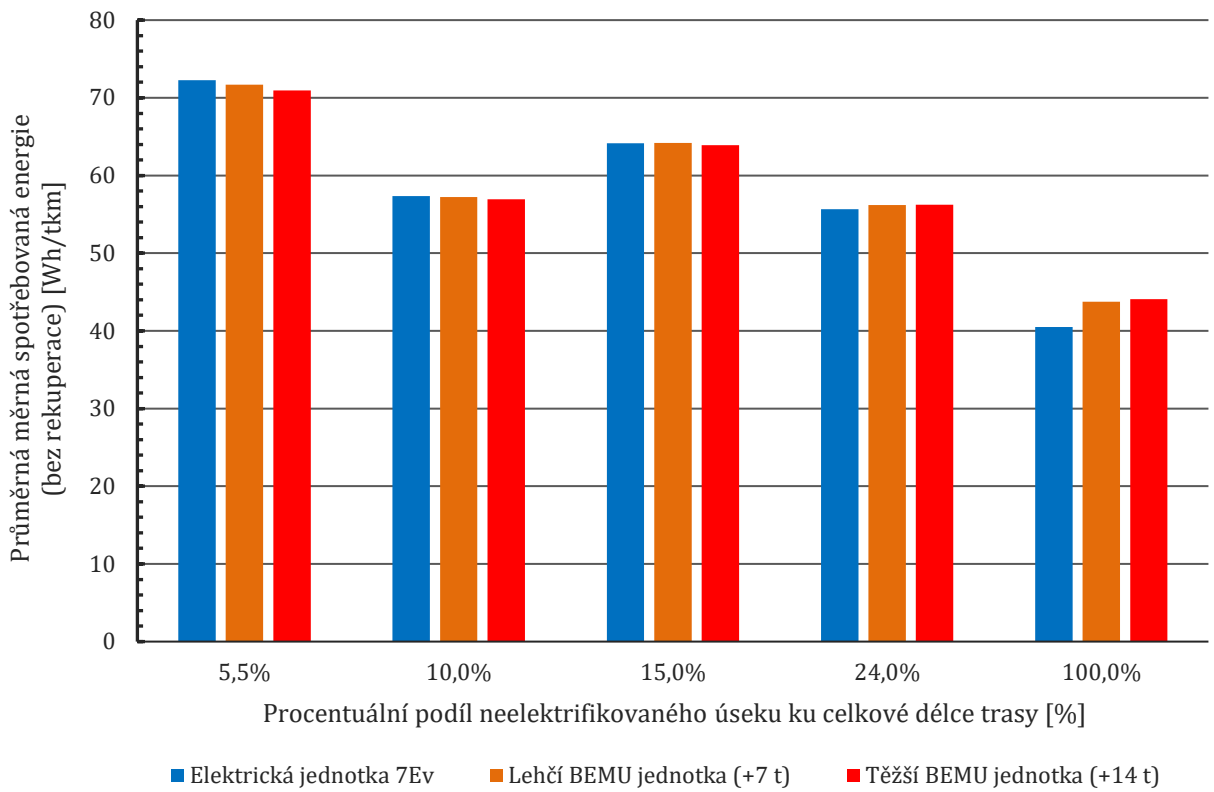


Obr. 34 - Graf udávající průměrnou měrnou spotřebovanou energii spěšného vlaku [kWh/oskm]

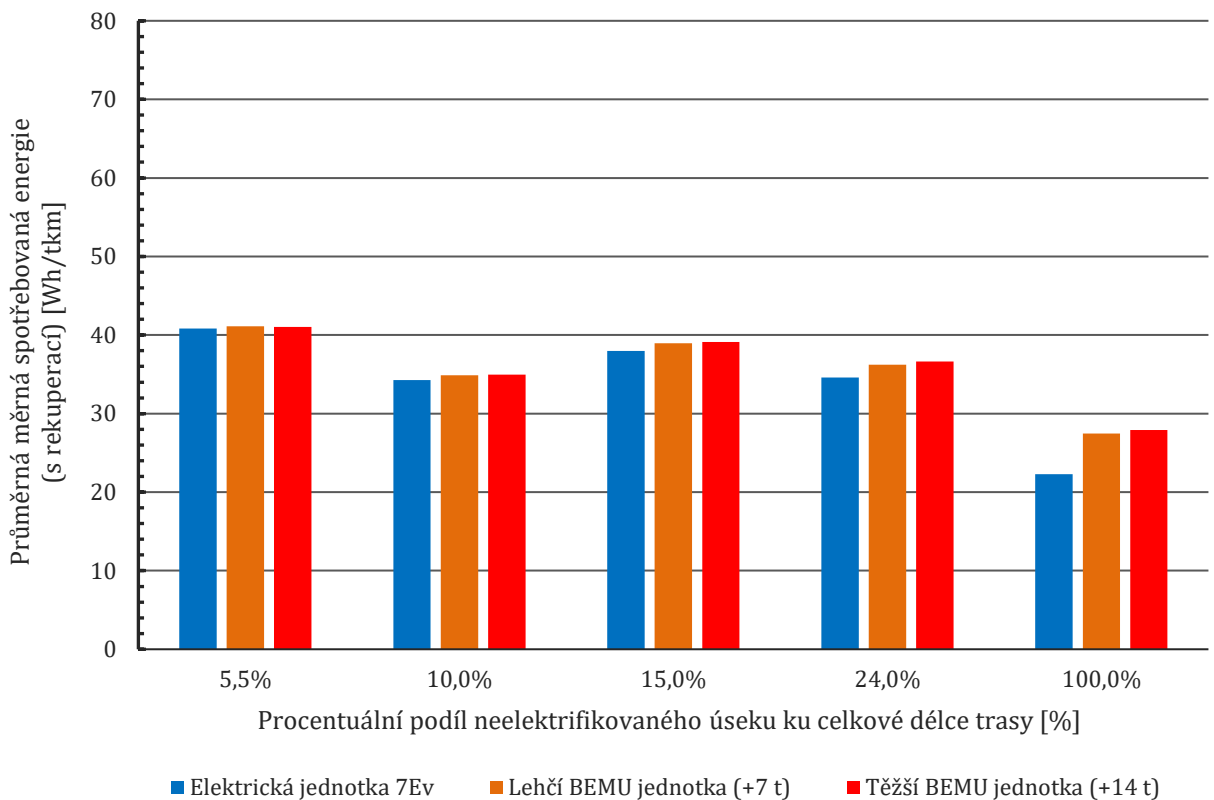


Obr. 35 - Graf udávající celkovou průměrnou měrnou energii spěšného vlaku [kWh/oskm]

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

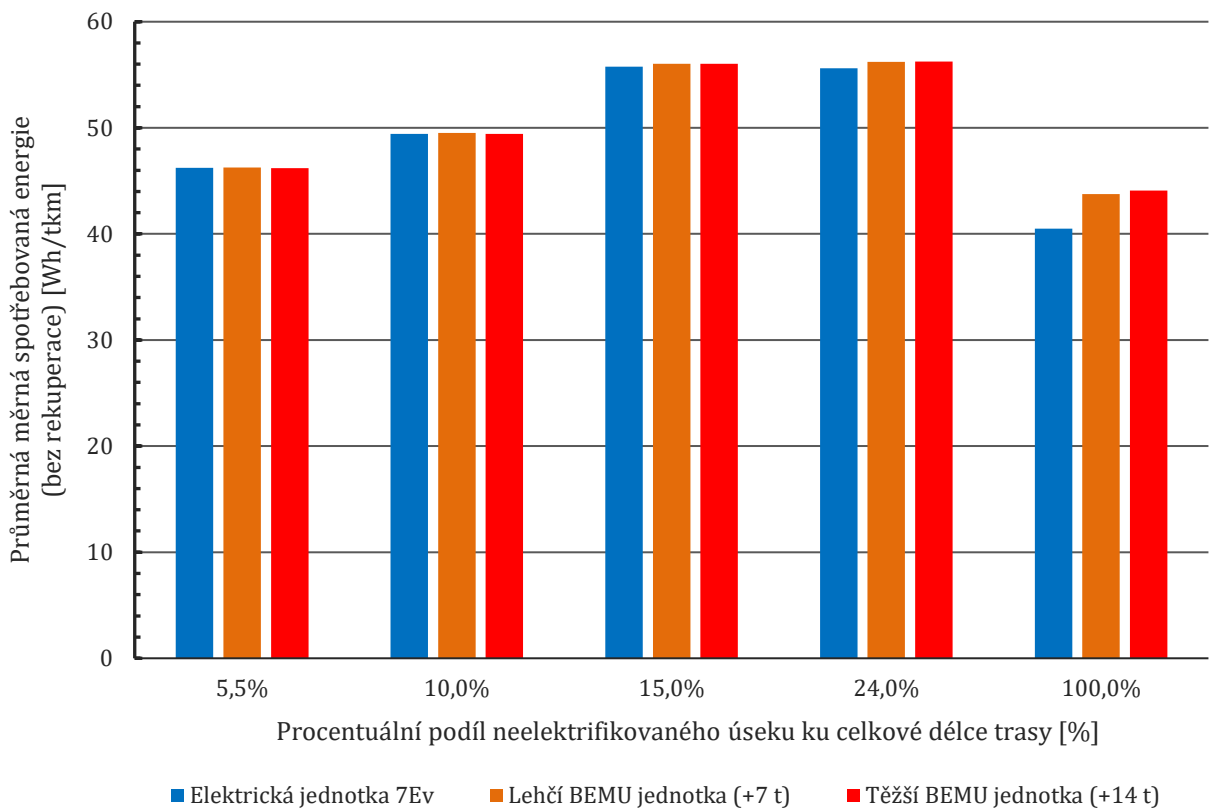


Obr. 36 – Graf udávající průměrnou měrnou spotřebovanou energii osobního vlaku [Wh/tkm]

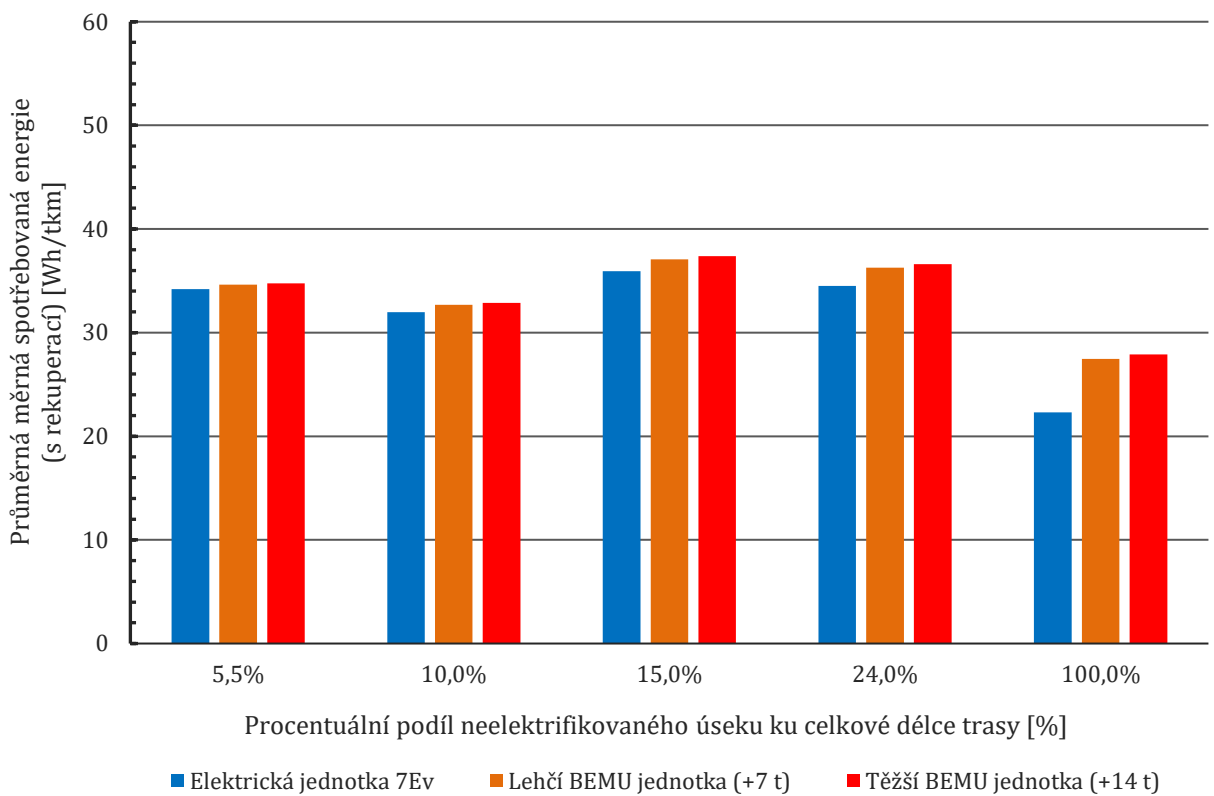


Obr. 37 – Graf udávající celkovou průměrnou měrnou spotřebovanou energii osobního vlaku [Wh/tkm]

