

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Posouzení vhodnosti provozu elektrických hybridních vlaků na vybraných
linkách v ČR

Bc. František Sládek

Diplomová práce

2021

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. František Sládek**
Osobní číslo: **D19397**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy**
Téma práce: **Posouzení vhodnosti provozu elektrických hybridních vlaků na vybraných linkách v ČR**
Zadávající katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Zásady pro vypracování

Úvod

1. Analýza hybridních vozidel a jejich využití
2. Možnosti využití hybridních vozidel v podmínkách ČR
3. Posouzení vhodnosti provozu na vybraných linkách

Závěr

Rozsah pracovní zprávy: **50 – 60**
Rozsah grafických prací: **5-6**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOHOUT, M., Mechanika dopravy, studijní opora, 2016
HRABÁČEK, J., NACHTIGALL, P., Provozování dráhy a drážní dopravy III, studijní opora, 2015
Dopravní politika ČR pro období 2014-2020 s výhledem do roku 2050, Ministerstvo dopravy ČR

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.**
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

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

doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2021

Prohlašuji:

Práci s názvem Posouzení vhodnosti provozu elektrických hybridních vlaků na vybraných linkách v ČR 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 14.5.2021

Bc. František Sládek

ANOTACE

Práce se zabývá analýzou technologie železničních hybridních vozidel. V návrhové části práce jsou poznatky získané v analytické části využity pro posouzení vhodnosti provozu hybridních vozidel na vybraných železničních linkách. Součástí práce je simulační model pro linku Ostrava - Štramberk, který ukazuje předpoklady spotřeby energie a jízdních dob.

KLÍČOVÁ SLOVA

akumulátorová elektrická jednotka, elektrické hybridní vlaky, elektrizace železnic, vhodnost provozu hybridních vozidel, simulace spotřeby energie a jízdních dob

TITLE

Assessment of the suitability of electric hybrid trains on selected lines in the Czech Republic

ANNOTATION

The thesis deals with the analysis of hybrid railway vehicles. In the projecting part of the thesis, there is the application of knowledge obtained from the analysis for assessment of suitability for operation of hybrid vehicles on the selected railway lines. A simulation model for the Ostrava – Štramberk line, which shows the assumptions of energy consumption and driving times, is included in the thesis.

KEYWORD

battery electric multiple unit, electric hybrid trains, electrification of railways, suitability for operation of hybrid vehicles, simulation of energy consumption and driving times

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D. z Oddělení kolejových vozidel za ochotu a trpělivost při konzultacích simulačního modelu jízdních dob a spotřeby energií. Dále bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Nachtigalovi, Ph.D. za přínosné rady a celkové směřování práce. V neposlední řadě patří poděkování panu Ing. Jiřímu Pohlovi za schopnost obětovat svůj volný čas na odpovědi z řad studentů.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM ZKRATEK	12
ÚVOD	14
1 ANALÝZA TECHNOLOGIE HYBRIDNÍCH VOZIDEL	15
1.1 Vozidla trolej/akumulátor	15
1.1.1 Popis trakce	16
1.1.2 Vlastnosti vozidel trolej/akumulátor	16
1.2 Vozidla trolej/dieselový pohon	18
1.2.1 Popis trakce	18
1.2.2 Vlastnosti vozidel trolej/dieselový pohon	19
1.3 Vozidla palivové články/akumulátor	20
1.3.1 Popis trakce	20
1.3.2 Vlastnosti vozidel palivové články/akumulátor	20
1.4 Další technologie	22
1.5 Shrnutí	22
2 VYUŽITÍ HYBRIDNÍCH VOZIDEL V PODMÍNKÁCH ČR	24
2.1 Liniová elektrizace v ČR	24
2.1.1 Elektrizace ČR v kontextu okolních států	24
2.1.2 Vztah mezi liniovou elektrifikací a hybridními vozidly	25
2.1.3 Vztah mezi liniovou elektrizací a akumulátorem	28
2.2 Traťová třída přechodnosti	29
2.3 Stávající plány na využití hybridních vozidel v ČR	31
2.3 Stávající plány a využití hybridních vlaků v okolních státech	32
2.3.1 Situace v Německu	32
2.3.2 Situace v Rakousku	33

2.3.3 Situace v Polsku	34
2.3.4 Situace na Slovensku	34
3 POSOUZENÍ VHODNOSTI PROVOZU NA VYBRANÝCH LINKÁCH.....	35
3.1 Simulační model jízdních dob a spotřeby energie	35
3.1.1 Účinnosti využité v modelu.....	36
3.1.2 Vzorce využité v modelu.....	38
3.2 Linka Ostrava hl.n. – Štramberk	39
3.2.1 Parametry posuzované výhledové varianty	41
3.2.2 Aplikace simulačního modelu jízdních dob a spotřeby energie.....	43
3.2.3 Cena za použití dráhy jízdou vlaku	51
3.2.4 Údržba vozidla.....	52
3.2.5 Náklady na pořízení vozidla.....	52
3.2.6 Náklady na vybudování stejnosměrné liniové elektrizace	53
3.2.7 Náklady na vybudování střídavé liniové elektrizace.....	54
3.2.8 Převedení nákladů na liniovou elektrizaci na náklady na vlkm	55
3.2.9 Převedení nákladů na akumulátor na náklady na vlkm	57
3.2.10 Vyhodnocení vhodné technologie na lince.....	59
3.3 Linka R27 Ostrava – Krnov - Olomouc.....	60
3.3.1 Parametry posuzované výhledové varianty	61
3.3.2 Stávající oběhy vozidel.....	61
3.3.3 Obraty vozidel s technologií BEMU	62
3.3.4 Náklady na další vozidlo	64
3.3.5 Vyhodnocení vhodné technologie na lince.....	65
3.4 Shrnutí obecných zásad pro vozidla BEMU	66
ZÁVĚR	68
SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
SEZNAM PŘÍLOH.....	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Výtluk na pozemní komunikaci	15
Obrázek 2 - Schéma využívání energie vozidla trolej/akumulátor.....	16
Obrázek 3 - Pokles kapacity akumulátoru v závislosti na počtu cyklů	17
Obrázek 4 - Akumulátor Bombardier MITRAC.....	18
Obrázek 5 - Schéma využívání energie vozidla trolej/diesellový motor	19
Obrázek 6 - Vozidlo trolej/přídavný diesellový motor od polského výrobce Newag	19
Obrázek 7 - Schéma využívání energie vozidla palivové články/akumulátor	20
Obrázek 8 - Srovnání struktury výroby elektrické energie v ČR a Německu	21
Obrázek 9 - Vodíkové vozidlo HydroFLEX.....	22
Obrázek 10 - Orientační hodnoty doby zbrojení/nabíjení/plnění vod. nádrží bez přístavných a odstavných jízd	23
Obrázek 11 - Grafické shrnutí vlastností jednotlivých hybridních technologií.....	23
Obrázek 12 - Struktura hustoty elektrifikace železniční sítě	25
Obrázek 13 - Ostrovní elektrizace jako synergie liniové elektrizace a BEMU	27
Obrázek 14 - Výhledové varianty stavů vodíkových vozidel v závislosti na elektrizaci	27
Obrázek 15 - Limitní možnosti nabíjení stojícího vozidla přes sběrač z trakčního vedení	28
Obrázek 16 - Rychlost obnovy dojezdu vozidel BEMU o hmotnosti 100 tun	29
Obrázek 17 - Životní cyklus akumulátorů v závislosti na liniové elektrizaci	29
Obrázek 18 - Dovolené třídy zatížení dle klasifikace SŽ	30
Obrázek 19 - Testovací hybridní RegioPanter dopravce ČD	31
Obrázek 20 - Vozidlo Coradia iLint	33
Obrázek 21 - Vozidlo CityJet eco v barvách dopravce ÖBB	33
Obrázek 22 - Duální lokomotiva Stadler	34
Obrázek 23 - Ukázka z tvorby modelu v prostředí MS Excel	35
Obrázek 24 - Orientační hodnoty účinností na vozidlech BEMU	36
Obrázek 25 - Orientační hodnoty účinností vozidel EMU, DMU a BMU	37
Obrázek 26 - Stávající vozidlový stav na lince Štramberský express	40
Obrázek 27 - Stav elektrifikace na lince Ostrava – Štamberk.....	40
Obrázek 28 - Výstřižek z výhledového rozsahu dopravy	41
Obrázek 29 - Třívozová varianta vozidla Siemens Mireo	42
Obrázek 30 - Dráhový tachogram vozidel pro úsek Ostrava hl.n. – Studénka (varianta různé JD).....	43

Obrázek 31 - Simulovaný průběh energie v akumulátoru na trase Studénka – Štramberk (včetně obrátového pobytu)	44
Obrázek 32 - Simulovaný průběh energie v akumulátoru na trase Štramberk – Studénka při limitním dynamickém nabíjení.....	44
Obrázek 33 - Minimální hodnota zbývajících procent energie v akumulátoru na lince.....	45
Obrázek 34 - Dráhový tachogram vozidel pro úsek Ostrava hl.n. – Studénka (varianta stejné JD).....	46
Obrázek 35 - Podíl rekuperované energie ve variantě různé JD.....	48
Obrázek 36 - Porovnání nákladů na energii spočítaných simulací na lince	49
Obrázek 37 - Zastávka Sedlnice	50
Obrázek 38 - Přírůstek energetických nákladů na zastávce na znamení Sedlnice.....	51
Obrázek 39 - Skladba nákladů na financování vozidla při úroku 6 % na 15 let.....	53
Obrázek 40 - Schéma plánů na elektrizaci úseku stejnosměrným napětím	53
Obrázek 41 - Skladba nákladů na liniovou elektrifikaci na úseku Sedlnice – Studénka.....	54
Obrázek 42 - Podíl odběru z TV při předpokládaném rozsahu dopravy pro střídavou trakci ..	56
Obrázek 43 - Struktura vozidlových nákladů v 30letém výhledu linky pro stanovený rozsah dopravy	59
Obrázek 44 - Struktura vozidlových nákladů a nákladů na elektrizaci v letech pro stanovený rozsah dopravy na lince Štramberk – Ostrava	60
Obrázek 45 - Stávající stav elektrifikace na lince R27	61
Obrázek 46 - Předpoklad stávajících oběhů na lince R27	62
Obrázek 47 - Doba trvání obrátového dobíjení v ŽST Olomouc	63
Obrázek 48 - Os vlaky jako důsledek potřeby dynamického nabíjení na lince R27	63
Obrázek 49 - Náklady na odpisy vozidla v závislosti na denním proběhu.....	64
Obrázek 50 - Jednotlivé oblasti přepínání na střídavý napájecí systém	66
Obrázek 51 - Obecné předpoklady nutné pro vhodné nasazení jednotek BEMU	67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Hustota a stav elektrifikace železniční sítě.....	24
Tabulka 2 - Dopočtené účinnosti pro elektrickou trakci.....	37
Tabulka 3 - Vybrané parametry vozidel pro simulaci	42
Tabulka 4 - Spotřeba pro variantu různé JD	47
Tabulka 5 - Spotřeba pro variantu stejné JD.....	47
Tabulka 6 - Spotřeba energie na zastávku na znamení Sedlnice	50
Tabulka 7 - Ceny za použití dráhy jízdou vlaku	51
Tabulka 8 - Náklady na pořízení vozidla včetně DPH	52
Tabulka 9 - Předpokládaný počet vlaků elektrické vozby	55
Tabulka 10 - Měrné hodnoty spotřeby elektrické energie	56
Tabulka 11 - Předpoklad ročních provezených hrtkm v elektrické vozbě na daném úseku.....	56
Tabulka 12 - Přepočet nákladů na vlkm	57
Tabulka 13 - Použité vstupní hodnoty pro výpočet zvýšení nákladů z BEMU oproti použití EMU.....	58
Tabulka 14 - Měrné náklady na záložní vozidlo navíc	65

SEZNAM ZKRATEK

- AC – střídavý proud (alternating current)
- BEMU – elektrická jednotka s akumulátory (battery electric multiple unit)
- BMU – dvouzdrojová jednotka (bi-mode multiple unit)
- BP – bakalářská práce
- č. – číslo
- ČD – České dráhy a.s.
- ČR – Česká republika
- DC – stejnosměrný proud (direct current)
- DFJP – Dopravní fakulta Jana Pernera
- DHEMU – diesel-elektrická hybridní jednotka (diesel-electric hybrid unit)
- DMU – diesellová jednotka (diesel multiple unit)
- DPH – daň z přidané hodnoty
- EDMU – elektrická jednotka s přidavným diesellovým motorem (electro-diesel multiple unit)
- EMU – elektrická jednotka (electric multiple unit)
- ETCS – evropský vlakový zabezpečovací systém (European Train Control System)
- hl.n. – hlavní nádraží
- HMU – jednotka s palivovými články na vodík (hydrogen multiple unit)
- hrtkm – hrubotunokilometry
- JD – jízdní doba
- JŘ – jízdní řád
- LiNMC – úložná technologie lithium nikel-mangan-kobalt
- LTO – úložná technologie lithium-titanát oxid
- Mn – manipulační vlak
- MS – Microsoft
- Os – osobní vlak
- OZE – obnovitelné zdroje energie
- ÖBB – Rakouské spolkové dráhy (Österreichische Bundesbahnen)
- prof. – profesor
- ř. – řada

Sp – spěšný vlak
SŽ – Správa železnic, státní organizace
TES – technicko-ekonomická studie
tkm – tunokilometr
TNS – trakční napájecí stanice
TM – trakční měnírna
TV – trakční vedení
vlkm – vlakový kilometr
ŽST – železniční stanice

ÚVOD

Práce je zaměřena na problematiku využití elektrických hybridních technologií v železniční osobní dopravě. V době psaní této práce v České republice (dále také ČR) zatím nedošlo k využití elektrického hybridního vozidla v pravidelné železniční osobní dopravě.

V analytické části se autor zabývá popisem principů technologií hybridních i nehybridních železničních vozidel. Kromě principu technologií se analytická část práce zaměřuje na provozní aspekty hybridních vozidel a srovnání jednotlivých technologií. Autor v analytické části práce také popisuje vlastnosti liniové elektrifikace v ČR a vzájemný vztah infrastruktury a hybridních technologií. Poslední část analytické části práce zahrnuje současný stav využití železničních hybridních vozidel v osobní dopravě v okolních státech.

Cílem práce je aplikovat znalosti získané zpracováním analytické části práce na konkrétní případy železničních linek v ČR za účelem srovnání provozních aspektů a nákladů hybridních a nehybridních vozidel. Na základě zjištěných poznatků je možné rozhodnout o případném využití hybridní technologie na dané lince.

První posuzovanou linkou je linka spojující Ostravu a Štramberk přes Studénku a Kopřivnici, která je zvaná Štramberský express. Linka je v současnosti vedena v dieselové trakci. Omezující neelektrifikovaný úsek je přibližně 13 km dlouhý. Elektrifikace omezujícího úseku Sedlnice – Štramberk je schválena, nicméně pro její provedení je potřeba zpracovat novou studii proveditelnosti. Tato studie proveditelnosti v současnosti není v projektové přípravě, proto připadá autorovi vhodné prověřit možnost dočasného či trvalého provozu hybridních vozidel na této trati. Pro výběr této linky hovoří i místní znalost autora a možnost využít data ze zpracování bakalářské práce pro tvorbu jinak značně časově náročné simulace jízdních dob a spotřebované trakční a netrakční energie.

Jako druhá posuzovaná linka byla vybrána záměrně typově odlišná železniční linka. Vybraná rychlíková linka R27, která propojuje Ostravu s Olomoucí přes Bruntál, je dlouhá bezmála 153 km s délkou neelektrifikované části zhruba 116 km. Pro pravidelný provoz stávající generace elektrických hybridních vozidel není linka vhodná kvůli přílišné délce neelektrifikované části v kombinaci s náročnými sklonovými a směrovými poměry. Autor se proto rozhodl posoudit vhodnost provozu hybridních vozidel na této lince až v rámci výhledového stavu s předpokladem elektrifikace na úseku Opava – Krnov, protože v dohledné době je očekáváno ze strany provozovatele dráhy zadání nové studie proveditelnosti na elektrifikaci tohoto úseku. Případná vhodnost elektrické hybridní technologie na lince R27 může být dalším argumentem pro elektrifikaci úseku Opava – Krnov.

1 ANALÝZA TECHNOLOGIE HYBRIDNÍCH VOZIDEL

Vozidlo schopné využívat dva a více různých druhů energií je vozidlo hybridní. V železniční osobní dopravě se v současné době nejčastěji hovoří o těchto typech hybridních vozidel:

- vozidlo trolej/akumulátor,
- vozidlo trolej/dieselový motor,
- vozidlo palivové články/akumulátor.

Podle autorova názoru je využití hybridních vozidel pro kolejová vozidla přínosnější než u silničních vozidel díky dopravní cestě, která je konstrukčně dimenzovaná na větší hmotnosti vozidel vybavených často hmotnostně náročnými hybridními technologiemi, čímž nevznikají tak vysoké náklady na opravu a údržbu dopravní cesty, jak by tomu bylo například u silničních vozidel. Poškození komunikace, ke kterému může přispět nadměrné zatížení pozemní komunikace, zobrazuje obrázek č. 1.



Zdroj: (1)

Obrázek 1 - Výtluk na pozemní komunikaci

1.1 Vozidla trolej/akumulátor

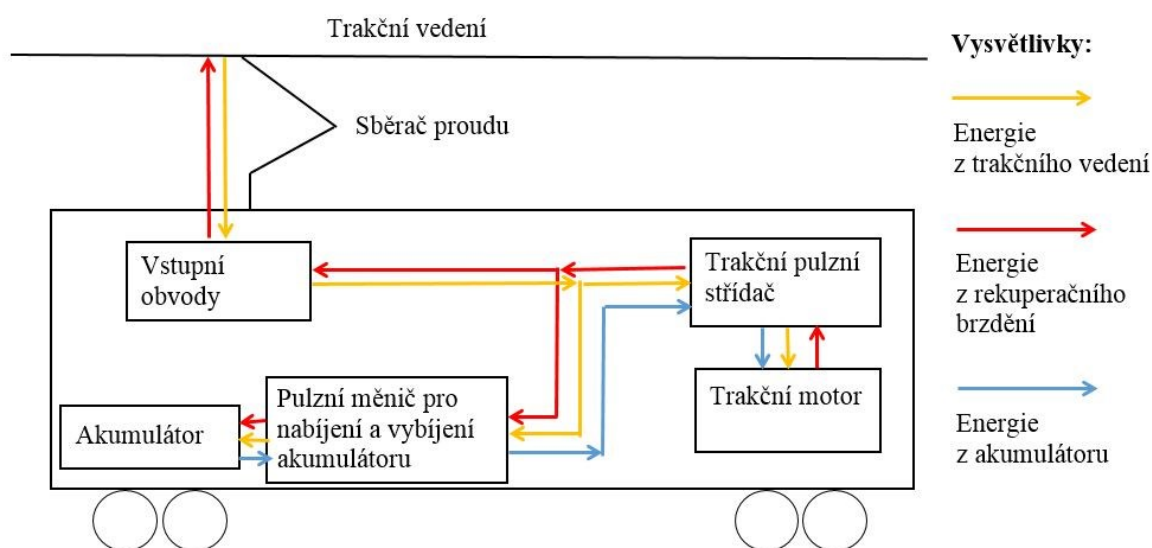
Vozidlo trolej/akumulátor je mezi odbornou veřejností nazýváno akutrolejové vozidlo. Často se používá i pojmenování bateriový vlak. Akutrolejové vozidlo, které je zároveň řešeno jako jednotka, je v angličtině označováno jako battery electric multiple unit (zkráceně BEMU).