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

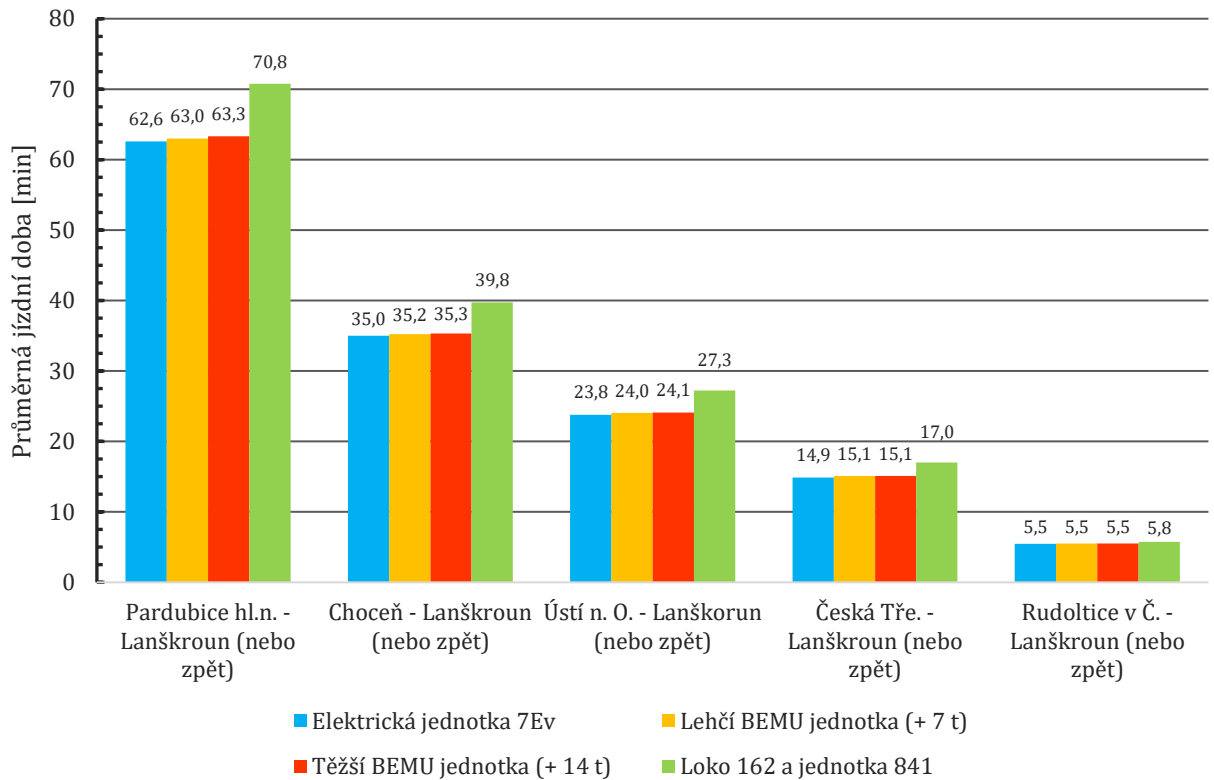


Obr. 38 – Graf udávající průměrnou měrnou spotřebovanou energii spěšného vlaku [Wh/tkm]

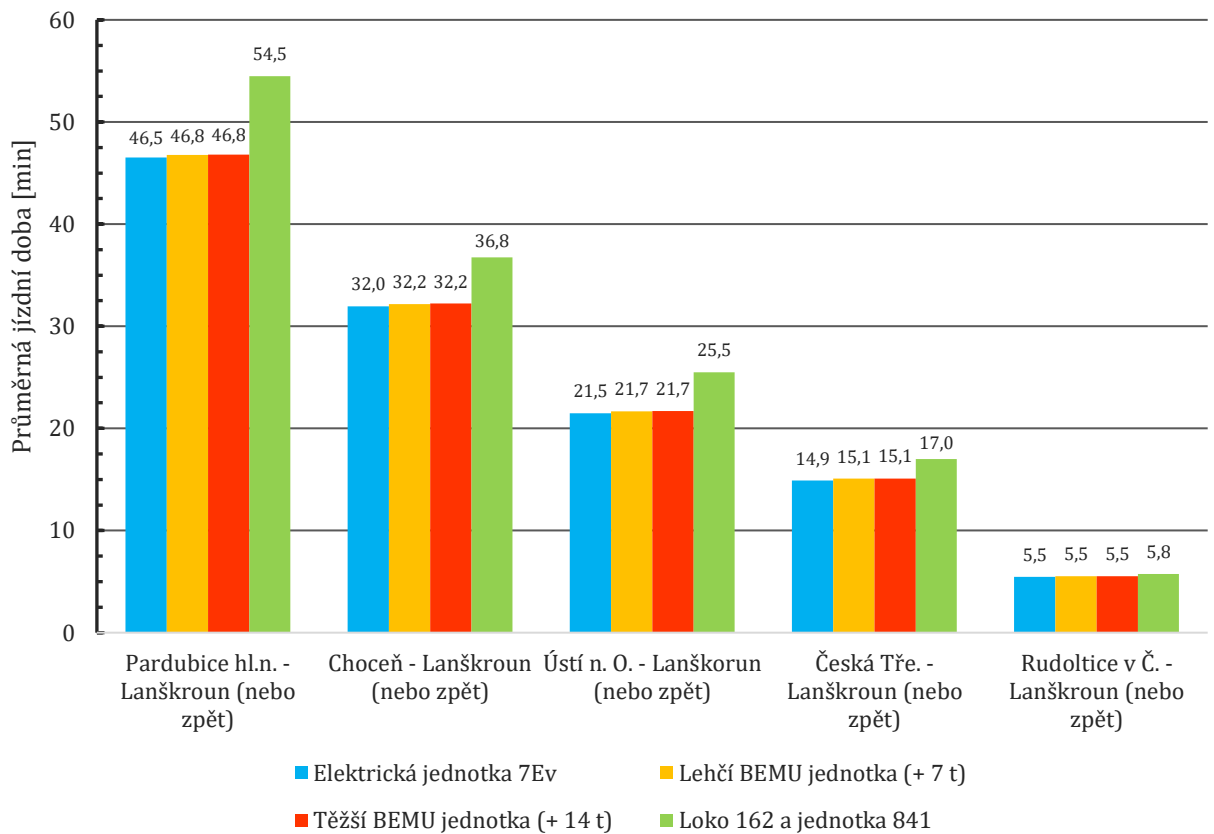


Obr. 39 – Graf udávající celkovou průměrnou měrnou spotřebovanou energii spěšného vlaku [Wh/tkm]

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



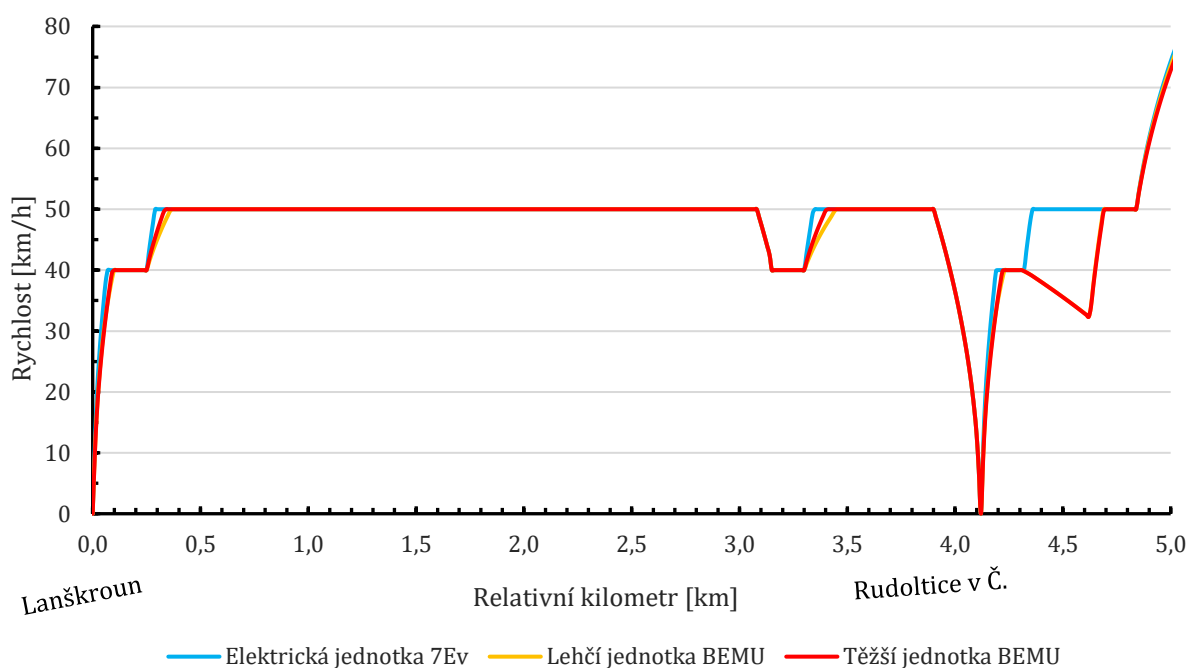
Obr. 40 – Porovnání jízdních dob osobního vlaku