1.1.1 Popis trakce

Pro jízdu po líniově elektrifikovaných tratích využívá vozidlo trolej/akumulátor za standardních okolností trakční energii z troleje. Během jízdy po elektrifikované trati lze dobít akumulátor pomocí trakční energie z troleje nebo pomocí rekuperační brzdy.

Při jízdě po neelektrifikované trati je využívána energie z akumulátoru. I při jízdě po neelektrifikované trati je možné dobít akumulátor pomocí rekuperační brzdy, což představuje důležitou energetickou úsporu zejména pro regionální vlaky, které často zastavují. Benefitem vozidel trolej/akumulátor je také možnost statického nabíjení během stání vozidla v elektrizované stanici (2).

Na obrázku č. 2 je schematicky znázorněno využití energie vozidel trolej/akumulátor. Velikost a rozmístění součástí na obrázku č. 2 neodpovídá obvyklému rozmístění a velikosti součástí na vozidlech.

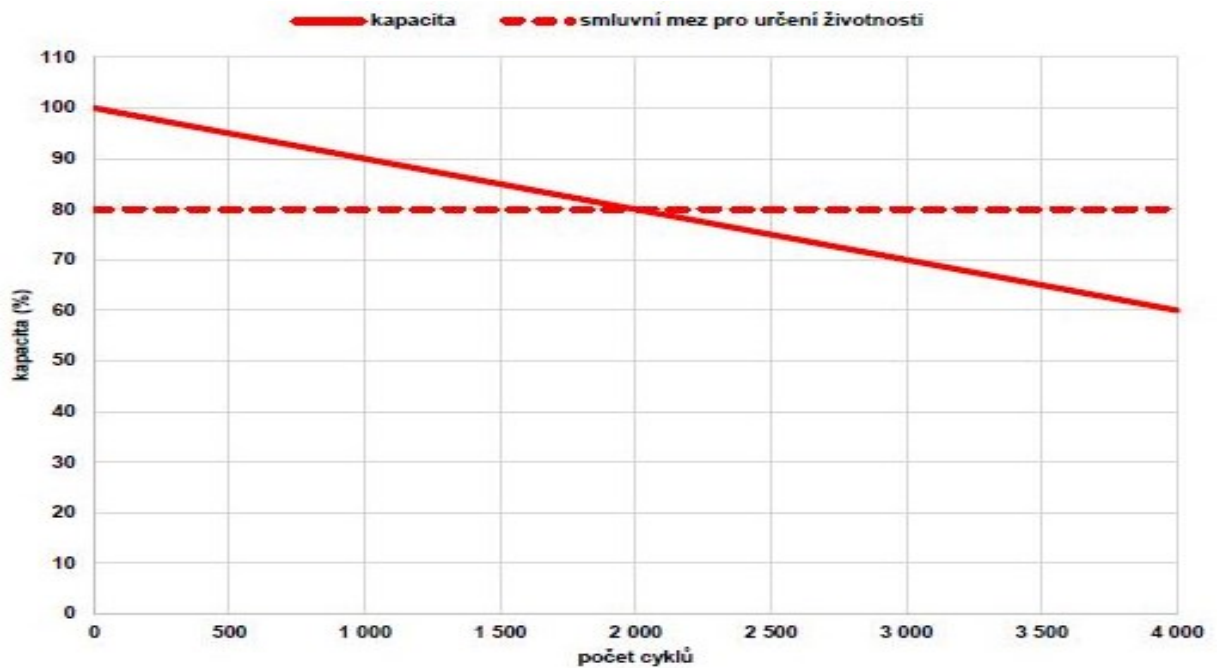


Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

Obrázek 2 - Schéma využívání energie vozidla trolej/akumulátor

1.1.2 Vlastnosti vozidel trolej/akumulátor

Kapacita akumulátoru postupně klesá s opakovaným nabíjením a vybíjením. Dle současného stavu technologií se udává životnost akumulátor přibližně 15 let, což je polovina předpokládané 30leté technické životnosti železničního vozidla. Důležitým parametrem životnosti akumulátoru je počet jednotlivých nabíjecích cyklů.



Zdroj: (2)

Obrázek 3 - Pokles kapacity akumulátoru v závislosti na počtu cyklů

Existují různé druhy lithiových akumulátorů na vozidlech. Mezi používané technologie patří lithium-nikl-mangan-kobalt (zkratka LiNMC) a lithium-titanát oxid (zkratka LTO).

Na konci 2020 měla vozidla trolej/akumulátor standard dovolené třídy nápravové zatížení C dle EN 15 528 s názvem Železniční aplikace - Traťové třídy zatížení pro určení vztahu mezi dovoleným zatížením infrastruktury a maximálním zatížením vozidla. Vozidla trolej/akumulátor lze nasadit v ČR na tratě dovolené třídy nápravového zatížení C dle klasifikace Správy železnic, státní organizace (dále také SŽ).

Dojezdová schopnost vozidel na jedno nabití je při současném stavu technologií zhruba 100 km. Dojezdová vzdálenost závisí zejména na sklonových a rychlostních poměrech trati, svou roli hraje i zvolený jízdní styl strojvedoucího. Nevýhodou akumulátorů je zvýšení hmotnosti vozidla, které se pohybuje okolo 1 tuny na 100 až 200 kWh baterie.

Cena akumulátoru na vozidle Siemens Cityjet Eco o kapacitě 528 kWh lze odhadovat na 1,5 až 2 miliónů euro. Akumulátor MITRAC od výrobce vozidel Bombardier ukazuje obrázek č. 4 (2, 3).



Zdroj: (4)

Obrázek 4 - Akumulátor Bombardier MITRAC

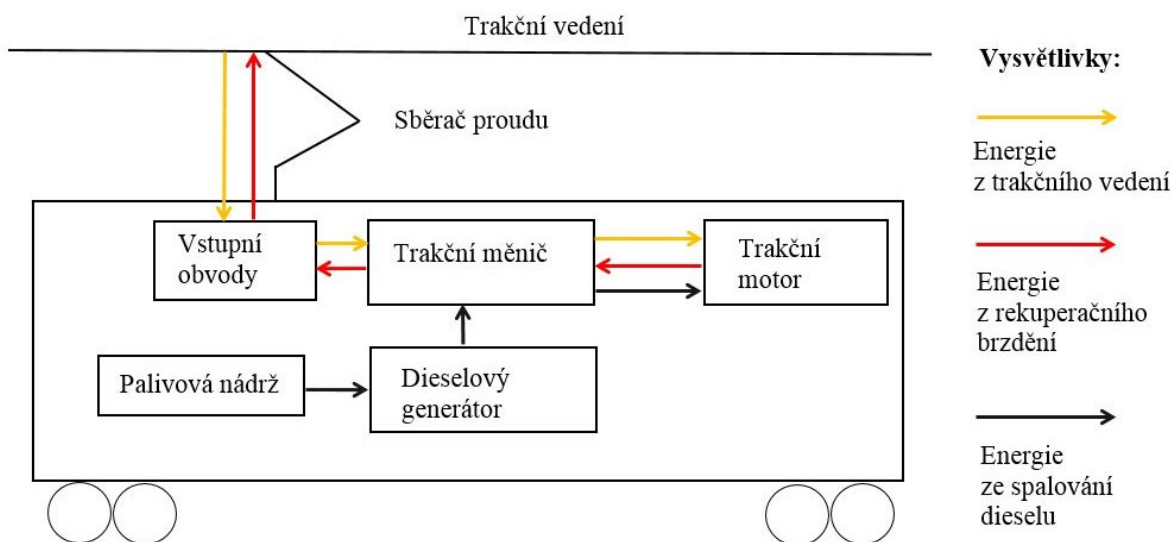
1.2 Vozidla trolej/diesellový pohon

Tato vozidla bývají označována jako elektrická s přídatným diesellovým motorem. Jednotka s technologií trolej/diesellový motor je označována jako BMU (bi-mode multiple unit) neboli bimodální jednotka. Pro pojmenování toho typu vozidla lze použít i anglickou zkratku EDMU. Zkratka EDMU znamená electro-diesel multiple unit. (5).

1.2.1 Popis trakce

Elektrické vozidlo s přídatným diesellovým motorem využívá na elektrifikovaných tratích trakční energii z trolejí. Na úsecích, které to umožňují, může vozidlo vracet energii z rekuperační brzdy zpátky do troleje.

Na neelektrifikovaných tratích je trakční energie získávána pomocí přídatného diesellového motoru. Vozidlo na neelektrifikovaných tratích nemůže rekuperovat. Schéma využívání energie bimodálním vozidlem ukazuje obrázek č. 5 (5).



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3, 5)

Obrázek 5 - Schéma využívání energie vozidla trolej/diesellový motor

1.2.2 Vlastnosti vozidel trolej/diesellový pohon

Výhodou tohoto typu vozidla je vysoký dojezd na jeden objem nádrže, který je v řádech stovek kilometrů až pár tisíců kilometrů. Podle autorovy analýzy se jedná o technologii s největšími dojezdovými schopnostmi mezi hybridními vozidly.



Zdroj: (6)

Obrázek 6 - Vozidlo trolej/přídavný diesellový motor od polského výrobce Newag

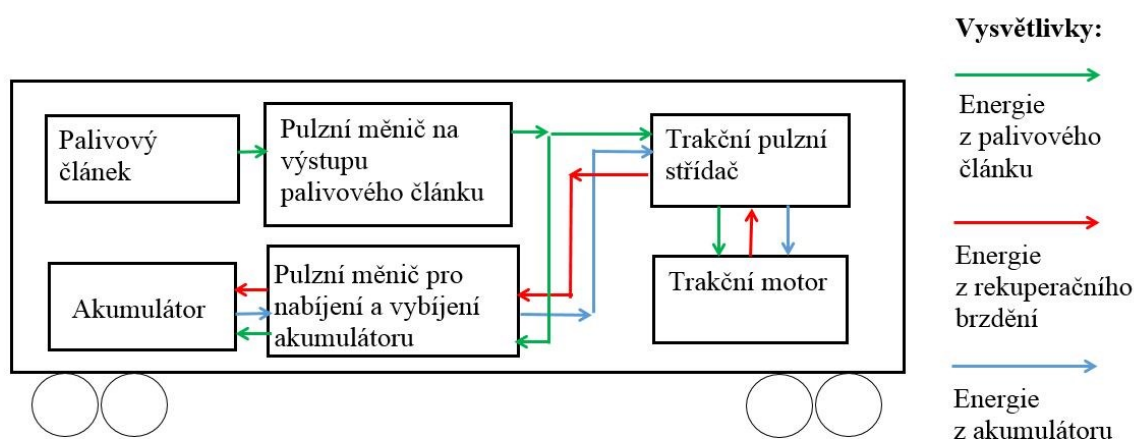
Dvojitá technologie pohonu s sebou nese úskalí zvýšení hmotnosti vozidla. Problémy vzbuzuje také náročná údržba dvou technologií pohonu a plány na odklon od dieselové trakce v Evropě v souvislosti s plněním Green deal (3, 5, 7).

1.3 Vozidla palivové články/akumulátor

Vozidla s palivovými články, které využívají pro výrobu trakční elektrické energie vodík, jsou často označována jako vodíková vozidla. Jednotka, která využívá ve svých palivových článcích vodík, se v angličtině nazývá hydrogen multiple unit (dále také HMU).

1.3.1 Popis trakce

Na vozidle se nachází i akumulátor pro pokrytí výkyvů ve spotřebě trakční energie, protože je žádoucí neměnný výkon palivových článků. Dobíjení akumulátoru může probíhat i při rekuperačním brzdění vlaku. Obrázek č. 7 zobrazuje využívání energie ve vozidlech palivové články/akumulátor (2, 8).



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

Obrázek 7 - Schéma využívání energie vozidla palivové články/akumulátor

1.3.2 Vlastnosti vozidel palivové články/akumulátor

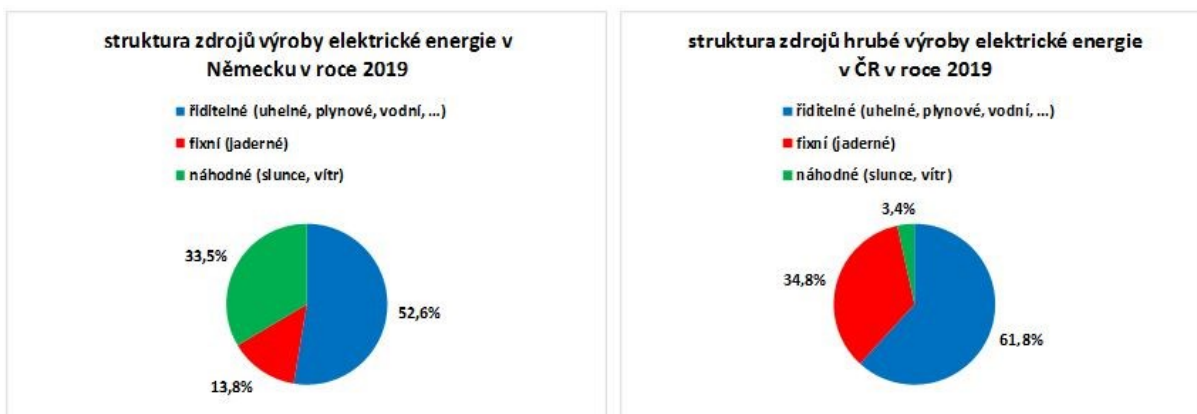
Silnou stránkou těchto vozidel je vysoký dojezd na jedno zbrojení, který dosahuje až 1000 km. Tato technologie je výhodná pro tratě, které nejsou ani částečně vybaveny liniovou elektrizací. Výhodou je konečný bezemisní provoz, který vypouští do svého okolí pouze vodu a teplo.

Mezi slabé stránky vodíkových vozidel patří problematika transportu vodíku. Pro přepravu stlačeného vodíku se používají tlakové nádoby. Poměr hmotnosti tlakové nádoby z oceli

ke hmotnosti přepravovaného vodíku je 50:1. Z tohoto důvodu je žádoucí využívat vodíkové plnicí stanice pouze v těsné blízkosti výroby vodíku.

Vodík je možné vyrábět elektrolýzou z obnovitelných zdrojů a nadbytků sítě a uchovat pro pozdější použití. Účinnost energetického řetězce elektřina/vodík/elektřina je okolo 30 %. Pro srovnání je potřeba uvést účinnost lithiového akumulátoru, která je zhruba 90 %, a také účinnost naší nejvýkonnější přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně, která činí 76,5 %.

Srovnání na obrázku č. 8 ukazuje, že zvýšená potřeba ukládání elektrické energie z nahodilých zdrojů (slunce, vítr) je již aktuální v Německu. Autor se domnívá, že nasazení hybridních vozidel (elektromobily či železniční vodíková vozidla) je přínosné a výhodné zejména v kombinaci s možností využití obnovitelných zdrojů energie, pro které jsou typické velké rozdíly v dodávkách v čase. V takovém případě nevádí v konečné spotřebě v dopravě menší účinnost, protože převažují výhody levného a ekologického zdroje.



Zdroj: (2)

Obrázek 8 - Srovnání struktury výroby elektrické energie v ČR a Německu

Ekonomické náklady na vybudování vodíkové plnicí stanice jsou vysoké, proto jejich síť nemůže být příliš hustá. Při požadavku na rychlé plnění vozidla jsou ekonomické náklady ještě vyšší. Umístění vodíkové plnicí stanice je zpravidla mimo nádraží (2, 3).

Na obrázku č. 9 je zobrazeno vozidlo HydroFLEX s palivovými články na vodík, které na podzim roku 2020 zahájilo provoz v Anglii. V rámci testovacího provozu má vozidlo umístěnou většinu ústrojí vevnitř vozidla. Do budoucna tvůrci vozidla plánují umístění palivových článků, nádrží na vodík a akumulátorů pod rám vozidla. Umístění těchto součástí pod rám vozidla je málo obvyklé řešení, které výrobce argumentuje zvětšením užitého prostoru pro cestující. Autor k tomuto málo obvyklému umístění palivových článků a zejména nádrží na vodík přidává svou obavu o bezpečnost cestujících způsobenou umístěním pod vozidlem. (9).



Zdroj: (9)

Obrázek 9 - Vodíkové vozidlo HydroFLEX

1.4 DALŠÍ TECHNOLOGIE

Mezi méně využívané technologie hybridních pohonů patří diesel-elektrické hybridní jednotky, které mají spalovací motor a akumulátor. Pokud tato vozidla nemají sběrač proudu, jsou v angličtině označována jako diesel-electric hybrid unit (zkráceně také DHEMU). Dobíjení akumulátoru probíhá zejména při odstavení vozidla. Výhodou těchto vozidel je možnost rekuperace na neelektrifikovaných tratích.

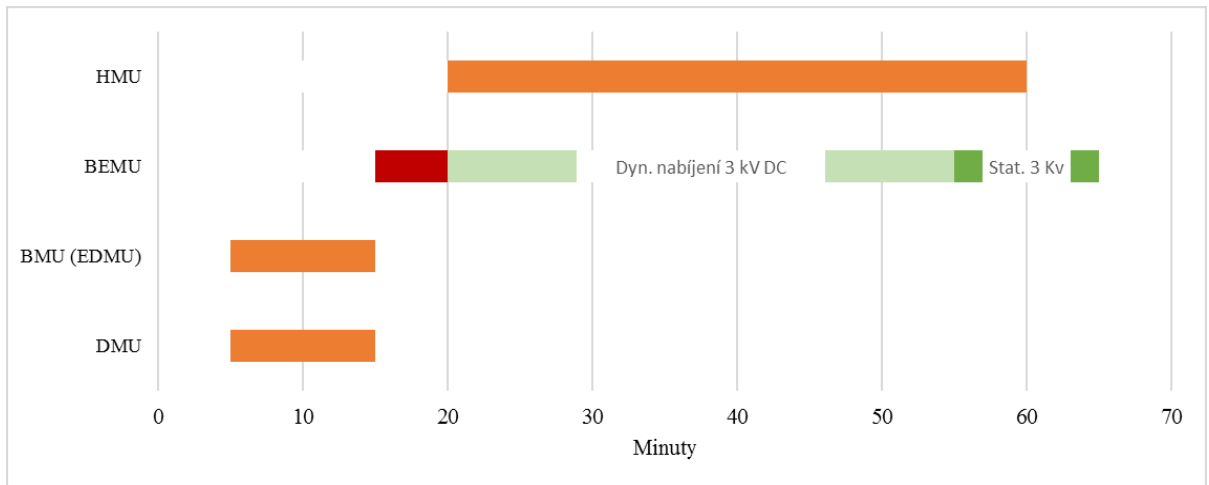
Vozidla, která mají akumulátor, sběrač pro trakční napětí a zároveň diesellový motor se nazývají zkráceně BEMU+D, což znamená battery electric multiple unit + diesel (10).

1.5 SHRUTÍ

Při porovnání doby zbrojení/nabíjení/doplnění vod. nádrží u jednotlivých technologií vycházejí čísla nejpříznivěji pro vozidla využívající jako palivo diesel. U vodíkových plnicích stanic se může doba plnění značně lišit v závislosti na výkonu stanice. Vodíkové a diesellové plnicí stanice jsou zpravidla umístěny mimo nástupiště pro cestující, proto je potřeba při aplikaci v konkrétní stanici připočítat ještě dobu přistavných a odstavných jízd k místu plnění.