Obr. 41 – Porovnání jízdních dob spěšného vlaku

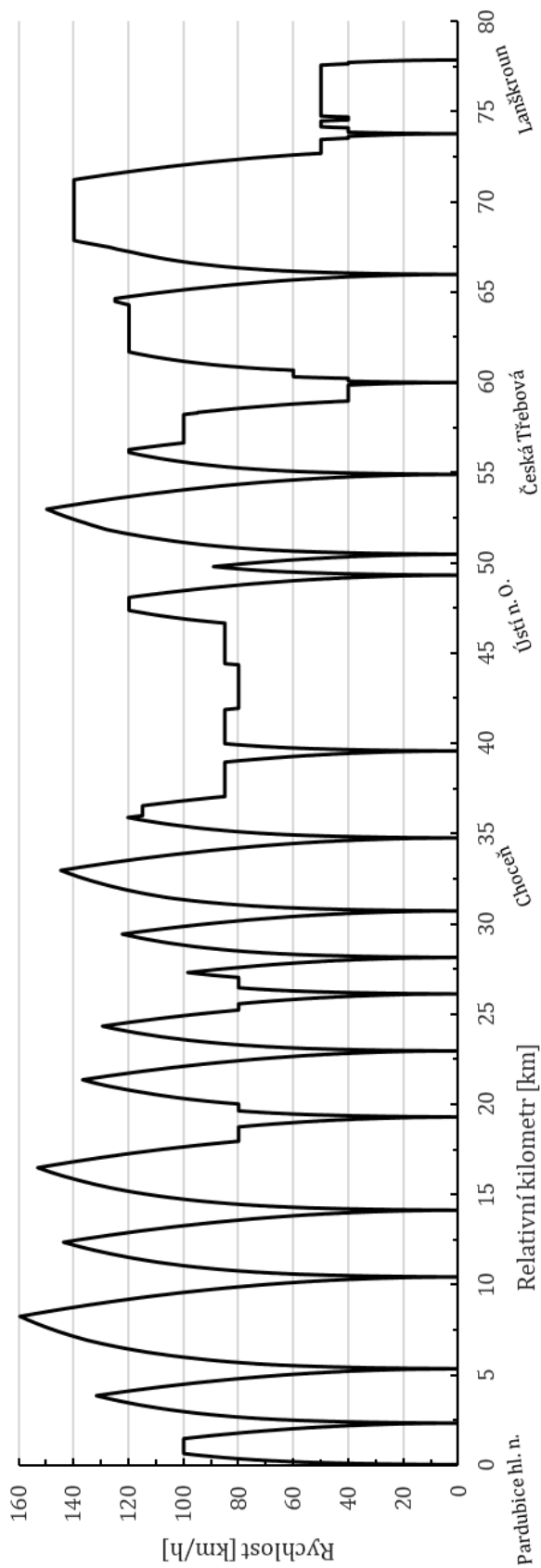
6.3 Tachogramy a průběh výkonu

Dráhový tachogram je závislost ujeté dráhy na rychlosti vozidla. Tyto průběhy je možné vidět na obr. 43 - obr. 46. V celé trase jsou uvedeny pouze pro jednu jednotku (Os i Sp v obou směrech), protože jsou pro všechny téměř stejné. Rozdíl je pouze při zrychlování, které je dáno především výkonem a tažnou silou. Za zmínku stojí úsek Lanškroun – Rudoltice v Č., kde je rozdíl mezi elektrickou jednotkou a jednotkami BEMU znatelnější; pro elektrickou jednotku se počítá s elektrifikací úseku. Tyto průběhy můžeme vidět na obr. 42, kde je také znatelné přepínání mezi napájením z akumulátorů a trolejového vedení.

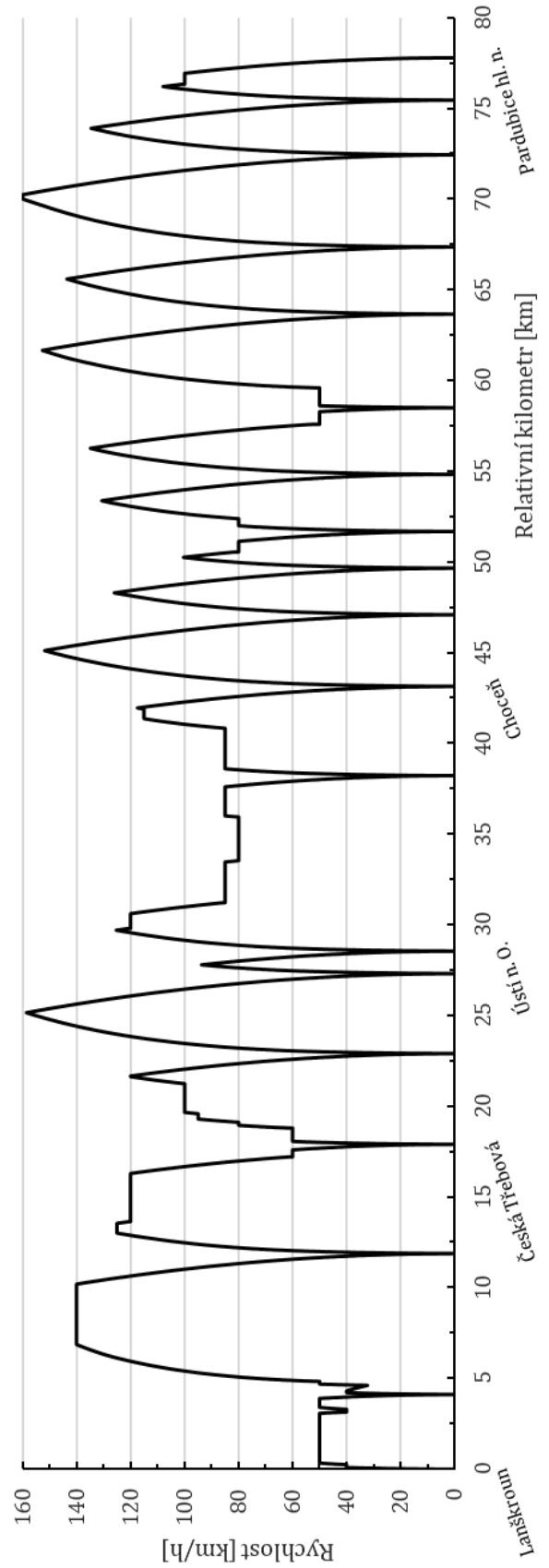


Obr. 42 – Výřez tachogramu v úseku Lanškroun – Rudoltice v Č.

V návaznosti na kap. 4.1.3 a 4.1.4 jsou na obr. 47 až obr. 50 uvedeny průběhy výkonů v závislosti na čase. Jedná se o skutečný výkon, který jednotka 7Ev v průběhu jízdy vyvíjí, a o nominální výkon. Ten je určen z momentové charakteristiky uvedené v [59]. Trakční charakteristika uvedená na obr. 24 byla popsána matematickou závislostí jako $F_{ok} = f(V)$ a pomocí této rovnice byl vypočten nominální výkon v celé délce trasy (s použitím vzorce $P = F_{ok} \cdot v$). Matematická závislost byla vytvořena pomocí programu MS Excel.

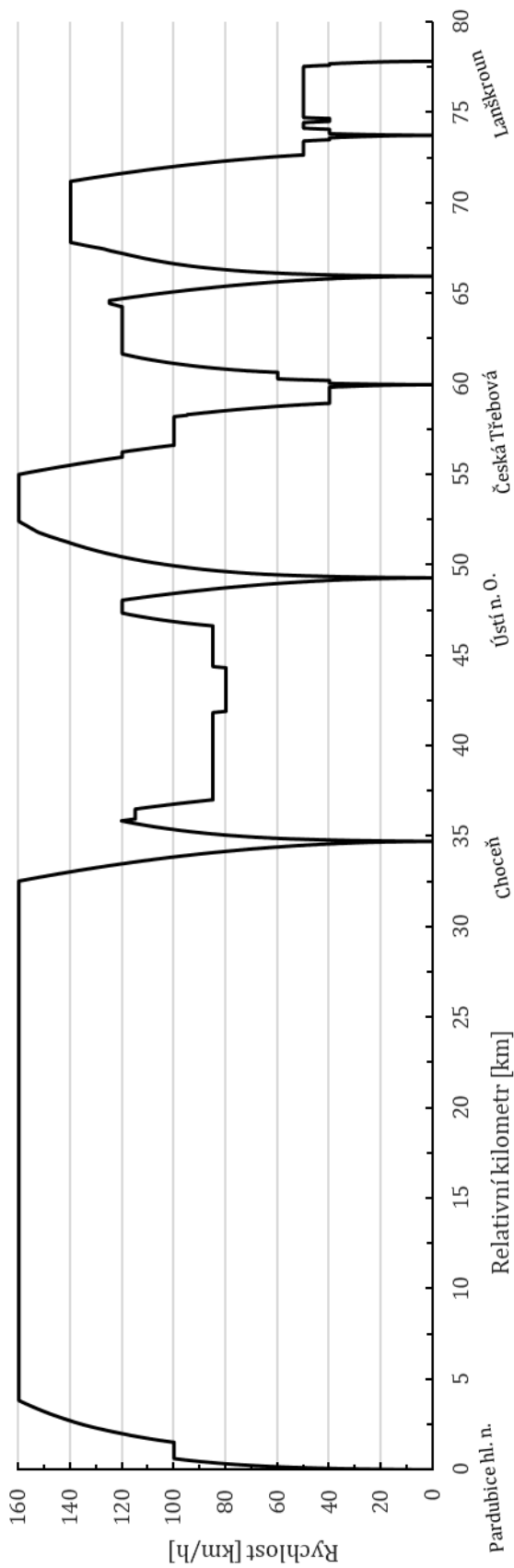


Obr. 43 – Tachogram Os, Pardubice hl. n. - Lanškroun

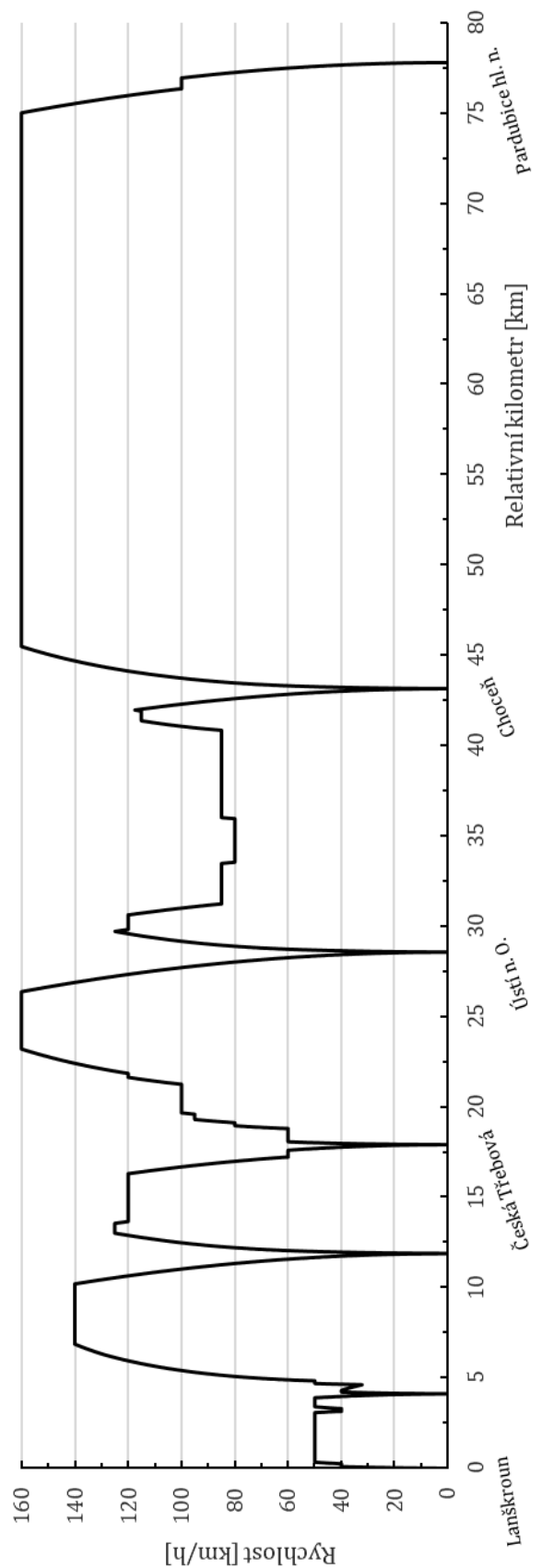


Obr. 44 – Tachogram Os, Lanškroun - Pardubice hl. n.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

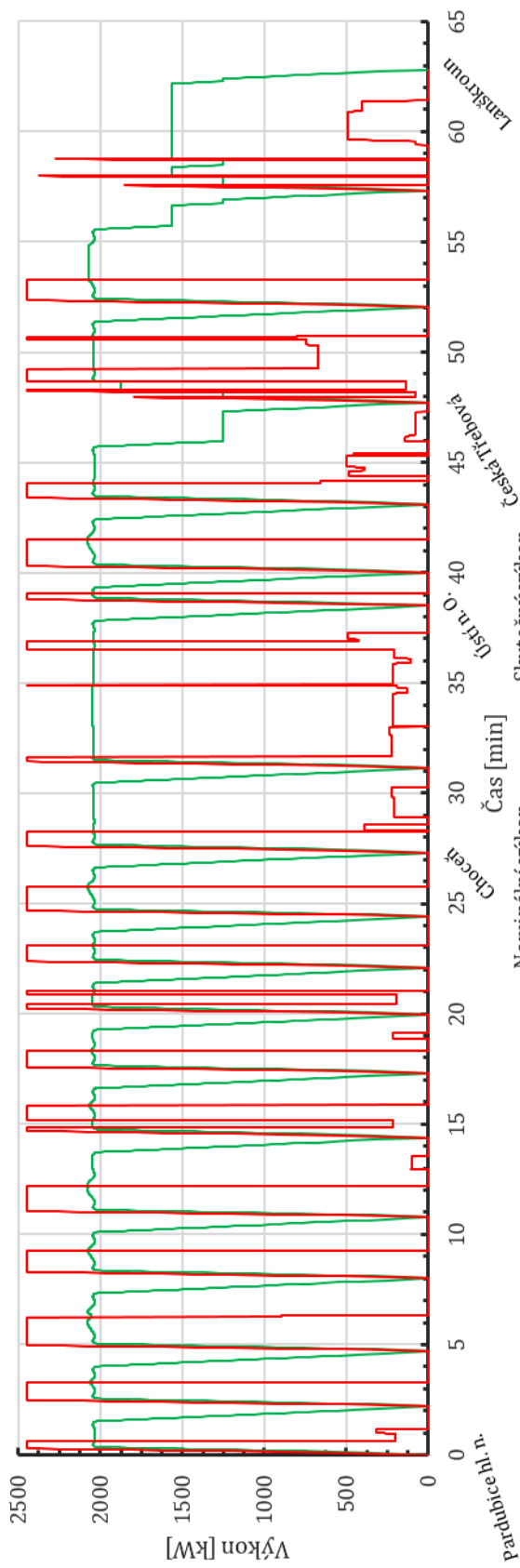


Obr. 45 – Tachogram Sp, Pardubice hl. n. - Lanškroun

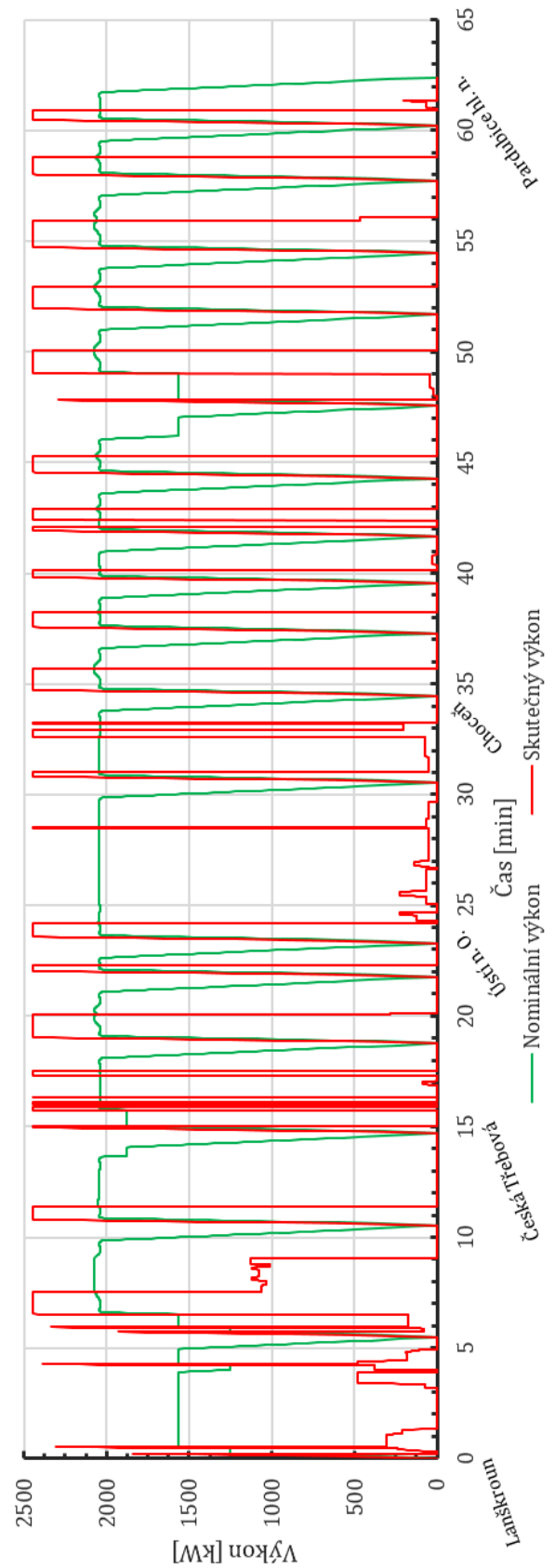


Obr. 46 – Tachogram Sp, Lanškroun - Pardubice hl. n.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

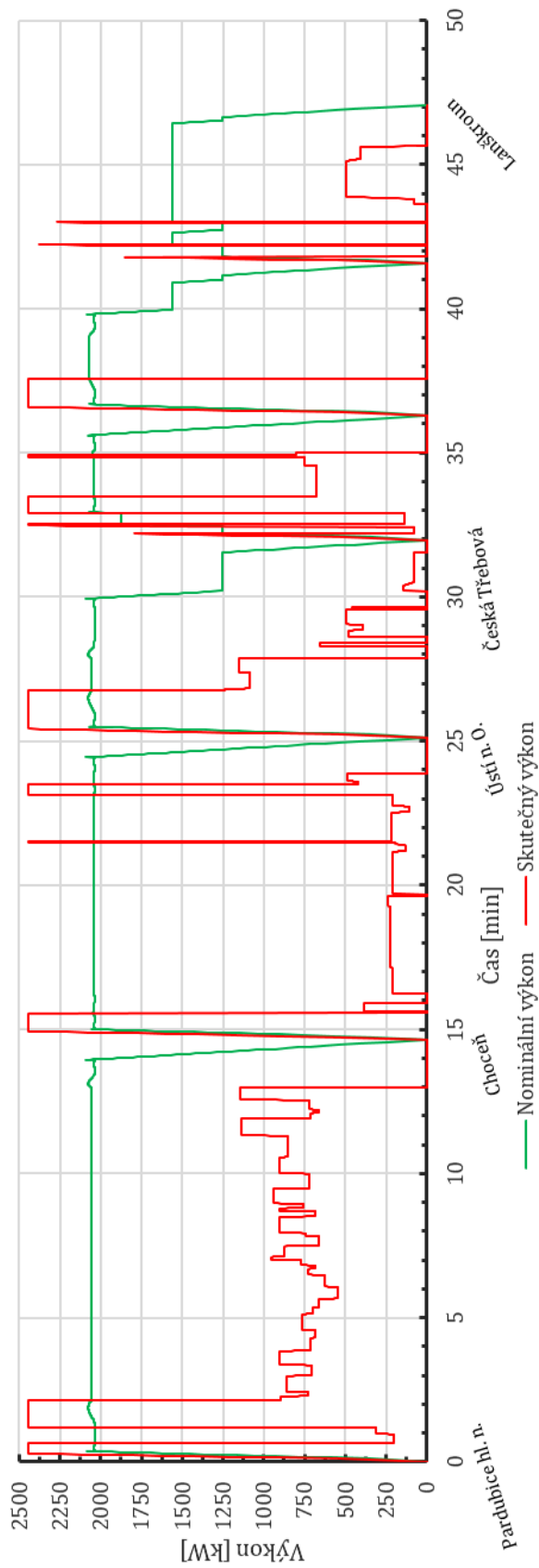


Obr. 47 – Porovnání výkonů Os (Par. – Lan.)

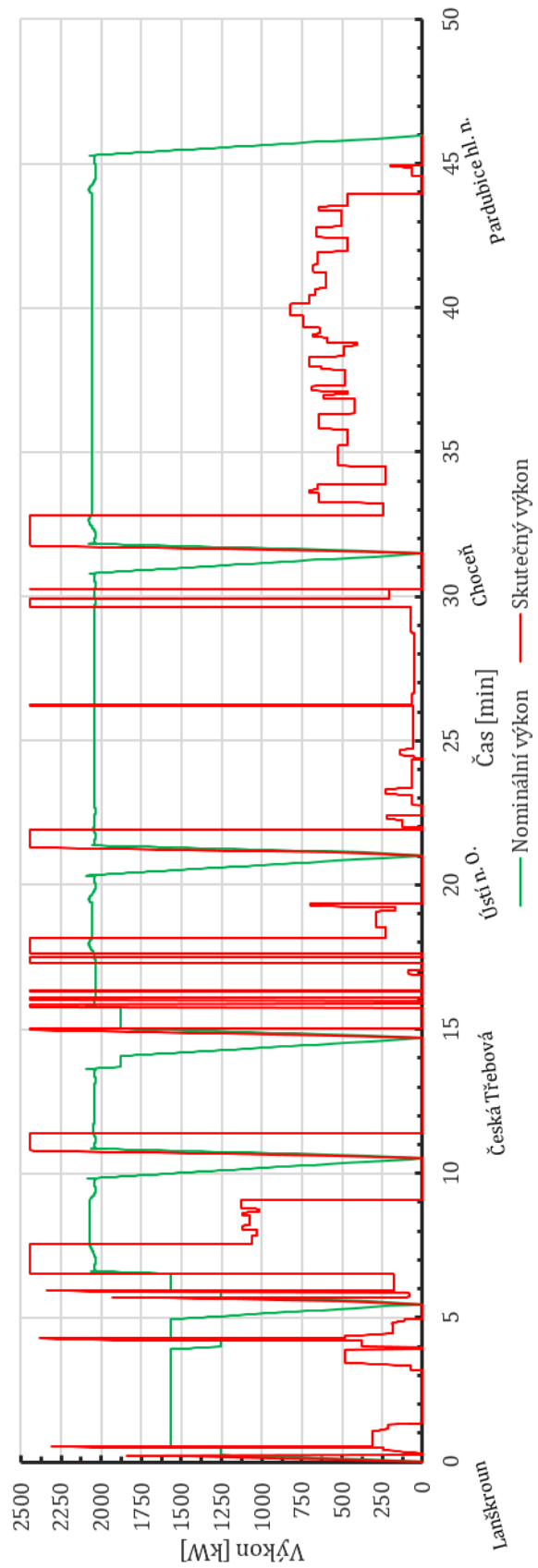


Obr. 48 – Porovnání výkonů Os (Lan. – Par.)

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



Obr. 49 – Porovnání výkonů Sp (Par. – Lan.)



Obr. 50 – Porovnání výkonů Sp (Lan. – Par.)