V případě nabíjení akumulátoru je při použití střídavého napětí 25 kV doba nabíjení okolo 15 minut. Dynamické nabíjení během jízdy je u stejnosměrného napájení 3 kV rychlejší

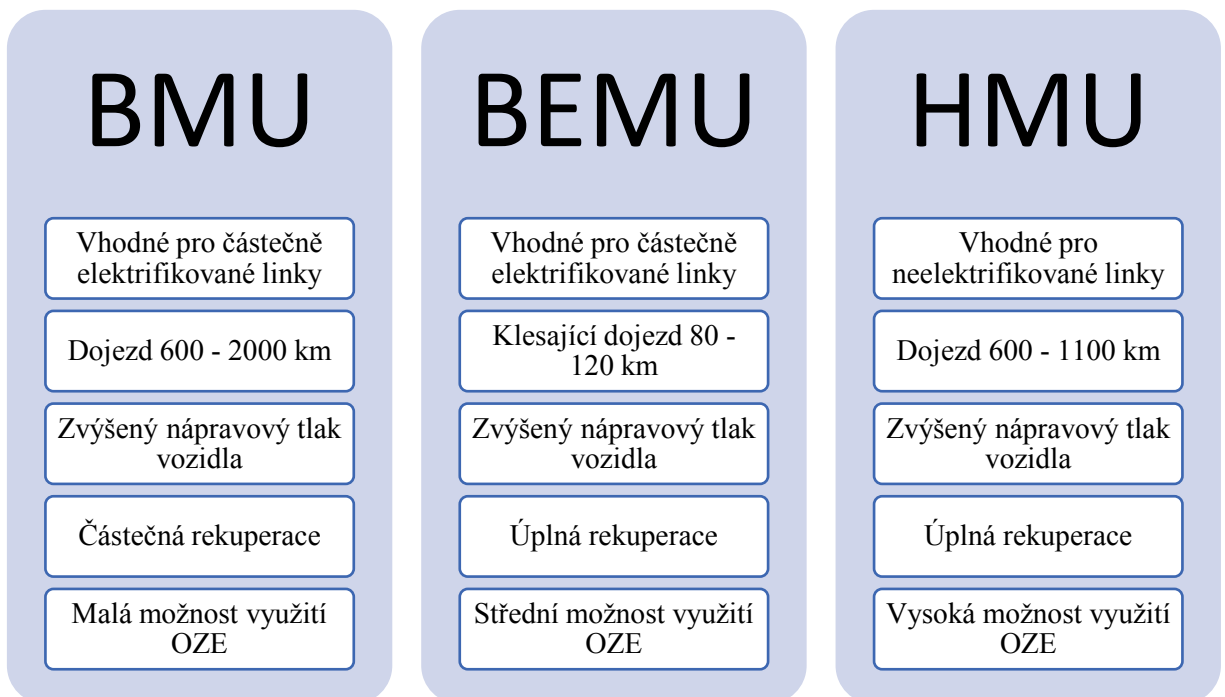
variantou než statické napájení. V tabulce je pro srovnání doplněna i varianta čistě diesellové jednotky (zkratka DMU).



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

Obrázek 10 - Orientační hodnoty doby zbrojení/nabíjení/plnění vod. nádrží bez přístavných a odstavných jízd

Zkratka OZE na shrnující grafice č. 11 znamená obnovitelné zdroje energie. Ze shrnující grafiky jsou patrné rozdíly mezi vlastnostmi jednotlivých technologií, které vedou k jiným vhodným provozním nasazením těchto hybridních technologií.



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3, 10)

Obrázek 11 - Grafické shrnutí vlastností jednotlivých hybridních technologií

2 VYUŽITÍ HYBRIDNÍCH VOZIDEL V PODMÍNKÁCH ČR

Následující kapitola analyzuje klíčové infrastrukturální parametry rozhodné pro využití hybridních vozidel v ČR.

2.1 Liniová elektrizace v ČR

Velmi důležitým parametrem, který vymezuje efektivní nasazení hybridních vozidel, je stav elektrizace železniční sítě. Návrh výhledové elektrizace v ČR ukazuje příloha A. Jelikož příloha A byla vytvořena v roce 2017, přibyly mezi tratě schválené k elektrizaci do doby psaní této práce následující úseky:

- Veselí nad Lužnicí – Česká Velenice,
- Mladá Boleslav – Nymburk + Všejsanská spojka,
- Chomutov – Březno u Chomutova (11).

V souvislosti s elektrifikací je také podle autorova názoru nutné zmínit plán SŽ na přepínání celé elektrické trakční soustavy na 25 kV/50 Hz.

2.1.1 Elektrizace ČR v kontextu okolních států

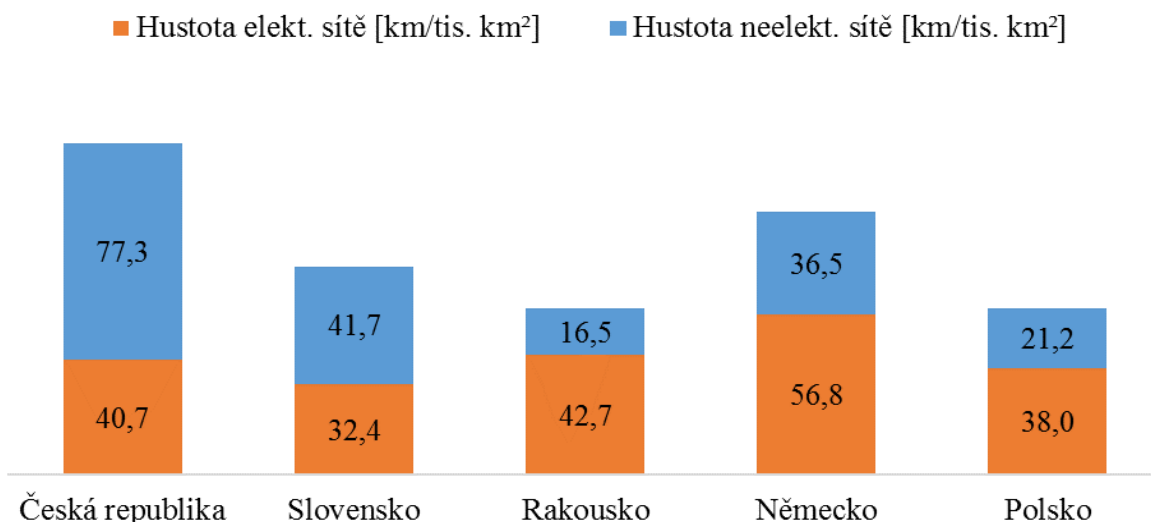
Pro srovnání elektrizace železnic v ČR s okolními státy byly autorem vybrány parametry a data uvedená v tabulce č. 1.

Tabulka 1 - Hustota a stav elektrifikace železniční sítě

Stát	Rozloha [tis.km ²]	Délka sítě [km]	Neelekt. tratě [km]	Elekt. tratě [km]	Hustota neelekt. sítě [km/tis. km ²]	Hustota elekt. sítě [km/tis. km ²]
Česká republika	79	9316	6103	3213	77,3	40,7
Slovensko	49	3629	2042	1587	41,7	32,4
Rakousko	84	4968	1385	3583	16,5	42,7
Německo	358	33422	13075	20347	36,5	56,8
Polsko	313	18538	6629	11909	21,2	38,0

Zdroj: Autor na podkladě (12)

Při srovnání hustoty elektrifikované sítě s okolními státy dosáhla ČR srovnatelné výše jako okolní státy. Kromě průměrné hustoty elektrifikované sítě má ČR nadprůměrně hustou síť neelektrifikovaných tratí.



Zdroj: Autor na podkladě (12)

Obrázek 12 - Struktura hustoty elektrifikace železniční sítě

Podle autorova názoru nabízí ČR s 6103 km neelektrifikované železniční sítě nadstandardní příležitosti pro využití hybridních vozidel oproti většině evropských zemí, proto je nutné klást na tuto problematiku v českém prostředí zvláštní důraz.

Ve vysoké hustotě české železniční sítě vidí autor i efekt hnacího vozidla řady (dále také ř.) 810 a jeho modifikací. Toto vozidlo umožňuje vzhledem ke své relativně malé velikosti a často nulovým odpisům hospodárný a efektivní provoz na méně vytížených tratích, které by jinak měly větší tendenci zaniknout.

Pokud se nepodaří diesellovou ř. 810 a její modifikace v dohledné době efektivně nahradit hybridním řešením, hrozí řadě méně využívaných regionálních tratí do budoucna existenciální problémy (13).

2.1.2 Vztah mezi liniovou elektrifikací a hybridními vozidly

Náklady na vybudování liniové elektrifikace železnic jsou vysoké. Vybudování liniové elektrizace je často spojeno s modernizací tratě, a proto se v praxi málokdy provádí samostatně. Nicméně cena kilometru pouze liniové elektrizace 25 kV AC bez nutnosti vybudování nové trakční napájecí stanice začíná na 7 miliónech korun na kilometr. Pokud stávající trakční napájecí stanice nemá dostatečný výkon, celé řešení se prodražuje (3, 14).

Využívaná liniová elektrifikace ovšem vede ke značným trakčním úsporám vzniklým z levnějšího provozu elektrických vozidel oproti trakci diesellové. Liniová elektrifikace je proto efektivní pouze na tratích s vysokým dopravním zatížením, kde je provoz vlaků

dostatečně velký na to, aby trakční úspora z průjezdu elektrických vozidel překonala vysoké náklady na vybudování liniové elektrifikace.

Na linkách, kde je liniová elektrifikace v celé délce linky, je nejefektivnější provoz elektrickými vozidly bez hybridních technologií.

Není vhodné vnímat liniovou elektrifikaci jako přímého konkurenta vozidel trolej/akumulátor a vozidel trolej/diesellový motor. V mnohých případech dochází při využití zmíněných vozidel a liniové elektrizace ke vzniku synergií.

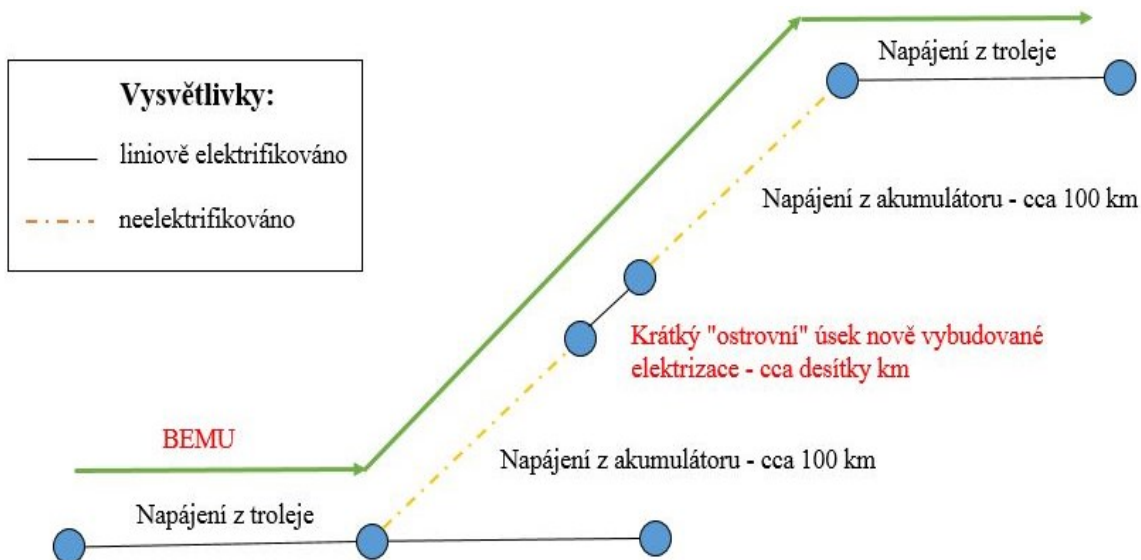
Možné synergie liniové elektrizace a akutrolejových vozidel:

- pokračující liniová elektrizace zkracuje vozební ramena bez elektrizace, a tím snižuje nároky na dojezd akumulátorových vozidel a také vytváří další místa, kde lze akumulátorová vozidla nabíjet;
- vozidla trolej/akumulátor zhodnocují investice do liniové elektrizace tím, že napájí nejen vlaky na příslušné trati, ale i vlaky na okolních tratích bez liniové elektrizace.

Příkladem vhodné synergie liniové elektrizace a vozidel BEMU může být například vybudování krátkého ostrovního úseku elektrizace, které umožní průjezd vozidla BEMU a minimalizuje náklady na liniovou elektrizaci. Potřebná délka ostrovního úseku by podle autorova názoru v případě obrázku č. 13 závisela zejména na typu trakční soustavy, cestovní rychlosti, použitém výkonu vozidla a parametrech nabíjení při jízdě mimo ostrovní úsek.

Pro noční aktivní odstavení elektrického hybridního vozidla mimo elektrizovanou síť existuje možnost vybudování odstavných kolejí s krátkým úsekem trakčního vedení nebo zřízení nabíjecího stojanu. Tyto body pro noční aktivní odstavení vozidla mimo elektrifikovanou síť značně rozšíří provozní stabilitu jízdního řádu v případě mimořádností a snižují nároky na potřebnou kapacitu akumulátoru.

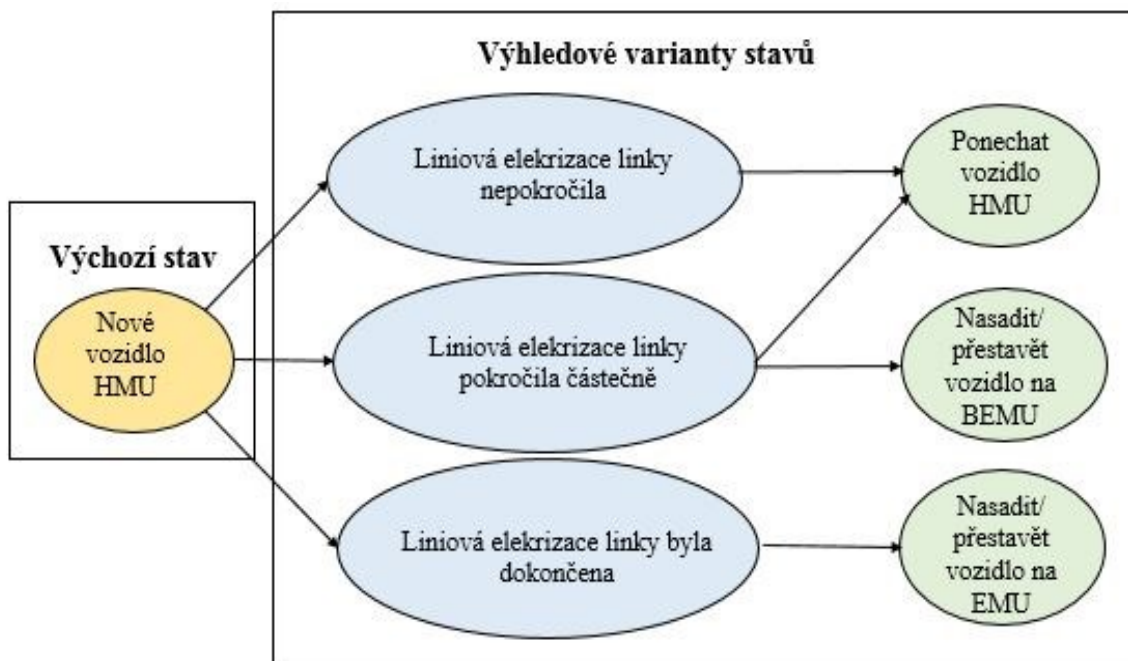
Možnou synergií liniové elektrizace a vozidel trolej/diesellový motor umožňuje prodloužení liniové elektrizace na větší část linky, což zkracuje vozební ramena bez elektrizace. Podle autorova názoru je důsledek takovéto elektrizace snížení nákladů dopravce na trakční a netrakční energii.



Zdroj: Autor na podkladě (3)

Obrázek 13 - Ostrovní elektrizace jako synergie liniové elektrizace a BEMU

Synergie mezi liniovou elektrizací a vozidly s vodíkovými palivovými články autor nepředpokládá. Nicméně výrobci kolejových vozidel zmiňují možnost přestavby vodíkového vozidla na trolejové BEMU či EMU (2, 3). Schéma možných scénářů výhledových variant stavů vozidel HMU v závislosti na liniové elektrizaci načrtl autor do obrázku č. 14.



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

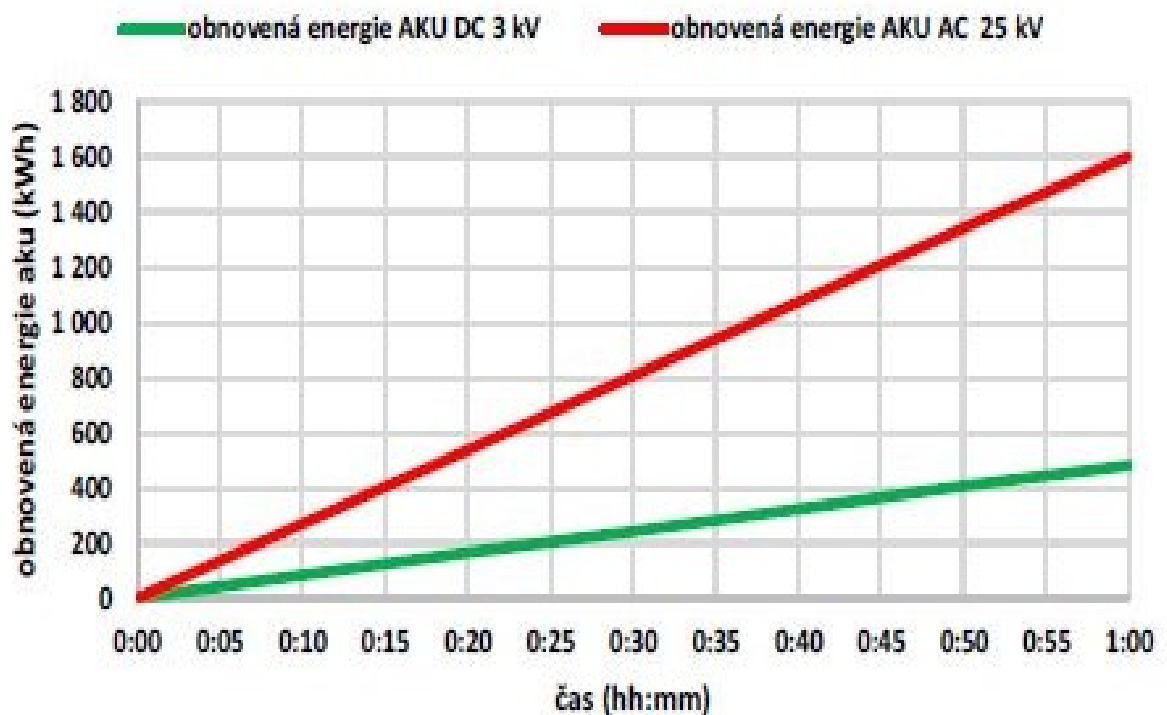
Obrázek 14 - Výhledové varianty stavů vodíkových vozidel v závislosti na elektrizaci

2.1.3 Vztah mezi liniovou elektrizací a akumulátorem

Vozidlo BEMU je možné nabíjet při stání vozidla (statické nabíjení) a při jízdě vozidla pod trakčním vedením (dynamické nabíjení). Limitujícím faktorem nabíjení akumulátoru je výkon troleje a maximální nabíjecí výkon daného akumulátoru.

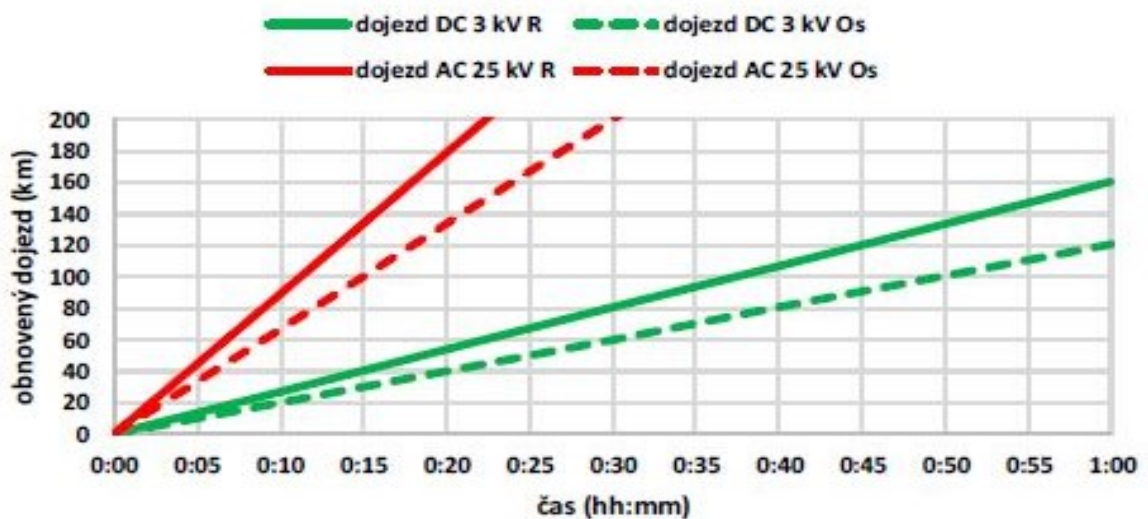
Rychlost nabíjení akumulátoru závisí na typu trakční napájecí soustavy. Statické nabíjení při napětí 25 kV AC je zhruba 3,33krát rychlejší než nabíjení při 3kV napětí DC. Plánované přepínání trakční soustavy ČR na 25 kV AC tedy může významně přispět k lepšímu využití vozidel BEMU.

V případě statického nabíjení je maximální proud z troleje navíc omezen na 200 A kvůli riziku přepálení troleje. Z hlediska zatížení sběrače je teoreticky možné během jízdy odebrat 4krát větší výkon než při stání vozidla. Nicméně stále je potřeba mít na paměti omezení maximálním nabíjecím výkonem daného akumulátoru. V praxi umožňuje dynamické nabíjení větší rychlost pouze v případě stejnosměrného napětí. Stávající akumulátory nejsou dimenzované na maximální výkonové možnosti střídavé soustavy během jízdy.



Zdroj: (2)

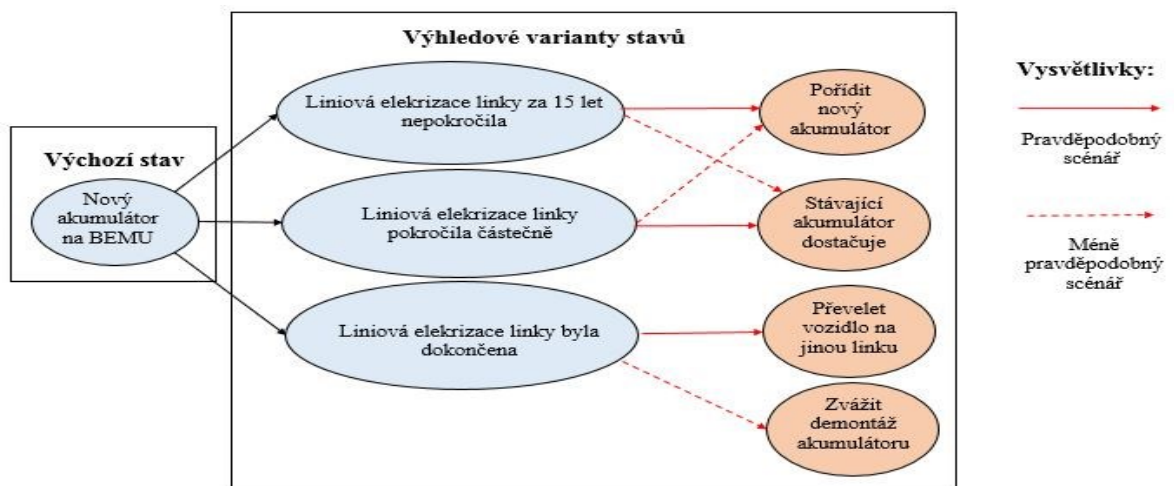
Obrázek 15 - Limitní možnosti nabíjení stojícího vozidla přes sběrač z trakčního vedení



Zdroj: (2)

Obrázek 16 - Rychlost obnovy dojezdu vozidel BEMU o hmotnosti 100 tun

Obvykle po poklesu kapacity akumulátoru na lince nastává čas ke zvážení jeho obnovy. V závislosti na případném postupu liniové elektrizace existují různé scénáře, které popisují postup při úvaze o obnově, ponechání či demontáži akumulátoru na vozidle. Scénáře životního cyklu akumulátorů na vozidle BEMU vykresluje autor na obrázku č. 17 (2, 3, 15, 16).



Zdroj: Autor na podkladě (3)

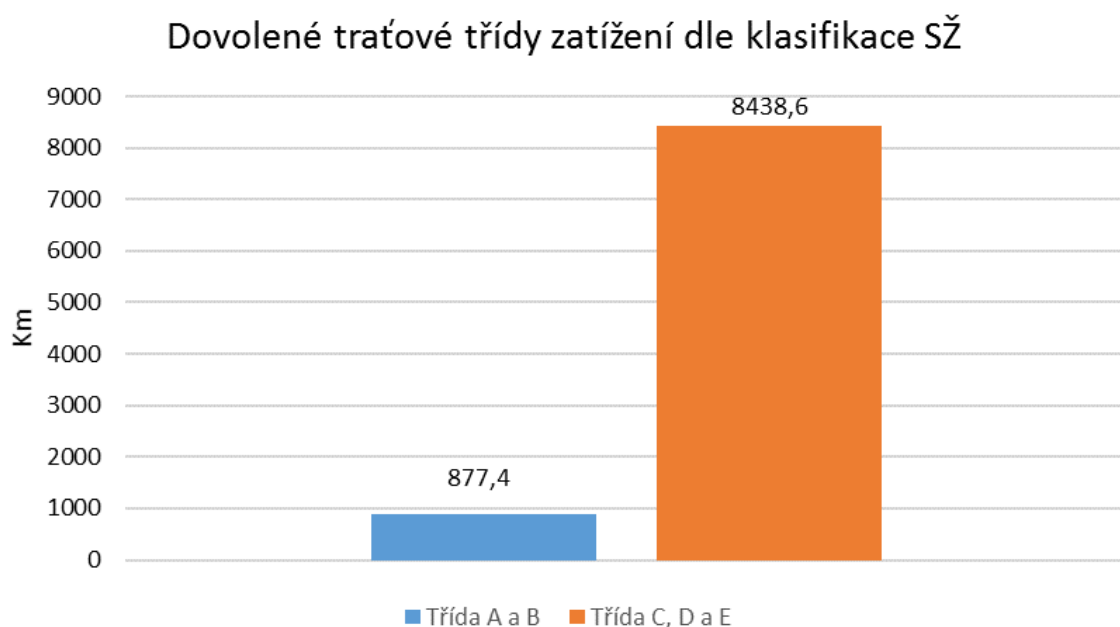
Obrázek 17 - Životní cyklus akumulátorů v závislosti na liniové elektrizaci

2.2 Traťová třída přechodnosti

Hmotnost hybridních technologií ve vozidle zvyšuje celkovou hmotnost vozidla a jeho traťovou třídu přechodnosti (v práci je použito také synonymum nápravový tlak). Určování traťové třídy přechodnosti není jednoduché, rozhodující je obrazec posouvajících sil. Kromě

hmotnosti a dvojkolí mají na obrazec vliv i délka vozidla, vzdálenost otočných bodů podvozků a rozvor podvozků. Způsob výpočtu určuje metodika. A ty jsou dvě různé – starší SŽ a nová EN. Do budoucna je v ČR plán přechodu na metodiku EN 15 528 s názvem Železniční aplikace - Traťové třídy zatížení pro určení vztahu mezi dovoleným zatížením infrastruktury a maximálním zatížením vozidla (3).

Na trhu nyní neexistuje hybridní vozidlo, které by možné provozovat na tratích s dovolenou třídou nápravového zatížení A a B dle klasifikace EN 15 528 a dle klasifikace SŽ. Ačkoli SŽ systematicky pracuje na zvyšování dovolených tříd nápravového zatížení, stále zbývá na síti okolo 877,4 km tratí s nápravovým zatížením A a B, kde neexistuje hybridní vozidlové řešení (stav na konci roku 2020). Délku úseků v traťové třídě A a B ve srovnání se zbylými třídami zobrazuje obrázek č. 18 (3, 18, 19).



Zdroj: Autor na podkladě (18, 19)

Obrázek 18 - Dovolené třídy zatížení dle klasifikace SŽ

Značný problém podle autora je, že omezující tratě s dovolenou třídou A nebo B, mohou být obsaženy v provozním souboru objednatele společně s dalšími tratěmi, které by těžší vozidla byly schopny provézt. Dopravce a objednatel, který pravděpodobně bude usilovat o homogenní vozový park, nemůže na takovýchto provozních souborech nabídnout homogenní vozový park s hybridní technologií. Pokud výrobci vozidel ve spolupráci s manažerem infrastruktury nenabídnou řešení, předpokládá autor společně se zánikem

dieselové trakce také vyškrtnutí provozu na tratích s nízkým provozem a třídou zatížení z objednávky a nahrazení hybridními autobusy.

2.3 Stávající plány na využití hybridních vozidel v ČR

V roce 2021 v ČR bohužel neexistuje využití železničních hybridních vozidel v ostrém provozu, proto byl autor donucen pojmenovat podkapitolu stávající plány, a nikoliv stávající využití hybridních vozidel v ČR.

Do plánů dopravců a objednatelů na využití hybridních vozidel může významně vstupovat nejistota ze strany státní správy. Od 1. ledna 2021 došlo ke snížení spotřební daně z motorové nafty o 1 Kč/litr, což mohlo zahýbat důvěrou dopravců v hybridní technologie (20).

Dopravce České dráhy a.s. (dále také ČD) plánuje do budoucna nahradit motorové vozy řady 810 a 814 až 200 kusy nových vozidel typu trolej/akumulátor. Vzhledem k malé rozšířenosti hybridních vozidel s nízkou kapacitou na trhu zřejmě bude muset dopravce pomoci s vývojem vozidla (13).

Dopravce České dráhy a.s. na konci roku 2018 oznámil své rozhodnutí o přestavbě dvou vozidel RegioPanter na hybridní vozidlo s bateriemi. Jedno z testovacích vozidel RegioPanter ukazuje obrázek č. 19. Tisková zpráva ČD původně hovořila o zprovoznění hybridních vlaků v Jihomoravském kraji do konce roku 2019. Zřejmě vzhledem k náročnosti celého projektu došlo k zpoždění, na jaře roku 2020 byla vydána tisková zpráva o úvahách o výrobě zcela nové elektrické jednotky, do které by byly baterie namontovány při výrobě (21, 22).



Zdroj: (21)

Obrázek 19 - Testovací hybridní RegioPanter dopravce ČD

Dopravce Arriva vlaky s.r.o. informoval o svých úvahách na využívání vodíku na rychlíkové lince mezi Ústí nad Labem a Libercem. Vodík by se měl získávat z chemického závodu v Ústí nad Labem. Začátek využívání vodíku pro palivové články by mohl být v roce 2025 (23).

Zástupci Moravskoslezského kraje razí cestu využití vodíku v dopravě pro meziměstské autobusy a železniční vozidla. Motivací pro zavedení vodíku v tomto kraji je nadprůměrné znečištění ovzduší a existence odpadních plynů z důlních a hutních provozů, ze kterých je možné vyrábět vodík (24, 25).

V Ústeckém kraji byla na počátku roku 2020 zahájena jednání o možnosti nasazení vozidel s vodíkovým pohonem a reálnosti takového provozu v železniční osobní dopravě (26).

2.3 Stávající plány a využití hybridních vlaků v okolních státech

Vysoké pořizovací náklady na vozidlo jsou často velkou překážkou pro zavedení hybridních technologií. Nicméně výrobci kolejových vozidel se snaží o zvýšení cenové dostupnosti pro dopravce a objednatele nových hybridních technologií například sníženou pořizovací cenou prototypů vozidel. Výrobce v tomto případě sníží své finanční zisky za prodej nových technologií, protože v jeho zájmu je otestování prototypu nové technologie v ostrém provozu a s tím související zviditelnění, které umožňuje budoucí zisky v podobě dalších objednávek. Výrobce tedy sníženou pořizovací cenou za prototyp investuje do tržní expanze (20).

2.3.1 Situace v Německu

V Německu došlo k prvnímu nasazení vodíkových hybridních vlaků Coradia iLint v roce 2018. Vozidlo Coradia iLint lze vidět na obrázku č. 20. Po více než roce a půl ostrého provozu na regionálních tratích neskrývá francouzský výrobce Alstom optimismus. Potenciál vodíkového pohonu vidí i objednatelé v Dolním Sasku, Severním Porýní-Vestfálsku, Bádensku-Württembersku a v Hesenském dopravním sdružení Rhein-Main-Verkehrsverbund. Na konci roku 2020 bylo závazně objednáno již 41 vodíkových vlaků od výrobce Alstom a podepsány předběžné dohody o dodávce desítek dalších vodíkových vlaků (27).

Pravidelný provoz akutrolejových vozidel v železniční osobní dopravě v Německu zatím neexistuje. Nicméně obrysy provozování těchto vozidel na německých tratích jsou již velmi reálné. Například organizátor dopravy v Sasku závazně objednal 11 akutrolejových vozidel od výrobce Alstom (28).



Zdroj: (8)

Obrázek 20 - Vozidlo Coradia iLint

2.3.2 Situace v Rakousku

V sousedním Rakousku provedl první jízdy s hybridním bateriovým vozidlem CityJet eco od společnosti Siemens dopravce Österreichische Bundesbahnen (dále také ÖBB). Toto vozidlo má umístěno akumulátory na střeše. Délka vozidla přes spřáhla je okolo 75 metrů. Maximální rychlost v režimu trolej činí 140 km/h. Bateriový režim nabízí rychlost 100 km/h se zrychlením až 0,77 metrů za sekundu².



Zdroj: (29)

Obrázek 21 - Vozidlo CityJet eco v barvách dopravce ÖBB

Cestující si poprvé mohli vyzkoušet tuto novinku na regionálních tratích na jaře roku 2019. Od toho data se postupně zvyšuje četnost těchto hybridních vozidel na celé síti (26).

Na podzim roku 2020 byl zahájen zkušební provoz vodíkových vlaků Coradia iLint od Alstomu i v Rakousku. Oproti provozu v rovinatých částech Německa má zkušební provoz v Rakousku za cíl prověřit vodíkový pohon i na sklonově náročnějších tratích (30).

2.3.3 Situace v Polsku

Informaci o stávajícím provozu hybridních vozidel v železniční osobní dopravě autor nedohledal. V současnosti preferovaným výhledovým hybridním řešením v Polsku jsou vozidla, která kombinují elektrické trakční napájení s dieslovým spalovacím motorem. Dodání těchto vozidel očekávají dopravci Koleje Dolnośląskie, Łódzka Kolej Aglomeracyjna a Województwo zachodniopomorskie. Všechny dodávky vozidel zajistí polský výrobce Newag (31, 32, 33).

2.3.4 Situace na Slovensku

V březnu roku 2021 dodal výrobce Stadler duální lokomotivu pro provoz v síti Tatranských elektrických železnic a Ozubnicovej železnice, která kombinuje elektrický a dieslový pohon a bude jezdit na ozubnicové a běžné trati. V zimě bude možné využít lokomotivu jako sněžný pluh a ovládat ji také na dálku. Duální lokomotiva byla zakoupena společně s 5 elektrickými jednotkami typu GTW za celkovou cenu 38 milionů euro (34).



Zdroj: (34)

Obrázek 22 - Duální lokomotiva Stadler

3 POSOUZENÍ VHDNOSTI PROVOZU NA VYBRANÝCH LINKÁCH

V návrhové části autor posuzuje vhodnost vybraných železničních linek v rámci ČR pro provoz hybridními vozidly. Autor záměrně vybírá linky, kterou jsou od sebe rozdílné například délkou, délkou neelektrifikovaného úseku, plány na výhledovou elektrifikaci a podobně.

3.1 Simulační model jízdních dob a spotřeby energie

Spotřeba trakční a netrakční energie tvoří nezanedbatelnou součást nákladů železniční linky. Pro výpočet potřebných trakčních a netrakčních energií bylo i vzhledem k pandemické situaci navázáno na simulační model z autorovy bakalářské práce (dále také BP) z roku 2019 (35, 36).

Na model z BP byl doplněna nadstavba v podobě spotřeby energie a vozidlového akumulátoru. Tvorbě modelu napomohly konzultace s Ing. Tomášem Michálkem, Ph.D. z Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky DFJP. Problematika nabíjení akumulátoru a netrakční spotřeby byla konzultována s prof. Jaroslavem Novákem z Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky DFJP.

Misto zastavení? i	x [m]	S ₁ (při jízdě od Stramberka) [%]	S ₂ (při jízdě od Studénky) [%]	R	V _{traťová} [km/h]	O ₀ [N/kN]	S ₀ [%]	O ₀ [N]	v [m/s]	V [km/h]	O ₀ [N/kN]	F _{ok} [N]	O ₀ [N]	a [m*s ⁻²]	delta t [s]	t _{celk} [s]	V ₀	
616	1360	13600	-7,00	7,00	---	80,00	0,00	-7,00	-8068,73	7,21	25,96	0,77	-89 288,94	882,91	-0,65	1,76	393,93	
617	1359	13590	-7,00	7,00	---	80,00	0,00	-7,00	-8068,73	6,24	22,48	0,76	-89 294,67	877,18	-0,65	2,30	396,23	
618	1358	13580	-7,00	7,00	---	80,00	0,00	-7,00	-8068,73	5,10	18,36	0,76	-89 300,39	871,46	-0,65	5,55	401,77	
619 Příbor	1357	13570	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	3,61	12,98	0,75	O619+J619	865,73	1,55	3,59	405,37	
620	1356	13560	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	0,00	0,00	0,75	190 000,00	860,00	1,55	1,30	406,67	
621	1355	13550	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	5,57	20,05	0,76	161 622,14	873,66	1,33	0,91	407,57	
622	1354	13540	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	7,58	27,30	0,77	118 665,87	885,35	0,99	0,94	408,51	
623	1353	13530	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	8,79	31,64	0,78	102 410,54	894,03	0,86	0,90	409,42	
624	1352	13520	-7,00	7,00	505	80,00	1,19	-5,81	-6699,21	9,71	34,97	0,78	92 647,56	901,58	0,78	0,86	410,28	

Zdroj: Autor

Obrázek 23 - Ukázka z tvorby modelu v prostředí MS Excel

Model jízdních dob a spotřeby vozidlových energií, který je sestavený v prostředí MS Excel, využívá integrační krok 10 metrů. Nespornou výhodou modelu sestaveného v prostředí MS Excel je možnost úplné kalibrace modelu uživatelem, která nemusí být při zakoupení

komerčního softwaru možná. Nevýhodou je vysoká časová náročnost tvorby takového modelu.