6.4 Ekvivalentní vzdálenost

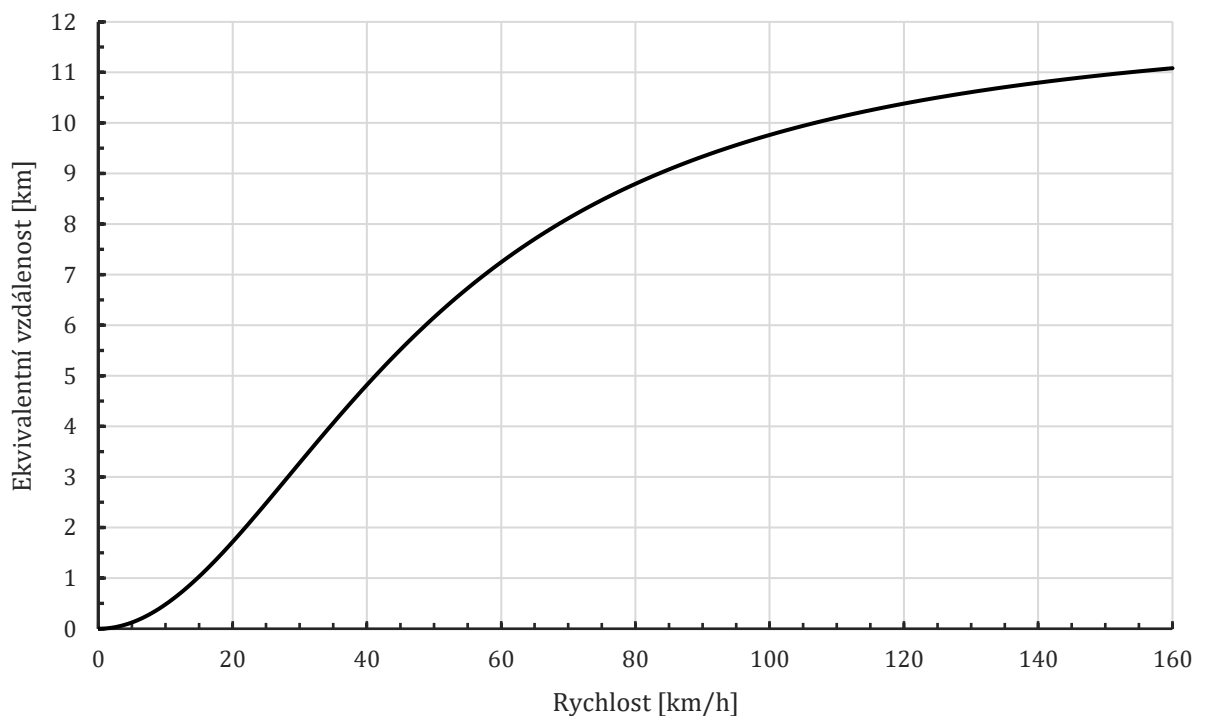
Zdroj [30] udává jako jednu z charakteristik spotřeby energie ekvivalentní vzdálenost. Je zde uvedena pro přehlednost. Ekvivalentní vzdálenost je vzdálenost rovné přímé tratě, kde na ujetí této vzdálenosti konstantní rychlostí vlak spotřebuje stejně trakční práce jako na rozjezd na tuto rychlost. Dala by se vyjádřit jako poměr mezi vratnou trakční prací a nevratnou trakční prací, resp. mezi kinetickou energií vlaku, odpovídající rozjezdu na danou rychlost, a prací vozidlového odporu vztáženého na jednotku ujeté dráhy. Definována je jako

$$L_{ekv} = \frac{E_k}{e_0} \quad (51)$$

Po dosažení kinetické energie a gradientu nevratné trakční práce je získána rovnice (52).

$$L_{ekv} = \frac{(1 + \rho_{vl}) \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot o_v} \quad (52)$$

Vypočtená ekvivalentní vzdálenost je uvedena na obr. 51. Výsledné rozdíly mezi jednotlivými jednotkami jsou velmi malé (proto je zde uvedena pouze jedna křivka). To už vyplývá z rovnice (52), protože jedinou rozdílnou veličinou je součinitel rotačních hmot ρ_{vl} . Největší vzdálenost je pro maximální rychlost (160 km/h) a činí 11,08 km pro elektrickou jednotku 7Ev, 11,05 km pro lehčí BEMU a 11,02 km pro těžší BEMU jednotku. Z toho vyplývá, že na ujetí 11,08 km (pro elektrickou jednotku 7Ev) konstantní rychlostí 160 km/h na rovné a přímé trati jednotka spotřebuje stejně trakční energie jako při rozjezdu na tuto rychlost.



Obr. 51 – Graf ekvivalentní vzdálenosti

6.5 Rozbor průběhu energie v akumulátorech

Výpočet pomocných pohonů

Při hodnocení vybíjení akumulátorů je vhodné započítat i napájení pomocných pohonů. V práci [66] je uvedeno, že se spotřeba pomocných pohonů pohybuje okolo 15 % - 50 % z trakční energie spotřebované na pohon vozidla. Tento velký rozptyl je způsoben především často měnící se potřebou použití jednotlivých pohonů (v zimě se použije topení, zatím co v létě to bude spíše klimatizace apod.). Je možno tedy uvažovat průměrnou hodnotu 33 % spotřeby energie pro pomocné pohony ze spotřeby trakční energie E_F v úseku Rudoltice v Čechách – Lanškroun a zpět.

Spotřebovaná trakční energie pro jízdu v neelektrifikovaném úseku do Lanškrouna a zpět průměrně za všechny tři jednotky je $E_F = 53$ kWh. Na energii pro pomocné pohony poté připadne 17,5 kWh, což rozhodně není zanedbatelné. Průměrná jízda dle výsledků z trakčních výpočtů do Lanškrouna a zpět trvá 11 minut. To tedy připadne přibližně 1,6 kWh/min. Budeme-li uvažovat stání vozidla jednu minutu v Rudolticích v Č. a pět minut v Lanškrouně, celková spotřeba energie za pomocné pohony se zvýší o 11,2 kWh. Výsledná spotřeba tedy bude 28,7 kWh pro pomocné pohony při jízdě v akumulátorovém režimu.

Pokles energie akumulátorů

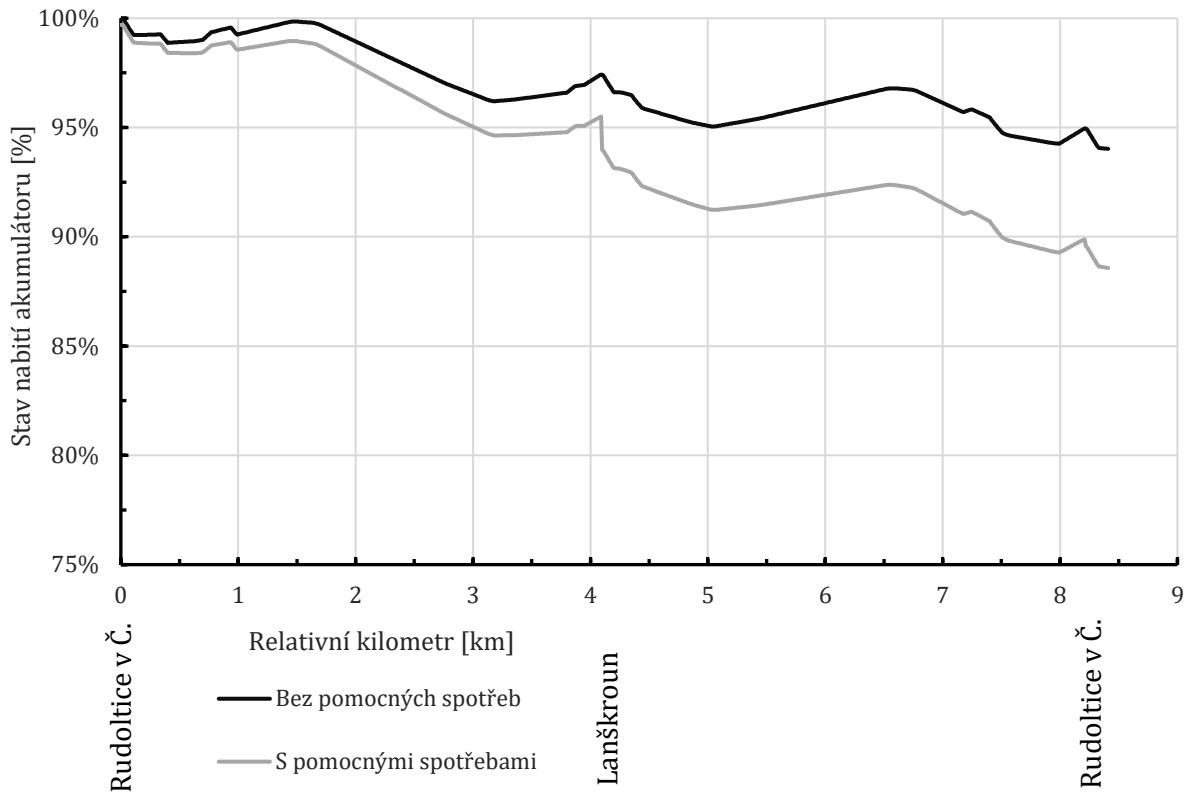
Průběh vybíjení LTO akumulátorů s kapacitou 528 kWh (těžší BEMU) je znázorněn na obr. 52. Průběh vybíjení akumulátorů s poloviční kapacitou 264 kWh (lehčí BEMU) je znázorněn na obr. 53. V obou grafech stojí za zmínku poslední klesající křivka od kilometru 8,2, která značí spotřebu trakční energie. To je způsobeno rozjezdem z Rudoltic v Č. na akumulátorový režim, protože ve skutečnosti osmá kolej není elektrifikována a vozidlo přestává vyvíjet tažnou sílu až v relativním kilometru 8,41 (tj. 13,96 traťového kilometru).

Dle výpočtů se akumulátor těžšího vozidla s pomocnými spotřebami vybije až na hodnotu 467,6 kWh (88,56 %) a akumulátor lehčího vozidla se vybije na 205,5 kWh (77,84 %).

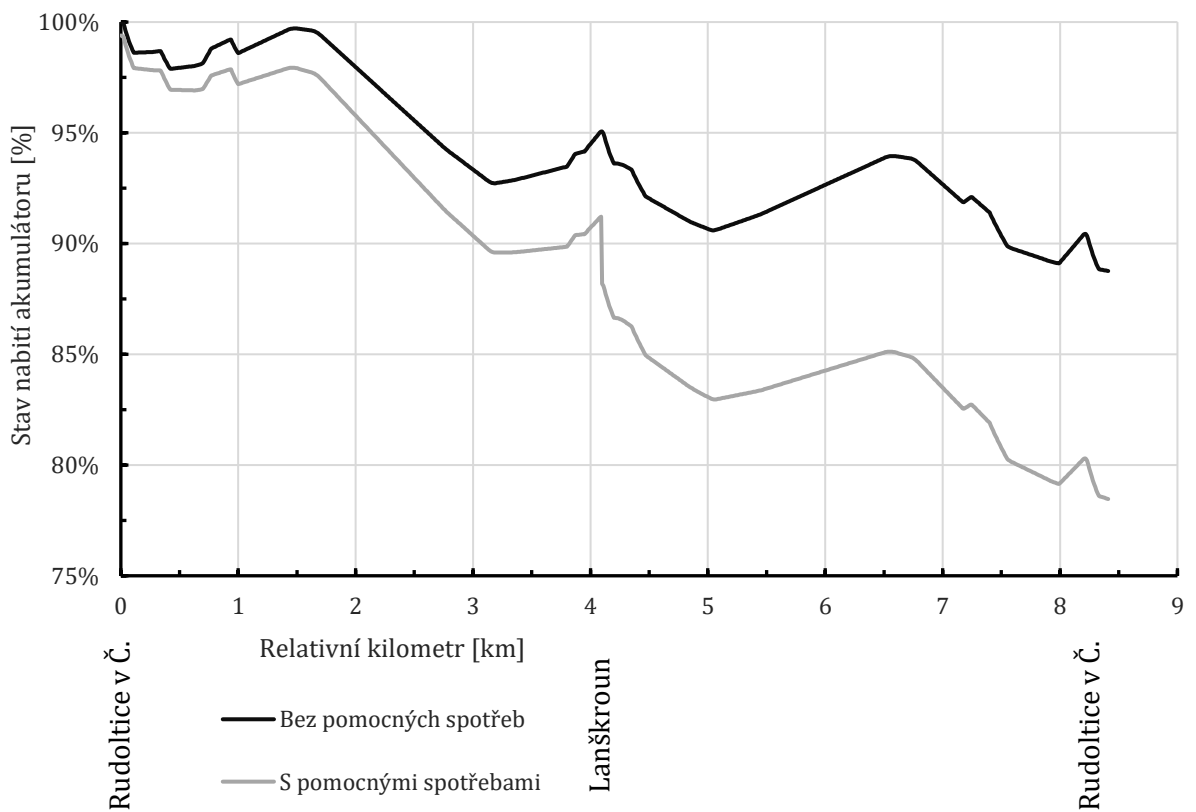
6.5.1 Doplnění energie do akumulátorů

Obnova energie do akumulátorů je důležitou kapitolou, protože čím dříve se akumulátor dobije, tím dříve je vozidlo schopno vyjet na další neelektrifikovaný úsek. Rozdíl je při dobíjení za stání (hrozí přepálení troleje) či dobíjení za jízdy (je navíc odebrána ještě trakční energie). Nabíjení je tedy omezeno výkonem trakčního vedení, příp. nabíjecí stanicí či nabíjecím a vybíjecím výkonem akumulátorů.

SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY



Obr. 52 – Graf udávající průběh poklesu energie akumulátoru těžšího vozidla BEMU s kapacitou 528 kWh



Obr. 53 - Graf udávající průběh poklesu energie akumulátoru lehčího vozidla BEMU s kapacitou 264 kWh

Nevýhody TNS 3 kV DC proti 25 kV AC

Lze říct, že napájecí systém 3 kV DC je pro nabíjení akumulátorových vozidel nevýhodný oproti TNS 25 kV AC. Systém na střídavý proud je schopen přenášet daleko vyšší výkon než 3 kV DC a je tedy schopen akumulátor nabíjet rychleji. Akumulátory jsou typu HP, takže jsou vyrobeny na rychlé nabíjení a vybíjení – mají nabíjecí a vybíjecí výkon až 500 kW/t. Tento výkon však nelze využít, neboť jsme limitováni nižším napětím v trolejovém vedení, které navíc musí mít větší průřez trolejového drátu pro přenos větších proudů a snížení ztrát, musí být napájeno oboustranně atd. Nevýhodou tohoto systému je také nutnost oddělení od meziobvodu vozidla (nutná komponenta, která zvyšuje hmotnost vozidla), protože akumulátory jsou řešeny na napětí 1 kV. [20] [30]

Výpočet času nabití akumulátorů

Bylo vycházeno z prezentace [20], kde je proud pro napájení akumulátorů z troleje při statickém nabíjení uveden $I_A = 200$ A (stejnou hodnotu udává i TSI 1301/2014). Ačkoliv se jedná o hodnotu při klidovém stavu vozidla, byla při výpočtech použita, neboť se nepředpokládají vysoké hodnoty odběrového proudu pro trakční energii a pomocné pohony. Nabíjecí výkon je tedy

$$P_A = U_A \cdot I_A. \quad (53)$$

Pro 3 kV DC vychází 600 kW (200 A) a pro 25 kV AC (80 A) vychází 2000 kW. Z těchto rozdílů je zřejmý již výše zmíněný rozdíl nabíjecích časů. Při nabíjení je nutné vzít v potaz účinnost η_{TA} , která zohledňuje ztráty v měničích, TNS apod. Čas se poté vypočte dle (54). [20]

$$t_n = \frac{E_A}{P_A \cdot \eta_{TA}} \quad (54)$$

Výsledky pro napájení 3 kV DC jsou přehledně uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 – Časy doplnění energie do akumulátorů z TNS 3 kV DC

Typ vozidla	Bez pomocných spotřeb		S pomocnými spotřebami	
	E_A [kWh]	t_n [min]	E_A [kWh]	t_n [min]
Lehčí BEMU 264 kWh	29,7	3,47	58,5	6,84
Těžší BEMU 528 kWh	31,6	3,69	60,4	7,06

6.6 Náklady na trakční energii

Jak vyplývá z obr. 30 a obr. 31, větší hmotnost akumulátorových jednotek se projeví nárůstem spotřeby trakční energie. Průměrně je to v celé délce trasy nárůst u lehčího BEMU vozidla o 3,5 % a u těžšího BEMU vozidla o 6,7 %. Tyto hodnoty nejsou převratné, ale při dlouhodobém provozu se to cenově projeví i v milionech korun. Otázkou tedy zůstává, jak dlouho se vyplatí provozovat polozávislé vozidlo.

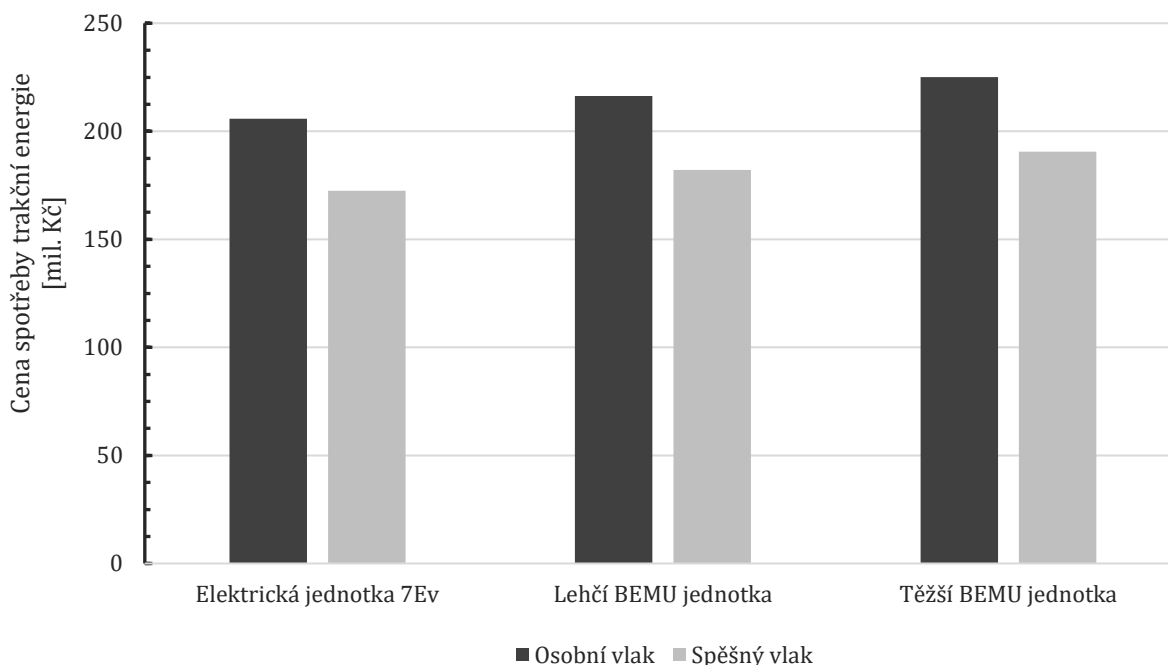
SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Správa železnic na svém webu [67] uvádí, že v roce 2019 pro vozidla využívající závislou trakci byla cena 2 394,93 Kč/MWh. Pro výpočet byla uvažována menší rezerva, tedy 2,5 Kč/kWh. Počítáno bylo v průměru 15 obrátů denně a 360 dní v roce. Životnost akumulátorů dle [20] je přibližně 15 let. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 – Cena spotřeby trakční energie na lince Pardubice hl. n. - Lanškroun

Cena trakční energie		Elektrická jednotka 7Ev	Lehčí BEMU jednotka	Těžší BEMU jednotka
Osobní vlak	Spotřeba na kilometr [kWh]	6,5	6,9	7,1
	Cena za kilometr [Kč]	16,3	17,2	17,9
	Obrat (Par. - Lan. a zpět) [Kč]	2541,9	2670,4	2778,6
	15 let provozu [mil. Kč]	205,9	216,3	225,1
Spěšný vlak	Spotřeba na kilometr [kWh]	5,5	5,8	6,0
	Cena za kilometr [Kč]	13,7	14,5	15,1
	Obrat (Par. - Lan. a zpět) [Kč]	2128,9	2249,1	2351,7
	15 let provozu [mil. Kč]	172,4	182,2	190,5

Z tab. 7 je vidět, že za 15 let provozu, dělají cenové rozdíly mezi jednotlivými jednotkami nemalé částky. Pro přehled je zde uveden obr. 54, kde je cena trakční energie za 15 let provozu přehledně uvedena. Za povšimnutí stojí, že rozdíl mezi osobním a spěšným vlakem je téměř konstantní.



Obr. 54 – Cena spotřeby trakční energie za 15 let provozu

6.6.1 Porovnání s elektrifikací daného úseku

Jak již byl zmíněno, elektrifikace není levnou záležitostí, avšak ani dlouhodobější provoz akumulátorového vozidla nemusí být výhodnější. Otázkou zůstává, zda se vyplatí danou trať elektrifikovat nebo na ní provozovat polozávislé vozidlo. Pro řešení tohoto problému je nutno si položit pár základních otázek:

- Jak dlouhý je úsek bez elektrifikace?
- Kdy (jestli vůbec) bude trať elektrifikována?
- Jaká bude hlavní linka provozu a jak časté zastavování je předpokládáno?
- Jaký je hmotnostní rozdíl mezi jednotkami pro závislou trakci a polozávislou trakci?

V rámci této práce byl proveden alespoň přibližný odhad ekonomické výhodnosti možných řešení (elektrizace zbylého úseku trati vs. nasazení dvouzdrojového vozidla), a to na základě posouzení rozdílů ve spotřebě trakční energie. Vypočtené finanční rozdíly za 15 let provozu jsou uvedeny v tab. 7.

Důležitým parametrem je doba do elektrifikace úseku. Pokud je známo, kdy se bude daný úsek elektrifikovat, je možné z této doby odhadnout velikost nájezdu BEMU vozidla (vozidel) za celou dobu provozu. Ve většině případů to však známo není; je vhodné vycházet ze životnosti vozidla (vozidel). Na základě ujetých kilometrů je možné určit, zda se zbylý úsek vyplatí či nevyplatí elektrifikovat. Je-li např. předpokládaný nájezd těžších BEMU jednotek 15 mil. km (za všechny vozidla na stejném úseku), cena elektrifikace jednoho kilometru trati stojí 5 mil. Kč, podle obr. 55 lze určit, že se vyplatí provést elektrizaci 4,7 km dlouhou. Pro kratší úsek (než 4,7 km) je výhodnější trať elektrifikovat zrovna a následně provozovat vozidlo se závislou trakcí. Pokud je úsek delší, je levnější zde nasadit jednotky BEMU.

Je zde nutné podotknout, že daná (vybraná) doba provozu (př. ujetých kilometrů), je pro všechny jednotky stejná. Nelze tedy uvažovat najednou rozdílné doby provozu pro jednotlivé vlaky.

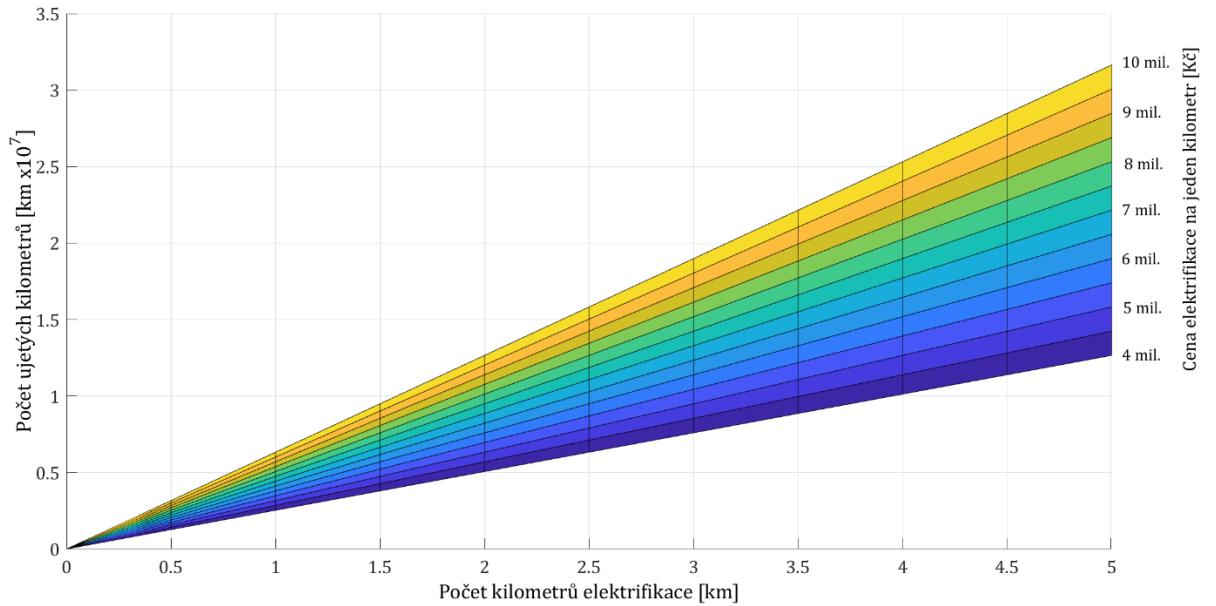
Na obr. 55 je závislost počtu ujetých kilometrů těžšího BEMU na počtu elektrifikovaných kilometrů a na ceně elektrifikace na jeden kilometr pro osobní vlak. Obdobně to můžeme vidět na obr. 56 pro lehčí BEMU.