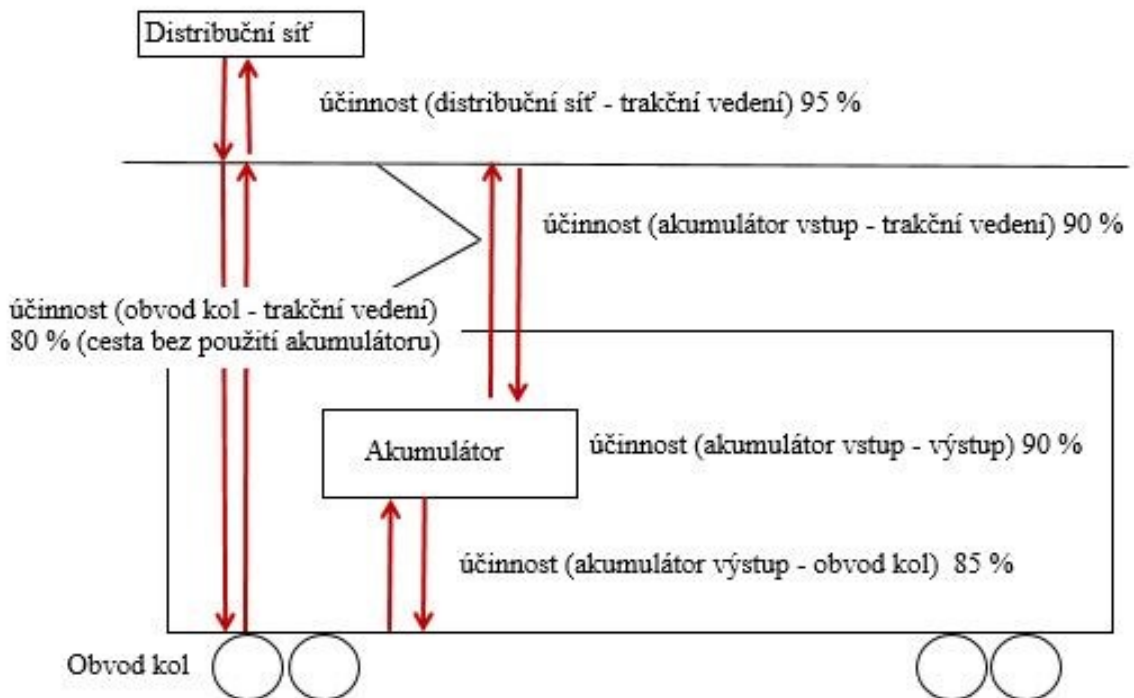
V rámci simulace byla použita určitá zjednodušení:

- 100 % rekuperace pod stejnosměrným napětím 3 kV DC;
- postavená vlaková cesta vždy v přímé koleji;
- započtení netrakční spotřeby při nácestných pobytech až v obrátové stanici.

3.1.1 Účinnosti využité v modelu

Veškeré hodnoty účinnosti uvedené v modelu je nutné uvažovat jako hodnoty orientační. V reálném světě jsou hodnoty účinnosti vázány zejména na konkrétní řadu vozidla.

Orientační hodnoty účinnosti na vozidlech BEMU ukazuje obrázek č. 24. Veškeré hodnoty účinnosti na obrázku platí pro přeměnu energie v jednom směru.

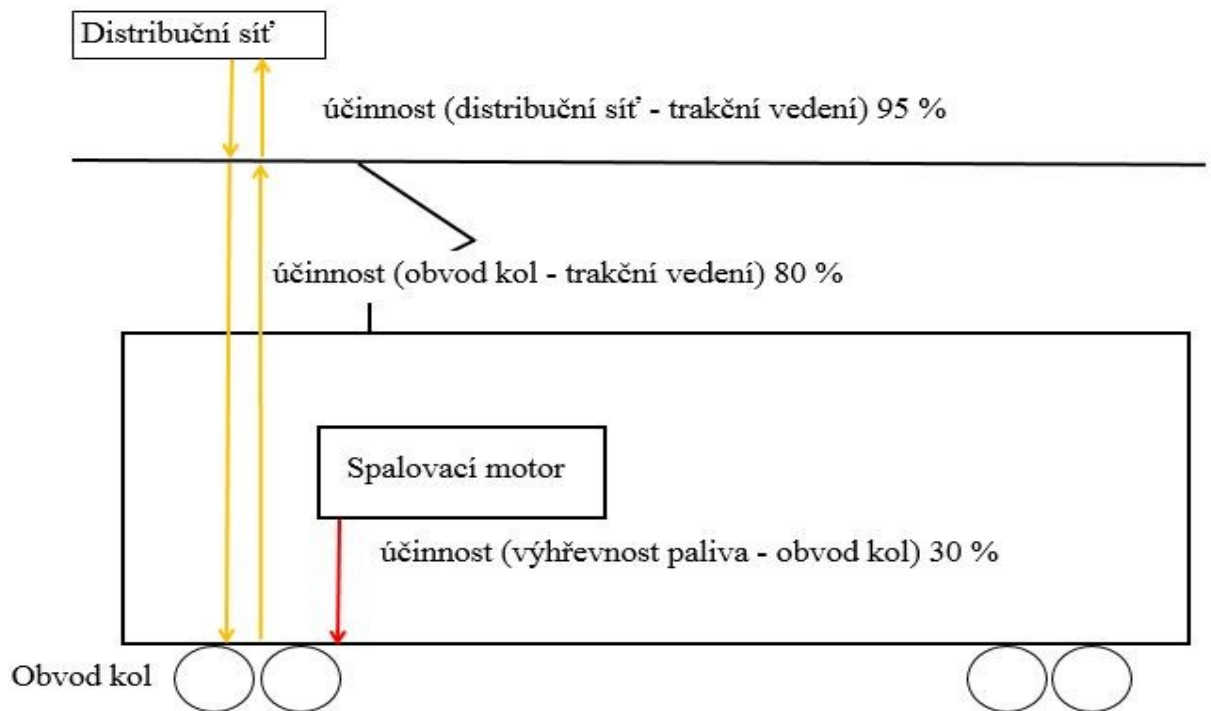


Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

Obrázek 24 - Orientační hodnoty účinností na vozidlech BEMU

Pro označení elektrických jednotek je v práci použita zkratka EMU. Dieselové jednotky se značí jako DMU.

Orientační hodnoty účinností, které platí pro přeměnu energie v jednom směru na jednotkách EMU, DMU a BMU jsou zobrazeny na obrázku č. 25.



Zdroj: Autor na podkladě (2, 3)

Obrázek 25 - Orientační hodnoty účinností vozidel EMU, DMU a BMU

Na základě uvedených orientačních hodnot účinností lze s pomocí vzorce č.1 dopočítat hodnoty účinnosti.

$$\eta_{1-n} = \left(\frac{\eta_1}{100} \cdot \frac{\eta_2}{100} \cdot \dots \cdot \frac{\eta_n}{100} \right) \cdot 100\% \quad [\%] \quad (1)$$

Kde: η_{1-n} účinnost mezi prvky 1 až n [%]

η_1 účinnost prvku 1 [%]

η_2 účinnost prvku 2 [%]

η_n účinnost prvku n [%]

Vybrané dopočtené hodnoty účinnosti pro elektrickou trakci dle vzorce č. 1 zaokrouhlené na celá čísla ukazuje tabulka č. 2. Dopočtené hodnoty jsou v modelu použity.

Tabulka 2 - Dopočtené účinnosti pro elektrickou trakci

Pojmenování účinnosti	Procenta účinnosti
Distribuční síť – trakční vedení – obvod kol (bez akumulátoru)	76
Distribuční síť – trakční vedení – akumulátor – obvod kol	65
Obvod kol – trakční vedení – obvod kol (bez akumulátoru)	64
Obvod kol – akumulátor – obvod kol	65

3.1.2 Vzorce využité v modelu

V modelu byly použity vzorce uvedené v bakalářské práci autora a vzorec č. 1 v této práci. Vzorce, které nebyly použity v bakalářské práci, jsou zaznamenány níže.

Pro výpočet trakční energie na úseku je použit vzorec č. 2. Účinnost je potřeba zjistit s pomocí vzorce č. 1 dle použité trakce a případného využití akumulátoru.

Při obměně vzorce č. 2, kdy se $F_{ok,i}$ zamění za brzdou sílu F_{brz} , lze získat rekuperovanou energii na úseku $E_{r,i}$.

$$E_{tr,i} = \frac{100}{\eta_{tr,i}} \cdot W_{tr,i} = \frac{100}{\eta_{tr,i}} \cdot \frac{F_{ok,i}}{3,6} \cdot \Delta x \quad [\text{kWh}] \quad (2)$$

Kde: $E_{tr,i}$ spotřeba trakční energie na úseku [kWh]
 $\eta_{tr,i}$ účinnost získání trakční energie na úseku [%]
 $W_{tr,i}$ trakční práce na úseku [kWh]
 Δx délka úseku i [m]
 $F_{ok,i}$ síla na obvodu kol na úseku [kN]

Spotřebu netrakční energie na úseku je možné vypočítat dle vzorce č. 3. Sečtením všech úseků linky je možné získat netrakční energii na celé lince.

$$E_{ntr,i} = \frac{100}{\eta_{ntr,i}} \cdot P_{ntr,i} \cdot \Delta t \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

Kde: $E_{ntr,i}$ spotřeba netrakční energie na úseku [kWh]
 $\eta_{ntr,i}$ účinnost získání netrakční energie na úseku [%]
 $P_{ntr,i}$ trvalý příkon pomocných potřeb na úseku [kW]
 Δt čas strávený na úseku [h]

Výpočet nákladů na trakční energii dieselového železničního vozidla na úseku byl proveden dle vzorce č. 4.

$$N_{naf,i} = \frac{(E_{tr,i} + E_{ntr,i})}{H_{naf}} \cdot C_{naf} \quad [\text{Kč}] \quad (4)$$

Kde: $E_{tr,i}$ spotřeba trakční energie na úseku [kWh]
 $E_{ntr,i}$ spotřeba netrakční energie na úseku [kWh]
 H_{naf} výhřevnost nafty [kWh/l]
 C_{naf} cena nafty [Kč/l]
 $N_{naf,i}$ náklady na motorovou naftu na úseku [Kč]

Náklady na elektrickou energii na úseku lze stanovit podle vzorce č. 5. Při intenzivnějším brzdění rekuperační brzdou mohou vyjít náklady na elektrickou energii na úseku záporně. V takovém případě se jedná o výnosy.

$$N_{el,i} = (E_{tr,i} + E_{ntr,i} - E_{r,i}) \cdot C_{el} \text{ [Kč]} \quad (5)$$

Kde: $E_{tr,i}$ spotřeba trakční energie na úseku [kWh]
 $E_{ntr,i}$ spotřeba netrakční energie na úseku [kWh]
 $E_{r,i}$ energie rekuperovaná na úseku [kWh]
 C_{el} cena za odběr a dodání elektrické energie [Kč/kWh]
 $N_{el,i}$ náklady elektrickou energií na úseku [Kč]

Pro výpočet maximální možné energie odebrané z troleje je v práci použit vztah č. 6. Zároveň autor dodává, že pro nabíjení akumulátoru není vždy žádoucí odebírat maximální možnou energii z troleje, protože například při statickém nabíjení (režim stání) akumulátoru maximální možnou hodnotou po delší dobu hrozí riziko přepálení troleje. Agresivní nabíjecí strategie navíc snižuje životnost akumulátoru.

$$E_{trol\ max,i} = \frac{100}{\eta} \cdot U_{trol} \cdot I_{sběr} \cdot \Delta t \text{ [kWh]} \quad (6)$$

Kde: $E_{trol\ max}$ maximální možná energie odebraná z troleje na úseku [kWh]
 η účinnost [%]
 U_{trol} trolejové napětí [kV]
 $I_{sběr}$ maximální proud sběrače [A]
 Δt čas strávený na úseku [h]

Energii nabíjení/vybíjení akumulátoru na úseku je možné získat ze vzorce č. 7. Pokud na úseku není trolejové vedení, použije se $E_{trol\ max} = 0$. Při rekuperačním brzdění, které probíhá při dynamickém dobíjení (režim jízda) akumulátoru je nutné uvažovat limit maximálního nabíjecího výkonu akumulátoru. V případě, že je maximální nabíjecí výkon akumulátoru překročen, vozidlo sníží/přeruší odběr z troleje a preferuje energii z rekuperačního brzdění (15, 37).

$$E_{aku,i} = E_{trol\ max} - E_{tr,i} - E_{ntr,i} + E_{r,i} \text{ [kWh]} \quad (7)$$

Kde: $E_{aku,i}$ energie nabíjení/vybíjení akumulátoru na úseku [kWh]
 $E_{trol\ max}$ maximální možná energie odebraná z troleje [kWh]
 $E_{tr,i}$ spotřeba trakční energie na úseku [kWh]
 $E_{ntr,i}$ spotřeba netrakční energie na úseku [kWh]
 $E_{r,i}$ energie rekuperovaná na úseku [kWh]

3.2 Linka Ostrava hl.n. – Štramberk

Od jízdního řádu 2019 jezdí na této lince v pracovní dny 4 páry spěšných vlaků. Vlaky jsou označovány jako Štramberský express (38). Ve stávajícím stavu jezdí na lince souprava sestavená z vozidel ř. 842 + Bdtⁿ⁷⁵⁷.



Zdroj: Autor

Obrázek 26 - Stávající vozidlový stav na lince Štramberký express

Linka je v současnosti elektrifikována kromě úseku Sedlnice – Štramberk, který je dlouhý přibližně 13,2 km. Ačkoli je v rámci výhledových stavů uvažováno s liniovou elektrizací až do ŽST Štramberk, v horizontu nejbližších let se liniová elektrifikace této stavby pravděpodobně neuskuteční (11).



Zdroj: (39)

Obrázek 27 - Stav elektrifikace na lince Ostrava – Štramberk

Protože zatím k realizaci elektrifikace nedošlo, autor prověřuje variantu, ve které by byla na linku dočasně nebo trvale nasazena hybridní vozidla BEMU, čímž by mohlo být upuštěno od liniové elektrizace a úspory tímto získané by byly vloženy do nákupu hybridních vozidel.

Dle autorovy dostupných informací tato varianta nebyla v rámci Studie proveditelnosti Beskydy prověřována. Poznatky zjištěné prověřením této varianty je následně možné zobecnit pro odvození zákonitostí mezi vhodností liniové elektrifikace a BEMU.

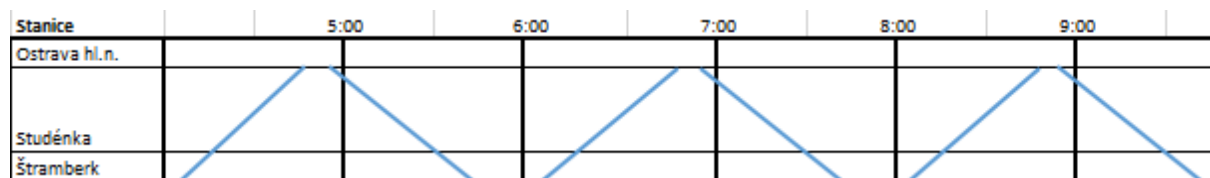
Pro důslednou simulaci spotřeby energií vozidla, kterou autor považuje pro posouzení vhodnosti provozu hybridních vozidel za nezbytnou, je potřeba náročná simulace v MS Excel. Časově velmi náročnou součástí takovéto simulace je důsledné zadání směrových a sklonových poměrů na trati do modelu. Autor se rozhodl pro tuto linku i z toho důvodu, že část dat již byla zpracována v rámci BP.

Pro určení vhodnosti provozu autor zvolil nákladovou metodu jednotlivých vozidel, přičemž se zaměřil na náklady, které bezprostředně souvisí s výběrem trakce vozidla a případné hybridní technologie vozidla. Mezi náklady, které se nejvíce mění v závislosti na použité trakci vozidla, autor zařadil:

- Vozidlové energie (trakční a netrakční),
- Cena za použití dráhy jízdou vlaku,
- Údržba vozidla,
- Splátka:
 - Pořízení vozidla,
 - Modernizace vozidla,
 - Obnovy akumulátoru,
 - Instalace mobilní části ETCS.

3.2.1 Parametry posuzované výhledové varianty

V posuzované výhledové variantě je uvažováno s rozšířením rozsahu dopravy na 10 párů vlaků denně v čase od 4 do 23 h v taktu 2 h. O víkendu je plánovaný rozsah dopravy na lince poloviční. Roční objem dopravy na lince ve výhledové variantě činí 260 374 vlkm. Stávající spojení na lince S8 by zůstalo zachováno.



Zdroj: Autor

Obrázek 28 - Výstřižek z výhledového rozsahu dopravy

Vybrané parametry vozidel potřebné pro simulaci jízdních dob a energií ukazuje tabulka č. 3. Některé hodnoty vozidel byly pro nedostatek informací odhadnuty ve spolupráci s příslušnými vyučujícími. Trvalý výkon pomocných potřeb je synonymem pro netrakovní spotřebu. Vozidlo Regioshark druhé generace bylo pro nedostatek znalosti o vstupních parametrech ze simulace vyjmuto.

Tabulka 3 - Vybrané parametry vozidel pro simulaci

Parametr:	ř. 842 + Bdtm	Siemens Mireo (dvouvozové)	Škoda Regiopanter (dvouvozový)
Maximální rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	100	140	160
Hmotnost obsazené jednotky [t]	90	117	103,5
Odrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	0,45	0,65	0,65
Vozidlový odpor [N]	$1250 + 0,34\cdot v^2$	$860 + 0,034\cdot v^2$	$860 + 0,034\cdot v^2$
Maximální síla na obvodu kol [kN]	95	200	131
Trvalý výkon pomocných potřeb [kW]	96	60	60
Maximální výkon [kW]	424	1700	1360
Maximální výkon při jízdě z aku [kW]	-	900	-
Kapacita akumulátoru [kWh]	-	528	-
Limitní nabíjecí výkon aku [kW]	-	1500	-

Zdroj: Autor na podkladě (15, 16, 40, 41)

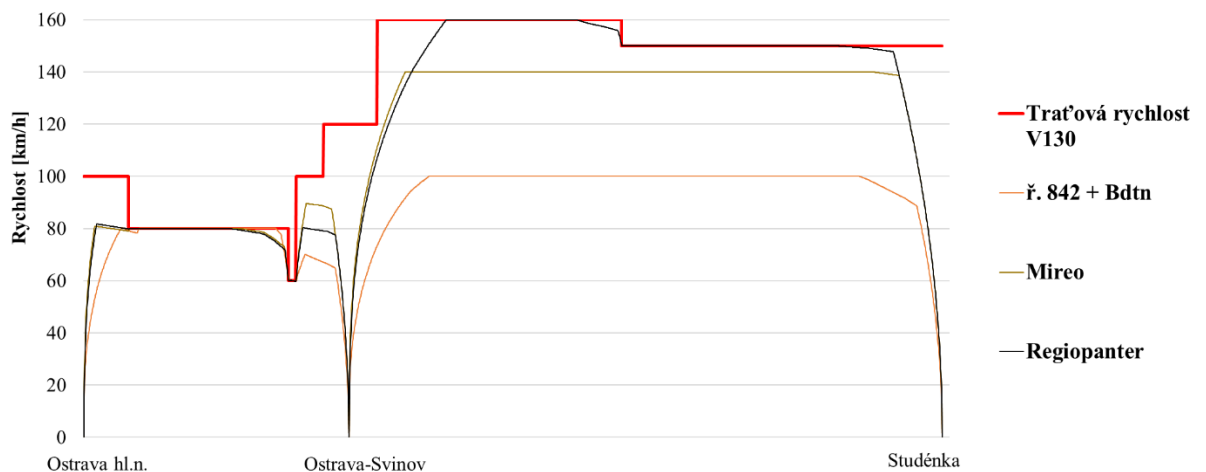


Zdroj: (42)

Obrázek 29 - Třívozová varianta vozidla Siemens Mireo

3.2.2 Aplikace simulačního modelu jízdních dob a spotřeby energie

Autor v simulaci předpokládá dravý jízdní styl strojvedoucího. Strojvedoucí v simulaci využívá při rozjezdu hodnotu blížící se maximálnímu možnému výkonu na obvodu kol. Po dosažení maximální možné rychlosti se snaží tuto rychlost udržet. Před rychlostním omezením zpravidla využije krátký výběh a následně zahájí intenzivní provozní brzdění.



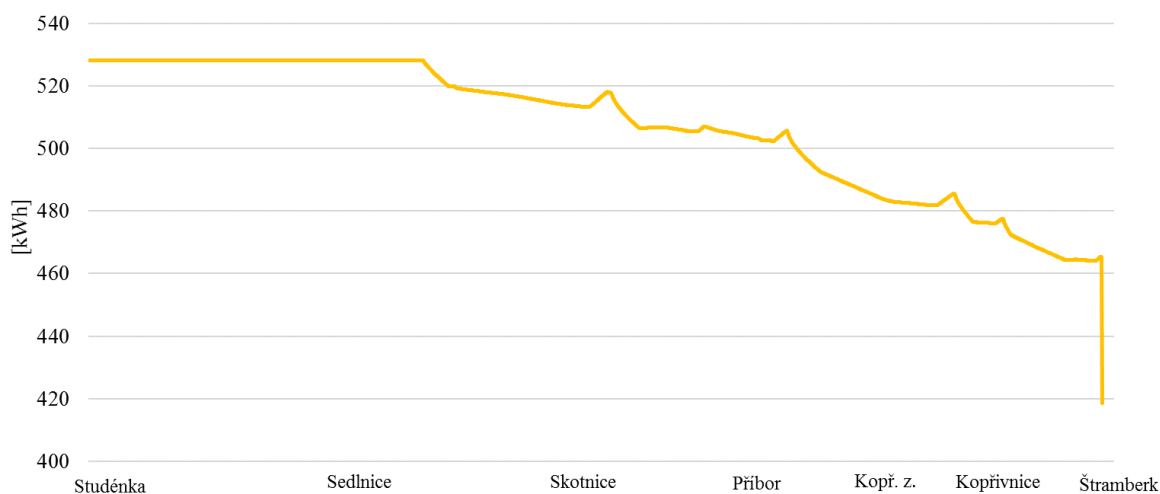
Zdroj: Autor

Obrázek 30 - Dráhový tachogram vozidel pro úsek Ostrava hl.n. – Studénka (varianta různé JD)

Z předpokládaného průběhu rychlosti dle simulačního modelu lze poukázat na rozdílné dynamické vlastnosti jednotlivých vozidel. Vozidla Regiopanter a Mireo využijí nabízený rychlostní profil na úseku Ostrava hl.n. – Studénka podstatně lépe než stávající ř. 842 + Bdtm. V případě vozidla Regiopanter ukazuje model úsporu JD oproti ř. 842 + Bdtm přibližně 3,5 minut. Pro vozidlo Mireo činí úspora oproti stávajícímu stavu 3 minut. Přínos těchto vozidel na lince by byl žádoucí i z důvodu snížení doby obsazení kapacitně vytíženého koridorového úseku Ostrava hl.n. – Studénka.

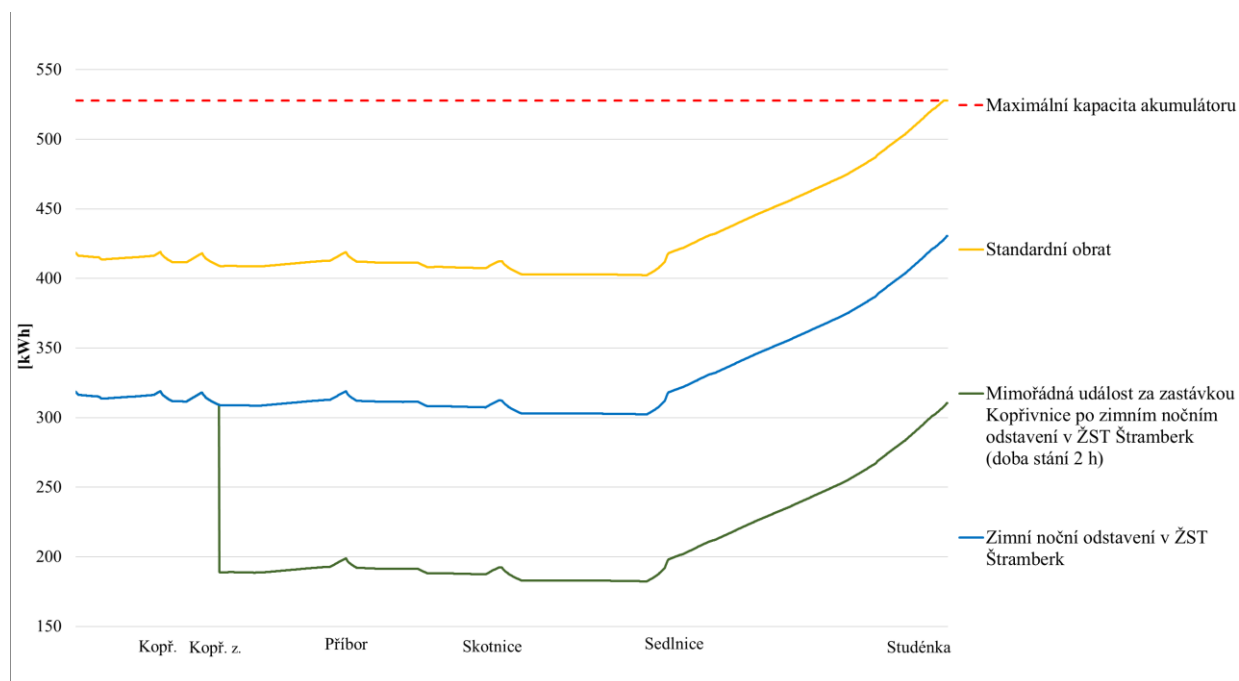
V modelu byla zachycena situace vybití a nabíjení akumulátoru na vozidle Siemens Mireo včetně obrátového pobytu 35 minut. Z obrázku č. 31 je patrný konec liniové elektrizace za zastávkou Sedlnice. Energie spotřebovaná během nácestných zastavení byla odečtena až v obrátové stanici.

Z obrázků průběhu akumulátoru je patrná menší energetická náročnost pro cestu vozidla ve směru ze ŽST Štramberk do ŽST Studénka, kde činí průměrná výše náhradního sklonu mínus 5,77 promile, oproti opačnému směru jízdy.



Zdroj: Autor

Obrázek 31 - Simulovaný průběh energie v akumulátoru na trase Studénka – Štramberk (včetně obrátového pobytu)

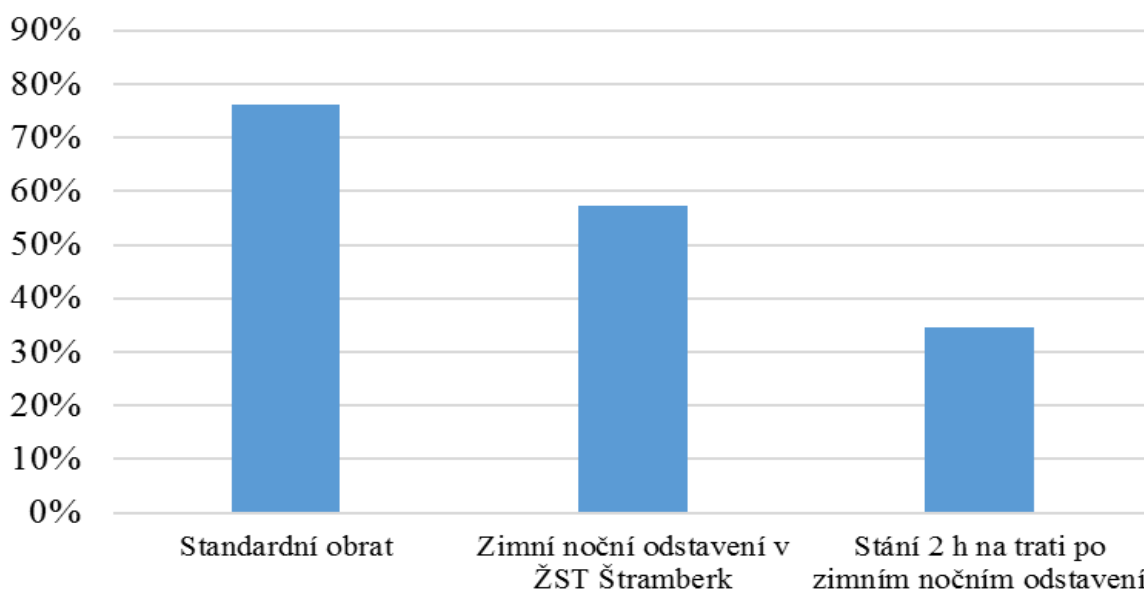


Zdroj: Autor

Obrázek 32 - Simulovaný průběh energie v akumulátoru na trase Štramberk – Studénka při limitním dynamickém nabíjení

Speciální případ stavu akumulátoru nastává na obratu po aktivním zimním nočním odstavením vozidla v ŽST Štramberk. Na prvním ranním obratu takového vlaku je potřeba odečíst zhruba 100 kWh za aktivní noční odstavení vozidla. Nejnižší hodnota kapacity akumulátoru při provozu bez mimořádností na této lince činí přibližně 57 % z maximální kapacity akumulátoru.

Během provozu vozidel BEMU je nezbytné předpokládat možnost vzniku provozních mimořádností a mimořádných událostí. Například pro vyšetření střetu vlaku s osobou je vhodné uvažovat minimálně 2 hodiny zpoždění. Při uvažované netrakovní spotřebě 60 kW je potřeba na 2 hodiny zpoždění očekávat odběr dalších přibližně 120 kWh z akumulátoru.



Zdroj: Autor

Obrázek 33 - Minimální hodnota zbývajících procent energie v akumulátoru na lince

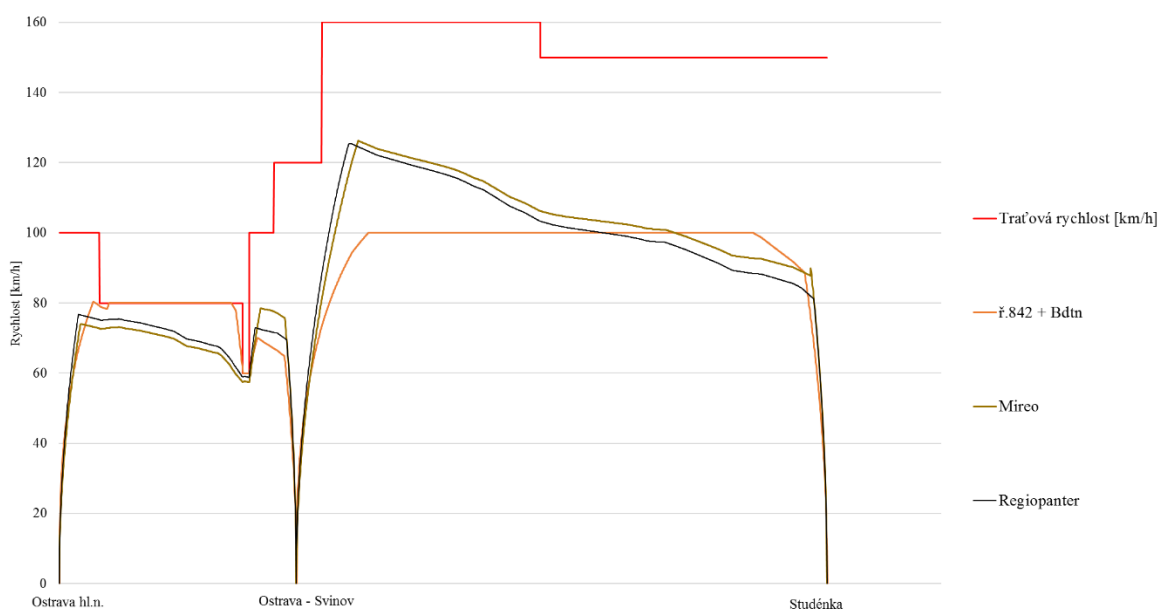
V případě této linky lze označit rezervy na akumulátoru pro pokrytí provozních mimořádností a mimořádných událostí za dostatečné až předdimenzované. Předdimenzovanost akumulátoru lze řešit pořízením vozidla s menší kapacitou bateriové výbavy tzv. lehké BEMU. Tímto řešením by došlo k úspoře nákladů na pořízení vozidla a nákladů na dopravní cestu.

Na základě simulovaných dat lze říct, že dynamické nabíjení během jízdy vlaku probíhá i pod napětím 3 kV DC po celou dobu jízdy vlaku s výjimkou energeticky náročných rozjezdů. V simulaci dynamického nabíjení byla použita hodnota 800 A pro odběr sběrače z trolejového vedení.

Při zvolení limitní dobíjecí strategie je (při provozu bez mimořádností na standardním obratu) je teoreticky možné dobít vozidlo už těsně před stanicí Studénka. V praxi by ovšem autor tento postup nabíjení akumulátoru nedoporučoval, protože příliš dynamická dobíjecí strategie zkracuje životnost akumulátoru.

Na základě prověření vlastností dynamického nabíjení akumulátoru je možné uvažovat i se stávající stavem elektrifikace trati o zavedení provozu jednotek BEMU také na lince Veřovice – Studénka. Potenciální omezujícím faktorem pro zavedení technologie BEMU na této lince jsou pravděpodobně nedostačující poloměry oblouků na úseku Štramberk – Veřovice.

V modelu byla simulována druhá alternativní možnost přístupu k porovnání spotřeby energie. Tato varianta předpokládá jízdní doby podle nejpomalejšího vozidla. Ostatní rychlejší vozidla cestují v této variantě na dané trase tak, aby dosáhla jízdních dob stejných jako nejpomalejší vozidlo. Ostatní rychlejší vozidla v této variantě používají ve zvýšené míře výběh.



Zdroj: Autor

Obrázek 34 - Dráhový tachogram vozidel pro úsek Ostrava hl.n. – Studénka (varianta stejné JD)

Tabulka 4 - Spotřeba pro variantu různé JD

Jízda Sp vlaku Ostrava hl.n. - Štramberk a zpět - varianta stejné jízdní doby			
	Diesel	BEMU	EMU
Vozidlo	ř. 842 + Bdtn	Mireo	Regiopanter
Teoretická JD [min]	74,50	74,48	74,45
Celková spotřeba trakční a netrakční energie (po odečtení rekuperace) [kWh]	989,28	257,73	233,79
Rekuperace do troleje [kWh]	0,00	42,63	94,15
Rekuperace z akumulátoru [kWh]	0,00	58,78	0,00
Spotřeba energie [kWh/tkm]	-	0,0256	0,0263
Spotřeba nafty včetně netrakční energie [litrů/vlkm]	0,934	-	-

Zdroj: Autor

Tabulka 5 - Spotřeba pro variantu stejné JD

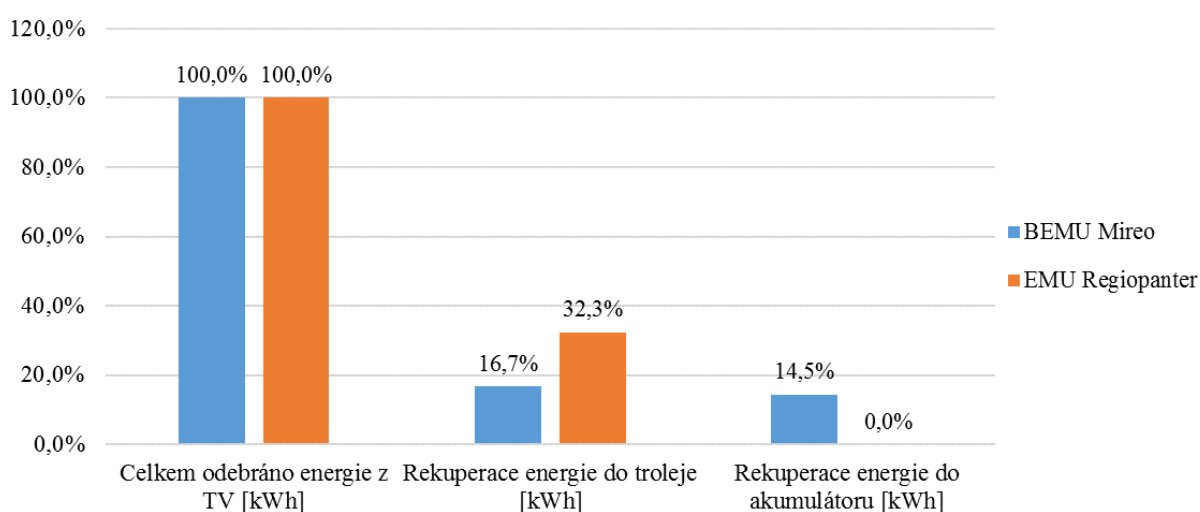
Jízda Sp vlaku Ostrava hl.n. - Štramberk a zpět - varianta různé jízdní doby			
	Diesel	BEMU	EMU
Vozidlo	ř. 842 + Bdtn	Mireo	Regiopanter
Teoretická JD [min]	74,50	64,78	63,76
Celková spotřeba trakční a netrakční energie (po odečtení rekuperace) [kWh]	989,28	303,44	283,59
Rekuperace do troleje [kWh]	0,00	73,66	135,36
Rekuperace z akumulátoru [kWh]	0,00	63,79	0,00
Spotřeba energie [kWh/tkm]	-	0,0302	0,0319
Spotřeba nafty včetně netrakční energie [litrů/vlkm]	0,934	-	-

Zdroj: Autor

Pro získání výsledného cestovního času pro potřeby jízdního řádu je potřeba připočítat k teoretické JD ještě pobyty v nácestných stanicích a zastávkách, dobu reakce strojvedoucího, jízdy do odbočky a různé přírážky k JD např. přírážky pro přesnou realizaci provozu, které jsou zmíněny například v Kodexu UIC 451-1 z roku 2001.

Díky novým vozidlům na této lince lze zkrátit cestovní dobu mezi Štamberkem a Ostravou hl.n. až o 4,5 respektive 5 minut v jednom směru.

Nová vozidla umožňují rekuperovat energii pomocí elektrodynamického brzdění. Při zjednodušení simulace, která uvažovala s 100 % možností rekuperace na stejnosměrné napájecí soustavě, dosáhla vozidla BEMU a EMU ve variantě různé JD hodnotu rekuperované energie přes 30 % z celkového odběru. Podle podílu rekuperované energie pro vozidlo BEMU je patrné, že na citelně kratším úseku Sedlnice – Štamberk z důvodu častého zastavování a sklonových poměrů dochází k vyššímu využití rekuperace než na delším úseku Sedlnice – Ostrava hl.n.

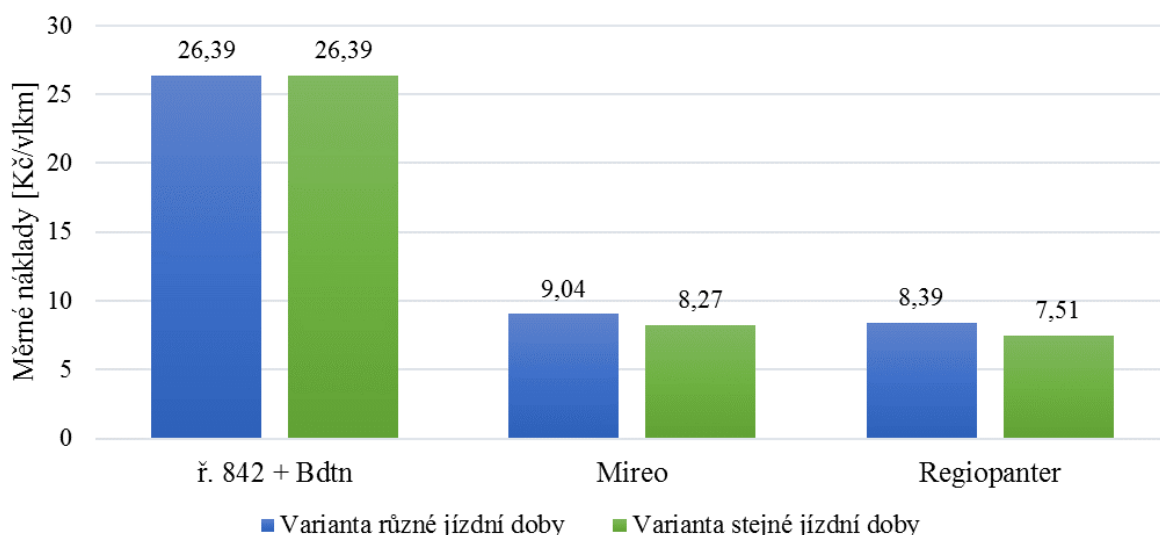


Zdroj: Autor

Obrázek 35 - Podíl rekuperované energie ve variantě různé JD

Pro stanovení nákladů byla v celé práci použita hodnota 28 Kč za litr nafty a 2,55 Kč za odebranou kWh z distribuční sítě. Náklady na elektrickou vozbu jsou na této lince zhruba třetinové oproti nákladům na dieselovou vozbu. Náklady na elektrickou energii vozidel BEMU jsou oproti EMU na stejné trase při stejných jízdních dobách vždy větší. Důvodem jsou energetické ztráty v akumulátoru a hmotnost samotného akumulátoru.