Aktuálně se cena za elektrizovaný kilometr pohybuje přibližně okolo 5 mil. Kč. Rozdíl cen trakční energie vůči závislé trakci pro těžší vozidlo BEMU je přibližně 20 mil. Kč a pro lehčí BEMU 10,5 mil. Kč (za 15 let provozu). Tomu odpovídají přibližně 4 km elektrifikace pro těžší jednotku a 2 km elektrifikace pro lehčí jednotku. Délka neelektrifikovaného úseku Rudoltice v Č. – Lanškroun je 4,23 km. Bude-li uvažována životnost akumulátorů (15 let), provozovat těžší jednotku BEMU by vyšlo skoro stejně draho jako danou trať elektrifikovat a následně 15 let provozovat elektrickou jednotku 7Ev. U lehčí jednotky je to však jiné. Po dobu provozu 15 let se úsek nevyplatí elektrifikovat; vyplatí se až v případě předpokládaném provozu delším, než je 30 let. Mezní doby provozu pro všechny typy výpočtových vlaků na vybraném úseku jsou v tab. 8.

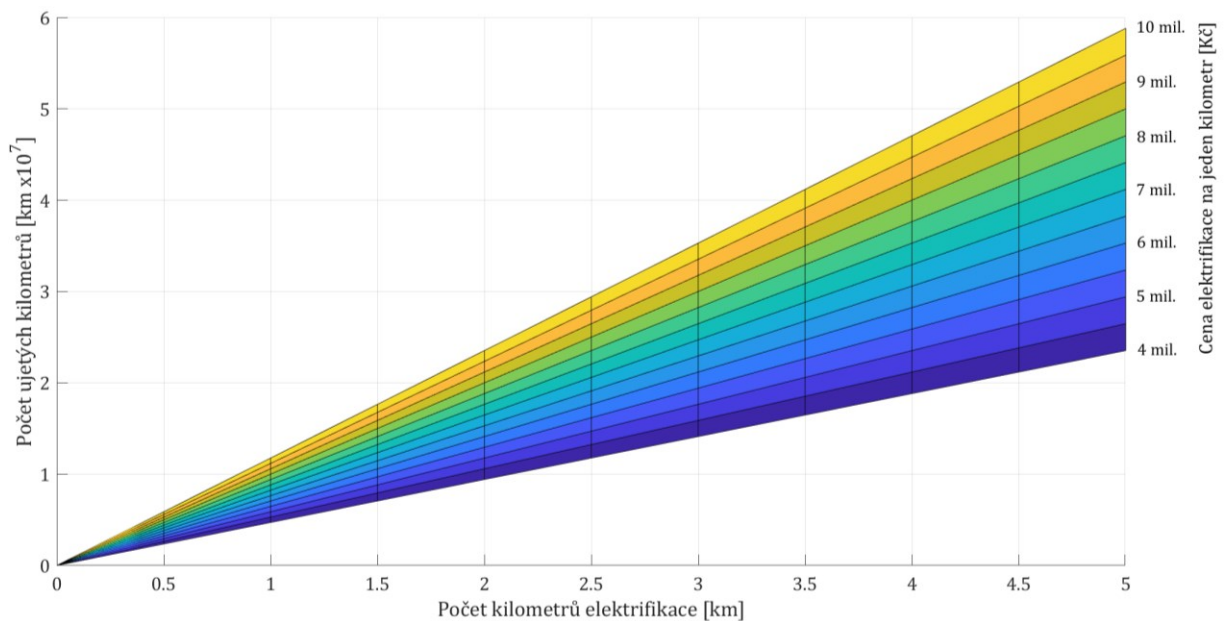
SIMULAČNÍ POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI ELEKTRICKÉ A HYBRIDNÍ JEDNOTKY

Tab. 8 – Přehled mezních dob provozu

Typ jednotky BEMU		Mezní doba provozu [let]	Cena za dobu v provozu [mil. Kč]
Osobní vlak	Lehčí	30,5	439,5
	Těžší	16,5	248,2
Spěšný vlak	Lehčí	33,1	402,4
	Těžší	17,9	226,7



Obr. 55 – Graf závislosti elektrifikace pro těžší BEMU jednotku jako osobní vlak



Obr. 56 – Graf závislosti elektrifikace pro lehčí BEMU jednotku jako osobní vlak

7 Závěr

Cílem této práce bylo porovnat energetickou náročnost elektrické a hybridní jednotky na vybraném úseku. Výpočty byly provedeny numerickým řešením pohybové rovnice vlaku se snahou se co nejvíce přiblížit skutečnému provozu (konzultace tažné síly se zástupcem výrobce vozidla, přesnější redukovaný sklon od Správy železnic apod.). Spotřeba trakční energie je ovlivněna celou řadou faktorů (někdy i náhodných), ale v rámci práce byla provedena – za jinak stejných podmínek – sada porovnávacích výpočtů.

Z těchto výpočtů vyplývá, že i poměrně malý nárůst hmotnosti (vzhledem k celkové hmotnosti vozidla) způsobí v horizontu životnosti vozidla nezanedbatelný nárůst spotřeby trakční energie. Při konstrukci dvouzdrojového vozidla je proto právě jedním z rozhodujících faktorů hmotnost. Vzhledem k nadčasovosti tématu je výhodné, že při zadávání zakázky na výrobu vozidla se mohou parametry tzv. „ušít na míru“.

Z kap. 6.6 lze tvrdit, že pro provoz na trati Pardubice hl. n. – Lanškroun by se určitě vyplatilo lehčí vozidlo BEMU, které v uvažovaném případě váží oproti elektrické jednotce pouze o 7 t více a má kapacitu akumulátorů 264 kWh. Ve skutečnosti je však vhodné, aby vozidlo bylo provozuschopné i na jiných ramenech kraje (tedy např. Česká Třebová – Moravská Třebová, Choceň – Litomyšl příp. Vysoké Mýto, Pardubice hl. n. – Chrudim apod.). Po uvážení vzdálenosti 20 km do cílové stanice, je tato kapacita akumulátorů na hranici dojezdu vozidla (při jízdě zpět to činí 40 km). Pro těžší BEMU je to ovšem zase krátký úsek, takže většina kapacity by se nevyužila. Řešením tedy mohou být následující možnosti, případně jejich kombinace:

- při konstrukci vozidla snížit kapacitu zásobníků energie na požadovanou hodnotu (klesne i hmotnost),
- použít technologii NMC, která má dvojnásobnou měrnou energii než LTO,
- do cílových stanic vybudovat statické dobíjení zásobníků energie.

Tato práce se však nezabývá ideálním návrhem akumulátorového vozidla pro Pardubický kraj. Stojí zde ale za zmínku napájecí trakční soustava a účinnost. Účinnost BEMU jednotky bude vždy o něco horší než elektrické jednotky. S tím souvisí i rychlost doplnění energie do zásobníků (např. nabíjení v Chocni při jízdě do Litomyšle). Použije-li se v budoucnu TNS 25 kV AC, je možné tím zkrátit dobu obratu a zároveň zlepšit účinnost (ušetřit).

Vozidlo s polozávislou trakcí bude vždy těžší než se závislou trakcí. Lze tedy při provozu elektrické jednotky ušetřit i v případě, kde jsou poplatky za použití dopravní cesty závislé na hmotnosti vlaku. Z výsledků lze konstatovat, že z hlediska energetické náročnosti se dvouzdrojové vozidlo vyplatí pouze pro dočasný provoz. Záleží už pouze na typu vozidla (tím i na pokroku technologie), jak dlouho se dočasný provoz vyplatí.

Literatura

- [1] POHL, Jiří. Vnitrostátní plán ČR v oblasti energetiky a klimatu a jeho naplňování v dopravě. In: *Siemens Mobility* [online]. Brno (MU), 6.11. 2019 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: http://www.itreg.cz/media/5435435/mu_prezentace_pohl.pdf
- [2] Doprava a veřejné zdraví. *Evropská agentura pro životní prostředí* [online]. Copenhagen: European Union, 2021, 27.09.2016 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2016/clanky/doprava-a-verejne-zdravi>
- [3] Powering the trains of tomorrow. *Railway technology* [online]. London: Verdict Media, 2021, 26 Jan 2017 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/features/featurepowering-the-trains-of-tomorrow-5723499/>
- [4] Stadler rolls-out its first bimodal Flirt. *Railway pro* [online]. 2021, June 19, 2017 [cit. 2020-12-23]. Dostupné z: <https://www.railwaypro.com/wp/stadler-rolls-out-its-first-bimodal-flirt/>
- [5] Flirt bimodal low-floor multiple-unit. *Stadler* [online]. Bussnang, 2021 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/f3vd0716e.pdf>
- [6] HAYDOCK, David. Bombardier to begin conversion of ACG EMUs to battery operation. *International railway journal* [online]. New York (Pine Street), 2021, Jan 26, 2021 [cit. 2021-04-16]. ISSN 0744-5326. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/fleet/bombardier-to-begin-conversion-of-acg-emus-to-battery-operation/>
- [7] B 81500. In: *Wikipédia: L'encyclopédie libre* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: https://fr.wikipedia.org/wiki/B_81500
- [8] B 82500. In: *Wikipédia: L'encyclopédie libre* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: https://fr.wikipedia.org/wiki/B_82500
- [9] Autorail Ā grande capacitĀ©. *Memim.com* [online]. 2021 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://memim.com/autorail-a-grande-capacite.html>
- [10] The first Polish Hybrids will go to Szczecin. *Newag group* [online]. Nowy Sącz: Newag S.A., 2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.newag.pl/en/the-first-polish-hybrids-will-go-to-szczecin/>
- [11] First Order For Impuls EDMUs. *Railvolution* [online]. © Railway Builder s.r.o, 2021, 16th Jul 2020 [cit. 2021-04-17]. ISSN 1804-3429. Dostupné z: <http://www.railvolution.net/news/first-order-for-impuls-edmus>
- [12] Régionalis. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9giolis>