Ze srovnání variant jízdních dob u EMU a BEMU vyplývá možnost úspor za trakční a netrakční energii při prodloužení jízdních dob o přibližně 10 minut ve výši až 10 procent. Vzhledem k zachování konkurenceschopnosti železniční dopravy a snížení doby obsazení vytiženého úseku Studénka – Ostrava hl.n. autor nepovažuje tuto úsporu za natolik významnou, aby vozidla na této lince jezdila cíleně pomaleji.



Zdroj: Autor

Obrázek 36 - Porovnání nákladů na energii spočítaných simulací na lince

Orientační kontrolu hodnot spotřeby energie v elektrické trakci je možné provést například pomocí hodnot měrné spotřeby ze smlouvy o dodávkách trakční energie SŽ uvedené v příloze této práce. Varianta různé JD, která se jeví jako nejvhodnější pro porovnání, se odchyluje od měrných hodnot spotřeby SŽ (včetně započtení koeficientů ztrát, spotřeby a období) o maximálně jednotky procent, což ukazuje na hodnověrnost výsledků simulace (43).

Hodnotu spotřeby ř. 842 lze zkontrolovat podle diplomové práce Martina Elstnera z roku 2009, kde jsou v příloze práce uvedeny průměrné hodnoty z více než ročního měření spotřeby většího počtu vozidel ř. 842. Výsledek simulace náleží hodnotám změřeného intervalu 0,74 až 1,04 litrů na vlakový kilometr pro ř. 842 (44).

Zastávky na znamení

Zastávka na znamení je v poměrech české železnice jevem vcelku obvyklým. Její opodstatněnost či neopodstatněnost se snaží prokázat v rámci práce autor s využitím modelu. V modelu byly náklady na přibrzdění či zastavení na zastávce na znamení porovnány s referenční variantou projetí zastávky plnou rychlostí. Posouzení energetické náročnosti a nákladů zastávek na znamení bylo uvažováno pro zastávku Sedlnice. Tato zastávka se nachází na přehledném rovném úseku, kde vozidla při průjezdu zastávkou v modelu jedou maximální traťovou rychlostí 90 km za hodinu. V rámci modelu nejsou na zastávce na znamení započteny náklady na prodloužení pracovního fondu posádky vlaku dopravce a náklady na opotřebení brzdového ústrojí, které by pro úplné vyčíslení nákladů na zastávku, bylo potřeba vyčísřit.



Zdroj: (45)

Obrázek 37 - Zastávka Sedlnice

V tabulce č. 6 jsou uvedeny výsledky simulace zastávek na znamení. Veškeré hodnoty přírůstku jsou vztaženy k referenční variantě.

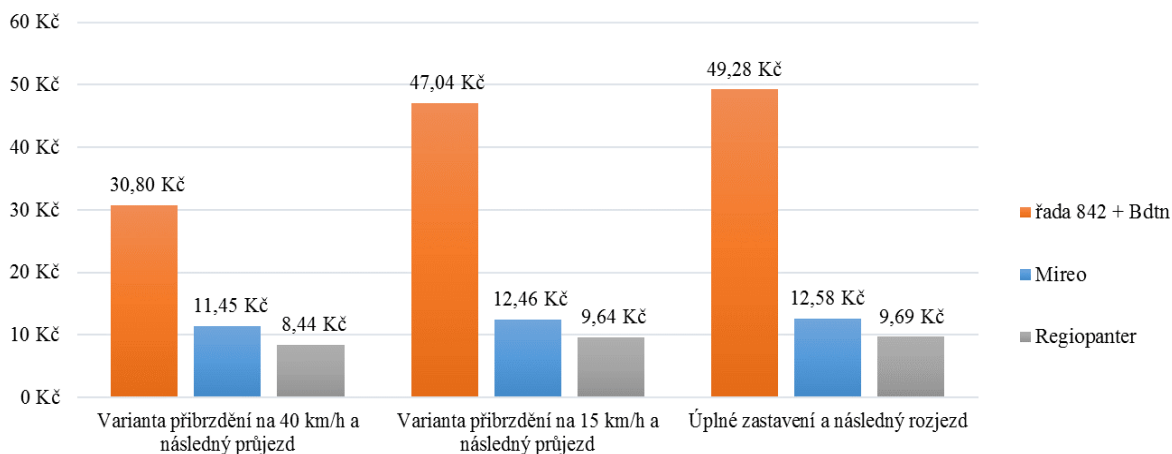
Tabulka 6 - Spotřeba energie na zastávku na znamení Sedlnice

Vozidlo	Referenční varianta úplného projetí zastávky rychlostí 90 km/h	Varianta přibrzdění na 40 km/h a následný průjezd	Varianta přibrzdění na 15 km/h a následný průjezd	Úplné zastavení a následný rozjezd
		Přírůstek spotřeby	Přírůstek spotřeby	Přírůstek spotřeby
řada 842 + Bdtn	0	+ 1,11 litrů nafty	+ 1,68 litrů nafty	+ 1,78 litrů nafty
Mireo	0	+ 4,49 kWh	+ 4,9 kWh	+ 4,93 kWh
Regiopanter	0	+ 3,31 kWh	+ 3,78 kWh	+ 3,8 kWh

Zdroj: Autor

Data získaná simulací ukazují, že pro zvýšení celkové úspory energie, která vznikne nezastavením na zastávce na znamení, je potřeba udržet vozidlo v relativně vysoké rychlosti. Rozdíl spotřeby energie, který vznikne při přibrzdění 15 km/h a úplném zastavení není příliš markantní.

Z dostupných dat jsou patrné vysoké náklady na rozjezd vozidla zejména na dieselové trakci, protože energie získaná z dieselu je drahá a vozidlo řady 842 neumožňuje rekuperaci. Na základě získaných dat o nákladech zastávek na znamení autor konstatuje, že zavedení vozidel BEMU a EMU na této lince by rozšířilo možnosti efektivního zřízení zastávek na znamení.



Zdroj: Autor

Obrázek 38 - Přírůstek energetických nákladů na zastávce na znamení Sedlnice

Zároveň je autor překvapen tím, že dopravci nevyužívají lépe potenciál dat z prodeje jízdenek či například mobilních aplikací pro oznámení nástupu a výstupu cestujícího. Díky tomuto předání dat strojvedoucím v kooperaci například se zlepšením rozhledových poměrů na zastávce by nepochybně došlo ke snížení nákladů na trakční energii z důvodu méně častých rozjezdů vozidel.

3.2.3 Cena za použití dráhy jízdou vlaku

Cena za použití dráhy jízdou vlaku zahrnuje sumu cen za použití jízd dráhy jízdou jednotlivých subvlaků a nově cenu za použití přístupových komunikací pro cestující ve vlaku osobní dopravy (tzv. ošlapné).

Vozidlo:	ř. 842 + Bdtm	Mireo	Regiopanter	Regioshark 2
Uvažovaná hmotnost: [t]	90	117	103,5	96
Cena na vlakový kilometr				
bez ETCS	11,02	13,37	13,20	11,27
s ETCS	10,02	12,17	12,00	10,28

Zdroj: Autor na podkladě (19)

Tabulka 7 - Ceny za použití dráhy jízdou vlaku

V podmínkách SŽ záleží výsledná cena za použití dráhy jízdou vlaku na hmotnosti vlaku. Při srovnání EMU a BEMU, které byly zařazeny do stejného hmotnostního intervalu 100 až 199 tun, lze rozpoznat, že zhruba 14 tunový akumulátor prodražuje výslednou cenu

zvýšením ošlapného. V případě, že by vozidlo BEMU muselo být přeřazeno do vyššího hmotnostního intervalu by bylo prodražení ještě výraznější.

Podle autorova názoru nemá Prohlášení o dráze 2021 ve změně č. 4 logiku ve svém přístupu k BEMU. Autorovi připadá nesmyslné započítávat hmotnost akumulátorů do ceny ošlapného (akumulátor nezvýší opotřebení přístupových komunikací pro cestující) a do ceny za použití jízd dráhy jízdou jednotlivých subvlaků, protože tímto dopravce kompenzuje nedostatky na straně infrastruktury.

3.2.4 Údržba vozidla

Údržba dieselového motoru je nákladnější řešení oproti údržbě elektromotoru. Zvýšená náročnost údržby dieselového motoru spočívá mimo jiné ve spotřebě provozních hmot (olej, močovina, filtrační složky atd.).

Vyšší homogennost vozového parku snižuje náklady na náhradní díly a výcvik personálu, proto je pro dopravce velmi žádoucí.

Při opominutí nákladů na obnovu akumulátoru jsou náklady na údržbu akutrolejové jednotky stejné jako v případě nehybridní elektrické jednotky. Pro linku Štramberský express ve výhledové variantě byly stanoveny náklady údržby na 25 Kč/vlkm pro elektrickou trakci a 40 Kč/vlkm pro dieselové vozidla (2, 3).

3.2.5 Náklady na pořízení vozidla

Náklady na pořízení vozidla bez nákladů na financování jsou uvedeny v tabulce č. 8. V případě vozidel ř. 842 a Bdtn byla hodnota vozidla uvažována jako náklady na poslední modernizaci vozidel.

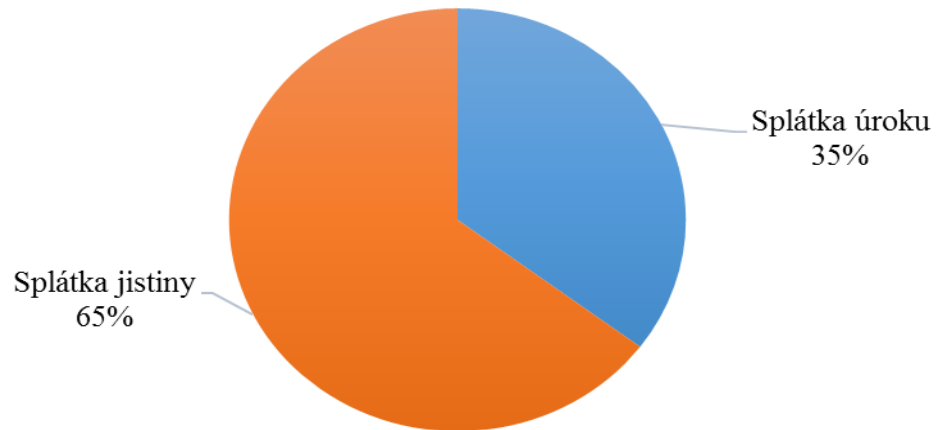
Tabulka 8 - Náklady na pořízení vozidla včetně DPH

Vozidlo	Pořizovací cena včetně DPH [Kč]
Regiopanter ř. 650 (dvouvozový) - včetně ETCS	135 520 000
Siemens Mireo - včetně ETCS	181 500 000
ř. 842 + Bdtn ⁷⁵⁷ - bez ETCS	28 314 000
PESA Regioshark - včetně ETCS	106 480 000

Zdroj: Autor na podkladě (46, 47, 48, 49)

Poskytnutá výše úroku závisí na zejména na renomé dopravce a situaci na trhu. Pro zavedeného dopravce lze uvažovat hodnotu ročního úroku okolo 5 - 7,5 % (20). V práci je použito financování s ročním úrokem 6 %, anuitní splácení a doba poskytnutí úvěru je 15 let.

Jako provozní záloha je využito stávající vozidlo, které je dovybaveno ETCS.

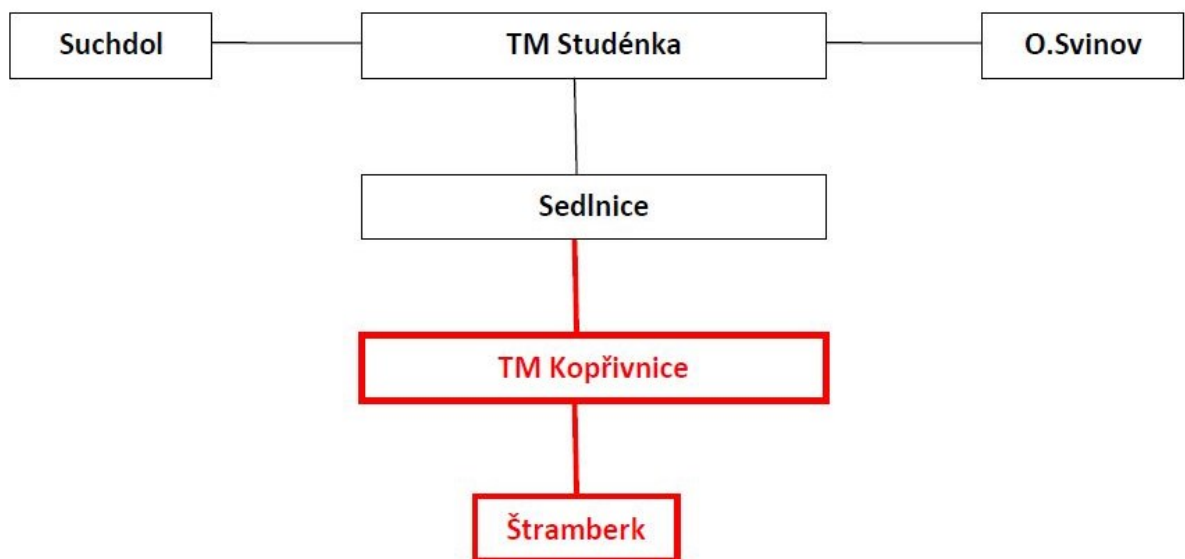


Zdroj: Autor

Obrázek 39 - Skladba nákladů na financování vozidla při úroku 6 % na 15 let

3.2.6 Náklady na vybudování stejnosměrné liniové elektrizace

V roce 2016 vypracovala společnost SUDOP Praha studii proveditelnosti s názvem Beskydy, která se zabývala mimo jiné i otázkou liniové elektrizace stejnosměrným napětím na úseku Sedlnice – Štramberk. Schéma plánované elektrizace úseku ukazuje obrázek č. 40. V plánech na elektrifikaci se počítá s nutností vybudování nové trakční měnírny (dále také TM) poblíž ŽST Kopřivnice.

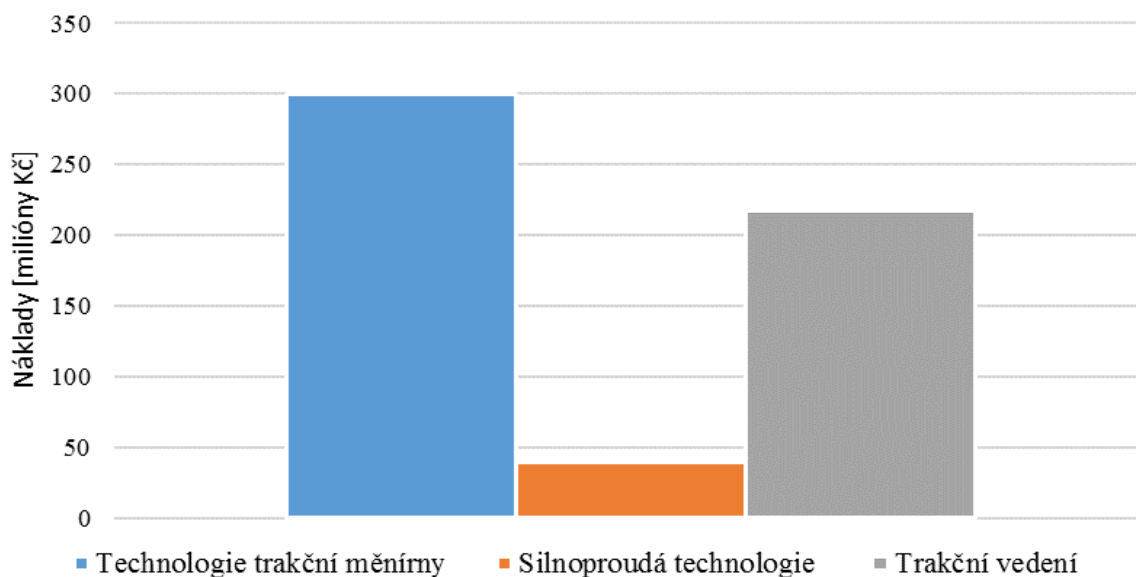


Zdroj: (50)

Obrázek 40 - Schéma plánů na elektrizaci úseku stejnosměrným napětím

Ve studii byly zpracovány také náklady na elektrifikaci úseku Sedlnice - Štramberk. Jednotlivé složky nákladů ukazuje obrázek č. 41. Výsledná hodnota nákladů na liniovou elektrifikaci na tomto úseku činí 557 milionů Kč, což při délce úseku 13,2 km znamená

zhruba 42,2 miliónů Kč na kilometr délky trati. V případě, že by stávající TM ve Studénce měla dostatečný výkon i pro úsek Sedlnice – Štramberk, byly by náklady na elektrifikaci úseku podstatně menší.



Zdroj: Autor na podkladě (50)

Obrázek 41 - Skladba nákladů na liniovou elektrifikaci na úseku Sedlnice – Studénka

3.2.7 Náklady na vybudování střídavé liniové elektrizace

Vzhledem k plánovanému přechodu celé sítě trakční soustavy v ČR na střídavé napětí se jeví jako pravděpodobnější liniová elektrizace celého úseku napětím 25 kV AC. Realizaci liniové elektrizace na úseku Sedlnice – Štramberk lze očekávat až souběžně s přepínáním blízkého železničního koridoru právě na systém 25 kV AC. Očekávaným scénářem je dimenzování trakční napájecí stanice (dále také TNS) na koridorovém úseku Ostrava – Suchdol nad Odrou i na potřeby úseku Sedlnice – Štramberk. Díky nové TNS na koridoru proběhne vlastní liniová elektrizace úseku Sedlnice – Štramberk s daleko nižšími náklady než v případě stejnosměrného napětí. Náklady elektrizaci na kilometr délky tratě tímto způsobem se mohou pohybovat od 7 miliónů Kč. Pro stanovení nákladů na liniovou elektrizaci na úseku Sedlnice – Štramberk byla využita cena trakčního vedení ze studie proveditelnosti Beskydy, která činí 217 miliónů Kč.

Ze strany SŽ byla zadána Studie proveditelnosti změny trakce z DC 3 kV na AC 25 kV, 50 Hz v oblasti „Ostravsko a Přerovsko“. Dle stávajících plánů proběhne konverze v oblasti „Ostravsko a Přerovsko“ jako jedna z prvních. Samotnou realizaci přepínání a následné elektrizace lze odhadovat v intervalu zhruba 10 až 20 let (3, 51).

3.2.8 Převedení nákladů na liniovou elektrizaci na náklady na vlkm

V této části práce je využit autorův zjednodušený přístup k přepočtu nákladů na liniovou elektrizaci na konkrétní vlak.