- [13] Pour renouveler ses TER, la SNCF commande des rames... trop larges. *Le Monde* [online]. Paris: Le Monde, 2021, 20 mai 2014 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://www.lemonde.fr/economie/article/2014/05/20/pour-renouveler-ses-ter-la-sncf-commande-des-rames-trop-larges_4422498_3234.html
- [14] A la découverte du Régiolis. *Connaissance du Rail* [online]. 2021 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.connaissance-du-rail.com/trains-de-france/mat%C3%A9riel-roulant/a-la-d%C3%A9couverte-du-r%C3%A9giolis/>
- [15] Alstom fournira 14 rames Coradia Polyvalent aux régions Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est. *Alstom: mobility by nature* [online]. Saint-Ouen: Alstom, 2021, 08 jan 2018 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <http://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.alstom.com%2Ffr%2Fpress-centre-francais%2F2018%2F01%2Falstom-fournira-14-rames-coradia-polyvalent-aux-regions-bourgogne-franche-comte-et-grand-est%2F>
- [16] 13-001-0002-9-002 B83500 - 4 vehicles. *European register of authorised types of vehicles* [online]. Copenhagen: European Union, 2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://eratv.era.europa.eu/Eratv/Home/View/13-001-0002-9-002>
- [17] 13-001-0002-9-001 B83500 - 6 vehicles. *European register of authorised types of vehicles* [online]. Copenhagen: European Union, 2021 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://eratv.era.europa.eu/Eratv/Home/View/13-001-0002-9-001>
- [18] Battery system for French regional hybrid trains clears initial tests. *International railway journal* [online]. New York (Pine Street), Dec 2, 2020 [cit. 2021-04-14]. ISSN 0744-5326. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/technology/battery-system-for-french-regional-hybrid-trains-clears-initial-tests/>
- [19] [Made in France] Les premières commandes de trains à hydrogène passées en Bourgogne-Franche-Comté. *L'usine Nouvelle* [online]. Antony: Infopro digital, 2021, [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.usinenouvelle.com/article/made-in-france-les-premieres-commandes-de-trains-a-hydrogene-passees-en-bourgogne-franche-comte.N1067864>
- [20] POHL, Jiří. Technické prostředky elektrické vozby. In: *Siemens Mobility* [online]. Žďár nad Sázavou: Siemens, 2021, 10.10. 2019 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://kulatystul.upce.cz/Prispevky/00.pdf>
- [21] UNIVERSITY, Battery. How does the Fuel Cell Work?. *Battery University™* [online]. Richmond: Cadex Electronics Inc., 2003 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology
- [22] MAJLING, Eduard. Palivové články – princip funkce a dělení. *oEnergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2021, 5. září 2015 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni>

- [23] SLAVÍK, Jakub. Palivočlánkové vlaky nahrazují diesely, největší evropský park 27 souprav bude jezdit v okolí Frankfurtu. *Smartcityvpraxi.cz* [online]. Říčany u Prahy, 2021, 31.5. 2019 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_80.php
- [24] Towards clean and future-oriented mobility. *Alstom: mobility by nature* [online]. Saint-Ouen: Alstom, 2021 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>
- [25] Alstom's hydrogen train Coradia iLint completes successful tests in the Netherlands. *Alstom: mobility by nature* [online]. Saint-Ouen: Alstom, 2021, 06 Mar 2020 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/3/alstoms-hydrogen-train-coradia-ilint-completes-successful-tests>
- [26] ŠINDELÁŘ, Jan. Deutsche Bahn a Siemens otestují vodíkový vlak v Bádensku-Württembersku v roce 2024. *Zdopravy.cz* [online]. Praha 3: Avizer Z, 2021, 23 Lis 2020 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/deutsche-bahn-a-siemens-otestuji-vodikovy-vlak-v-badensku-wurttembersku-v-roce-2024-66926/>
- [27] Mireo Plus B Mireo Plus H: Hybrid-Triebzüge. In: *Siemens mobility* [online]. München: Siemens, 2021 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1cb2de10-aa9a-4741-beeb-27345e3a013c/mors-b10040-00dbmireo-plusplattform-72.pdf>
- [28] MURRAY-SMITH, David. Aberdeen to Ballater by BMU: Notes on the battery railcar experiment. *Railscot.co.uk* [online]. Scotland: Railscot, 2021 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: https://www.railscot.co.uk/articles/Aberdeen_to_Ballater_by_BMU:_Notes_on_the_Battery_Railcar_Experiment/
- [29] *New Zealand Rolling Stock Register* [online]. New Zealand: David Maciulaitis, 2020 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <http://www.nzrsr.co.nz/>
- [30] POHL, Jiří. Elektrická osobní železniční doprava na tratích bez liniové elektrizace. In: *Správa železnic* [online]. Praha: Správa železnic, 2021, 3/2020 [cit. 2021-04-17]. ISSN 2694-9172. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/117048102/Elektrick%C3%A1+osobn%C3%AD+%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%AD+doprava+na+trat%C3%ADch+bez+liniov%C3%A9+elektrizace.pdf>
- [31] Desiro city: Evolution in motion. In: *Siemens mobility* [online]. Munich: Siemens, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:22abc92548a671d640e3ec68773a7e6357b06bf7/mo-desiro-city-broschuere-preview.pdf>
- [32] NAVRÁTIL, Martin. Dvouzdrojová vozidla s baterií postupně překonávají nedůvěru dopravců. *Železničář* [online]. Praha: České dráhy, 2021, 15.1. 2015 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: [https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/provoz-a-technika/dvouzdrojova-vozidla-s-baterii-postupne-prekonavaji-neduveru-dopravcu/-6288/21,0,/,/](https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/provoz-a-technika/dvouzdrojova-vozidla-s-baterii-postupne-prekonavaji-neduveru-dopravcu/-6288/21,0,/)

- [33] Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností. *Tzbinfo.cz* [online]. Praha 6: Topinfo, 2021, 15.7.2019 [cit. 2021-01-24]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/akumulace-elekriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [34] Desiro ML Cityjet eco Passenger Train. *Railway technology* [online]. London: Verdict Media, 2021 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/projects/desiro-ml-cityjet-eco-passenger-train/>
- [35] ÖBB v pondělí poprvé svezí cestující vlakem na baterie, na jedno dobití má ujet 80 km. *Zdopravy.cz* [online]. Praha 3: Avizer Z, 2021, 01 Zář 2019 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/obb-v-pondeli-poprve-sveze-cestujici-vlakem-na-baterie-na-jedno-dobiti-ma-ujet-80-km-33571/>
- [36] KESSLER, Markus. 14-Tonnen-Akku statt Diesel: ÖBB testen Öko-Zug ab 2019: Schwere Akkus. *Future zone* [online]. Telekurier Online Medien, 2020, 10. 9. 2018 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://futurezone.at/b2b/14-tonnen-akku-statt-diesel-oebb-testen-oeko-zug-ab-2019/400114013>
- [37] Desiro ML ÖBB Cityjet eco: for ÖBB Personenverkehr AG. In: *Siemens mobility* [online]. Munich: Siemens, 2021 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b26911b1-2b0e-48b4-b593-81adb032d75/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-e.pdf>
- [38] Siemens Mobility získal první objednávku na bateriově napájené jednotky Mireo: 17.03.2020. *Siemens* [online]. Praha 13: Siemens, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/press/siemens-mobility-ziskal-prvni-objednavku-na-bateriove-napajene-jednotky-mireo>
- [39] *Analýza technických a provozních možností vozidel s alternativními pohony v železniční dopravě* [online]. 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/alt-pohony-jck_analyza%20vozidla2020.pdf. Projekt. České vysoké učení technické, fakulta dopravní.
- [40] Stadler liefert 55 flirt akku für den nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein: 02.07.2019. *Stadler* [online]. Bussnang, 2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/de/medien/article/stadler-liefert-55-flirt-akku-fuer-dennahverkehrsverbund-schleswig-holstein/530/>
- [41] Germany: 55 Stadler Flirt Akku to replace diesel trains. *Electrive.com: industry service for electric mobility* [online]. Berlin: Rabbit Publishing, 2021, Jun 21, 2019 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2019/06/21/germany-55-stadler-flirt-akku-to-repace-diesel-trains/>
- [42] Flirt trimodal multiple unit. In: *Stadler rail group* [online]. Bussnang, 2021 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/fwbbmu0519e.pdf>

- [43] British Rail Class 756. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_756#cite_note-StadlerDatasheet-3
- [44] FRANK, Regina. Batteriezug Talent 3 kommt mit Verspätung. *Südwest presse* [online]. Interred, 2021, 25. Juli 2019 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.swp.de/suedwesten/landkreise/alb-donau/Talent-3-Bahn-Testbetrieb-Ulm-Amstetten-Erbach-Talent-2-Stuttgart-32079022.html>
- [45] Bombardier introduces Talent 3 battery-operated train. *Insideevs* [online]. Miami, 2021, Sep 13, 2018 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/339847/bombardier-introduces-talent-3-battery-operated-train/>
- [46] Commuter trains – the backbone of city life. *Bombardier transportation: Bombardier* [online]. Berlín, 2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/urban/commuter.html>
- [47] BARROW, Keith. Battery train energises race to replace diesel. *International railway journal* [online]. New York (Pine Street), 2021, Sep 18, 2018 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.railjournal.com/in_depth/battery-train-energises-race-to-replace-diesel
- [48] SCHREIER, Pavel. *Příběhy z dějin našich drah: kapitoly z historie českých železnic do roku 1918*. Praha: Mladá fronta, 2009, s. 59-69. ISBN 978-80-204-1505-9.
- [49] STEJSKAL, Pavel. 115 let místní dráhy Rudoltice v Čechách - Lanškroun. *Pardubický spolek historie železniční dopravy* [online]. Pardubice, 2021 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <http://www.pshzd.cz/lanskroun2.html>
- [50] Tiskové zprávy: Na trať Česká Třebová – Lanškroun vyjíždí moderní motorový vůz RegioShuttle RS1. *České dráhy a.s.* [online]. Praha, 2021, 11.10.2012 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://www.ceskedrahy.cz/tiskove-centrum/tiskove-zpravy/-14731/>
- [51] Mapy: Provozně-technické parametry tratí. *Správa železnic* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/portal/viewarticle.aspx?oid=594598>
- [52] Třebovický tunel. *Atlas drah Polska, Česka a Slovenska* [online]. Kraków: H. Wagała & S. Fedorowicz, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.atlasdrah.net/cz/pardubicky/?id=baza&poz=10731>
- [53] BITTNER, Jaromír, Jaroslav KŘENEK, Bohumil SKÁLA a Milan ŠRÁMEK. *Malý atlas lokomotiv 2019: speciální vydání pro CZ Loko, a.s.* 1. Praha 6: Gradis Bohemia, 2019, s. 102-103. ISBN 978-80-86925-19-6.
- [54] ZITKO, Josef, 2019. 640-001 [fotografie]. Petrov nad Desnou: 27.8.2019.

- [55] Souprava ČD RegioPanter. *Atlasvozu.cz* [online]. Praha 2: Spolek Želpage, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.atlasvozu.cz/souprava/cd/regiopanter.html>
- [56] Řazení vlaků: Os 3712. *Želpage* [online]. Praha 2: Spolek Želpage, 2020 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/razeni/20/vlaky/cd-3712>
- [57] 1302/2014/EU. Nařízení komise ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii. Brusel: Evropská komise, 2014. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1302&from=EN>
- [58] Technické parametry jednopodlažních jednotek ŠKODA 7Ev a 10Ev. *Dráha*. Praha: Nadatur, 1993-, **2016**(1), 39.
- [59] Product catalog: Traction motors. In: *Škoda electric* [pdf soubor]. Plzeň: Škoda electric, 2012, s. 9-11 [cit. 2021-02-17].
- [60] *Pomůcky GVD* [online]. 2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.gvd.cz/>
- [61] KRÁLÍK, Pavel. *Vozidlový odpor současných kolejových vozidel* [online]. Pardubice, 2014 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/55894>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [62] MICHÁLEK, Tomáš a Jaromír ZELENKA. *Trakční mechanika*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018, s. 34-35. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [63] *ČSD V7. Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982.
- [64] Smlouva: o dodávkách trakční elektrické energie. *Správa železnic* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50172200/sml-dodavky-tee-2019.pdf>
- [65] *UIC-Kodex 451-1. In den Fahrplänen vorzusehende Fahrzeitzuschläge, um die pünktliche Betriebsabwicklung zu gewährleisten – Fahrzeitzuschläge*. 4. Ausgabe, Dezember 2000. ISBN 2-7461-0222-6.
- [66] ČAVAJDA, Pavel. *Analýza spotřeb pomocných pohonů elektrického vlaku* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/40650/1/Diplomova%20prace%20-%20Cavajda%20Pavel.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [67] SŽDC informovala dopravce o dodávkách trakční elektřiny v příštím roce. *Správa železnic* [online]. Praha, 2021, 7. 12. 2018 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/pro-media/tiskovy-servis-tiskove-zpravy-prohlaseni/setkani-k-elektrine>