Lineární způsob odepisování liniové elektrizace je možné provést podle vzorce č. 8. Doba odepisování elektrizace použitá v práci činí 30 let, což je hodnota využitá pro trakční vedení (dále také TV) a napájecí vedení i ve Studii proveditelnosti Beskydy.

$$N_{r,le} = \frac{N_{le}}{T_{odp}} \quad (8)$$

Kde: $N_{r,le}$ roční náklady na liniovou elektrizaci [Kč]
 N_{le} celkové náklady na liniovou elektrizaci [Kč]
 T_{odp} doba odepisování infrastruktury [rok]

Zhodnocení investic do liniové elektrizace dopravcem se odvíjí od celkového počtu odebrané energie z trakčního vedení za období odpisu stavby. Pro efektivnost liniové elektrizace musí platit, že úspora vzniklá z levnější elektrické vozby převyší náklady na vybudování elektrizace. Stanovit úsporu vzniklou z levnější elektrické vozby je možné podle rozsahu dopravy na trati.

V tabulce X. je uveden předpokládaný rozsah dopravy na jednotlivých úsecích s liniovou elektrifikací. Do předpokládaného rozsahu dopravy je zahrnuta nákladní doprava v počtu 8 manipulační vlaků (dále také Mn) v pracovní dny a výhledový rozsah na řešené lince Štramberský express. Stávající rozsah dopravy na lince S8 z Veřovic do Studénky není veden v elektrické trakci, a proto není dále zahrnut do výpočtů nákladů na liniovou elektrizaci.

Tabulka 9 - Předpokládaný počet vlaků elektrické vozby

Úsek	Pracovní den	Stát. svátek, víkend
Sedlnice - Štramberk	28	10

Zdroj: Autor na podkladě (38, 52)

Předpokládaný podíl počtu vlaků osobních vlaků (20 v prac. den a 10 o víkendu a státních svátcích) ukazuje na dominanci osobní dopravy týkající se celkového počtu vlaků. Nicméně při výpočtu celkové odebrané energie z trakčního vedení má velkou váhu samotná hmotnost vlaku. V případě Mn vlaků je průměrná hodnota prázdných a ložených vlaků 1150 tun, zatímco elektrický osobní vlak Regiopanter má hmotnost pouze 103,5 tun (52).

Celková hodnota odebrané energie za rok lze určit podle ročního počtu hrtkm a měrné spotřeby uvedené v tabulce č. 10. Vypočtená hodnota předpokladu hrtkm za rok pro stanovený rozsah je ukázána v tabulce č. 11.

Tabulka 10 - Měrné hodnoty spotřeby elektrické energie

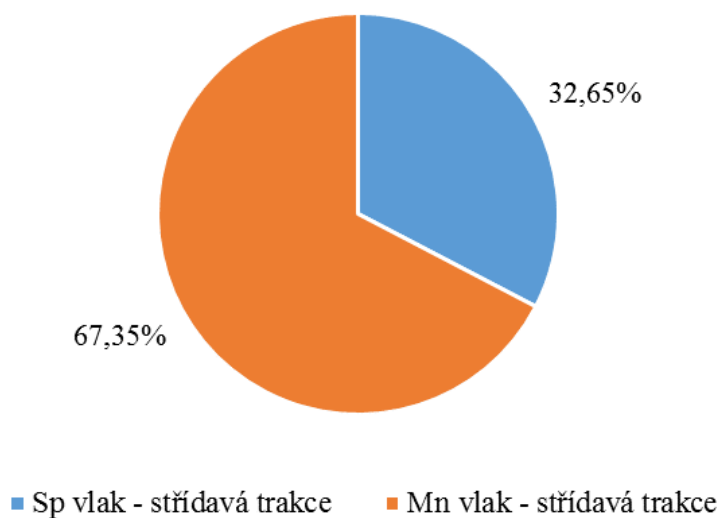
Měrné hodnoty odběru trakční energie (včetně koeficientů období, ztrát a spotřeby)	[kWh/tis. Hrtkm]
Sp vlak - střídavá trakce	29,94
Sp vlak - stejnosměrná trakce	31,13
Mn vlak - střídavá trakce	17,01
Mn vlak - stejnosměrná trakce	17,36

Zdroj: Autor na podkladě (43)

Tabulka 11 - Předpoklad ročních provezených hrtkm v elektrické vozbě na daném úseku

Hrtkm ročně	
Štramberský Express	638 595
Mn vlaky	2 318 400

Zdroj: Autor na podkladě (38, 52)



Zdroj: Autor na podkladě (38, 43, 52)

Obrázek 42 - Podíl odběru z TV při předpokládaném rozsahu dopravy pro střídavou trakci

V předpokládaném rozsahu dopravy zastává linka Štramberský express v celotýdenním průměru podíl přibližně 32,7 % z veškeré odebrané energie z TV na úseku pro případ střídavého napětí. V případě stejnosměrného napětí je hodnota podílu okolo 33,1 %.

Tabulka 12 - Přepočet nákladů na vlkm

Popis kategorie	Stejnoseměrná elektrizace úseku Sedlnice - Štramberk	Střídavá elektrizace úseku Sedlnice - Štramberk
Celkové náklady na liniovou elektrifikaci [Kč]	557 000 000	217 000 000
Cena za rok liniové elektrizace při odepisování 30 let [Kč/rok]	18 566 667	7 233 333
Podíl odběru energie linky na celkovém odběru na trati [%]	33,1 %	32,7 %
Náklady na liniovou elektrifikaci za 30 let linky Štramb. Express [Kč]	181 843 992	70 844 069
Náklady na liniovou elektrifikaci za rok linky Štramb. Express [Kč]	6 061 466	2 361 469
Náklady na vlkm na lince Sedlnice - Štramberk [Kč/vlkm]	74,42	29,00
Náklady na vlkm na lince Ostrava - Štramberk [Kč/vlkm]	23,28	9,07

Zdroj: Autor na podkladě (3, 50)

Při přepočtu na vlakový kilometr celé linky Štramberského expresu vychází pro stanovený rozsah dopravy jednoznačně nejlépe střídavá elektrizace úseku, která pravděpodobně bude v budoucnosti realizována. Autor k vypočteným nákladům na vlkm na elektrifikaci dodává, že tato hodnota se může dost výrazně změnit v závislosti na způsobu odepisování infrastruktury, rozsahu dopravy, zvoleným napětím a dalšími faktory, a proto se jedná o orientační hodnotu.

3.2.9 Převedení nákladů na akumulátor na náklady na vlkm

V této části práce autor prezentuje svůj názor na způsob stanovení nákladů na akumulátor a jeho pravidelné provozování. Jedná se tedy o náklady, které musí dopravce uvažovat navíc pokud chce namísto EMU provozovat vozidlo BEMU. Jinými slovy lze říct, že se jedná o vyčíslení navýšení nákladů dopravce pro případ, kdy je elektrizace na trati provedena mobilně (na vozidle). Autor doporučuje výslednou hodnotu porovnat s náklady na infrastrukturální provedení elektrizace (tzv. liniová elektrizace). Tento převodní vztah může být zajímavý například pro objednatele dopravy, který se snaží rozhodnout, jaký způsob technologie na dané lince požaduje. Převodní vztah může využít i dopravce, který uvažuje o dovybavení vozidel EMU akumulátorem na dané lince.

Výsledné náklady na akumulátor značně souvisí i s problematikou druhého života akumulátoru, který (po snížení kapacity pod úroveň zajímavou poměrem hmotnosti ku kapacitě pro železniční dopravu) najde pravděpodobně využití jako stacionární akumulátor ve firmách či domácnostech. Na straně dopravce tedy lze očekávat jisté snížení nákladů na akumulátor díky prodeji použitého akumulátoru za zůstatkovou cenu. Pro zůstatkovou

hodnotu akumulátoru byl proveden hrubý odhad na základě obvyklé ceny za menší akumulátory a odhadu zbytkové kapacity akumulátoru (20, 53).

Orientační hodnotu zvýšení nákladů na lince na vlkm při provozu BEMU oproti EMU na stejné trati lze rozhodnout podle autorova vzorce č. 9.

$$\Delta BEMU = \frac{(BEMU_{poř+fin} - EMU_{poř+fin} - AKU_{zůst}) \cdot (PV_{BEMU}) \cdot (1 + OBN_{aku})}{(T\check{Z}_{voz} \cdot RD_{lin})} + (NDC_{BEMU} - NDC_{EMU}) + \left(NEN_{EMU} \cdot \left(\frac{100}{\eta_{aku}} - 1 \right) \right) \quad (9)$$

Kde: $\Delta BEMU$ změna nákladů na lince při použití BEMU oproti EMU [Kč/vlkm]
 $BEMU_{poř+fin}$ pořizovací cena BEMU včetně nákladů na financování [Kč]
 $EMU_{poř+fin}$ pořizovací cena EMU včetně nákladů na financování [Kč]
 $AKU_{zůst}$ průměrná zůstatková cena akumulátoru v momentě nahrazení [Kč]
 PV_{BEMU} počet vozidel BEMU na lince (včetně provozních záloh BEMU) [-]
 OBN_{aku} počet obnov akumulátoru po dobu zbýv. tech. životnosti 1 vozidla [-]
 $T\check{Z}_{voz}$ doba zbývajících technické životnosti 1 vozidla [roky]
 RD_{lin} roční rozsah dopravy na dané lince [vlkm/rok]
 NDC_{BEMU} náklady na použití dráhy jízdou vozidel BEMU na lince [Kč/vlkm]
 NDC_{EMU} náklady na použití dráhy jízdou vozidel EMU na lince [Kč/vlkm]
 NEN_{EMU} náklady trakční a netrakční energii vozidel EMU na lince [Kč/vlkm]
 η_{aku} účinnost akumulátoru na BEMU [%]

Tabulka 13 - Použité vstupní hodnoty pro výpočet zvýšení nákladů z BEMU oproti použití EMU

pořizovací cena BEMU včetně nákladů na financování	245 025 000	Kč
pořizovací cena EMU včetně nákladů na financování	182 952 000	Kč
průměrná zůstatková cena akumulátoru v momentě nahrazení	1 000 000	Kč
počet vozidel BEMU na lince (včetně provozních záloh BEMU)	1	ks
počet obnov akumulátoru po dobu technické životnosti vozidla	1	počet obnov
doba technické životnosti vozidla	30	roky
roční rozsah dopravy na dané lince	260 374	vlkm/rok
náklady na použití dráhy jízdou vozidel BEMU na lince	13,37	Kč/vlkm
náklady na použití dráhy jízdou vozidel EMU na lince	13,20	Kč/vlkm
náklady trakční a netrakční energii vozidel EMU na lince	8,23	Kč/vlkm
účinnost akumulátoru na BEMU	91	%

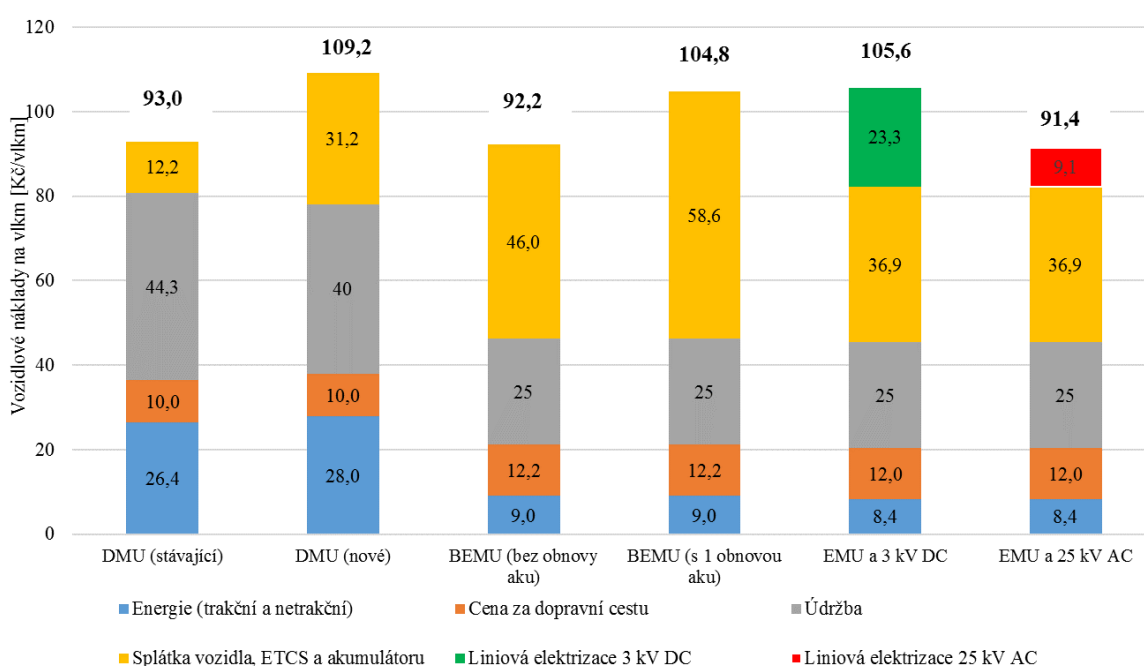
Zdroj: Autor na podkladě (3, 53, 54)

Pro dané vstupní hodnoty vychází zvýšení nákladů na BEMU oproti EMU na lince na 16,62 Kč/vlkm. Po porovnání s náklady na liniovou elektrizaci může objednatel dopravy tuto hodnotu využít pro rozhodování o požadované technologii na lince. Z tohoto vztahu může vycházet i dopravce, který se rozhodne svoji EMU upgradovat na BEMU.

3.2.10 Vyhodnocení vhodné technologie na lince

Pro vyhodnocení vhodné technologie na dané lince byly využity jednotlivé zjištěné dílčí náklady související s vybranou technologií vozidla. U stávajícího vozidla DMU jsou po ukončení splácení dovybavení ETCS očekávány zvýšené náklady na údržbu a humanizaci.

Na základě zjištěných nákladových skutečností pro stanovený rozsah dopravy vychází v 30letém výhledu nejnižší náklady na straně dopravce a provozovatele dráhy pro variantu EMU s liniovou elektrizací provedenou pomocí střídavého napětí v rámci přepínání koridorového úseku Ostrava – Hranice na Moravě. Jedná se o variantu, která se pravděpodobně uskuteční v horizontu nejbližších 10 až 20 let.



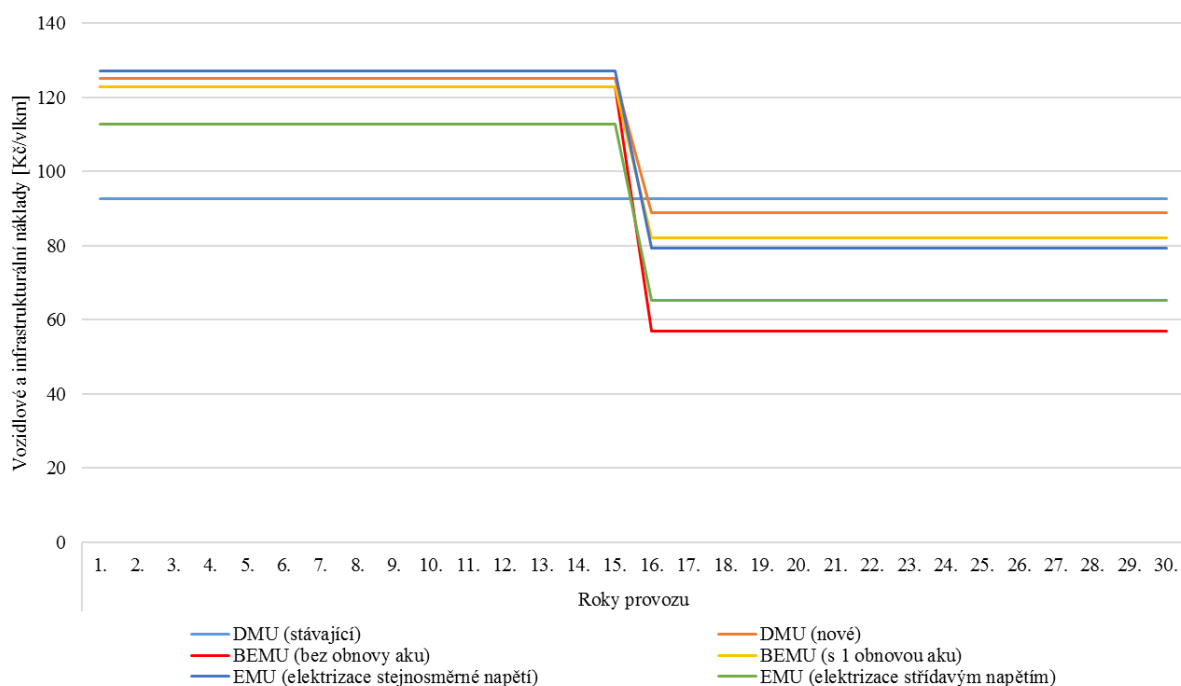
Zdroj: Autor

Obrázek 43 - Struktura vozidlových nákladů v 30letém výhledu linky pro stanovený rozsah dopravy

Do doby předpokládaného provedení liniové elektrizace pomocí střídavého napětí se na lince podle průběhu nákladů na obrázku č. 44 vyplatí (pro posuzovanou výhledovou variantu) zachovat stávající vozidlový park i přes nutnost dovybavení vozidla ETCS.

V případě, že by se objednatel rozhodl pro zvýšení kvality a rychlosti přepravy na této lince pořízením nových vozidel, doporučuje autor na základě provedených výpočtů investovat do technologie BEMU. Díky využití této technologie by bylo možné dosáhnout kvalitní a rychlé přepravy bez nutnosti výměny vozidla po liniové elektrifikaci, protože by stačilo

pouze demontovat akumulátor. I z hlediska nákladů se investice do nových vozidel BEMU jeví jako opodstatněnější než investice do nových vozidel DMU.



Zdroj: Autor

Obrázek 44 - Struktura vozidlových nákladů a nákladů na elektrizaci v letech pro stanovený rozsah dopravy na lince Štramberk – Ostrava

Pro stanovení přesných nákladů pro provoz jednotek BEMU na této lince by bylo vhodné kontaktovat výrobce vozidel za účelem zjištění počtu potřebných obnov akumulátoru a stanovení zůstatkových cen akumulátoru po ukončení jejich životnosti v železniční dopravě.

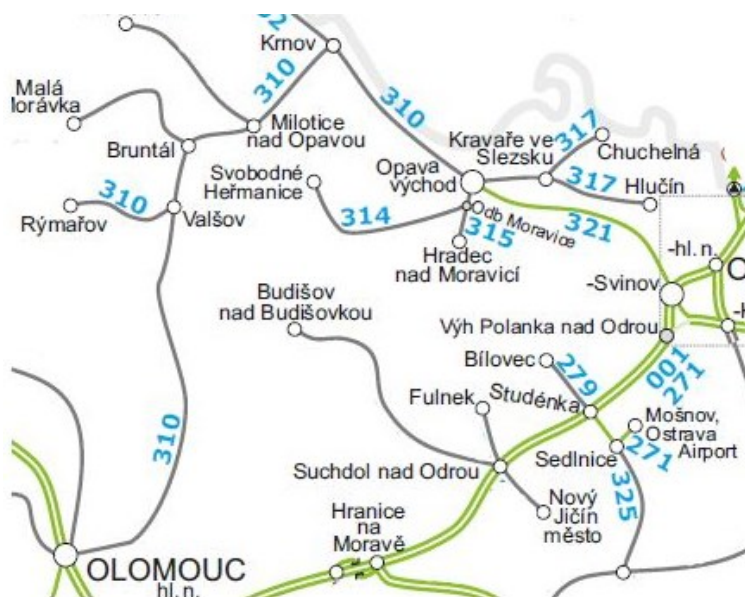
Na základě simulace je možné konstatovat, že kapacita akumulátoru 528 kWh se pro provoz na této lince jeví jako dostatečná až předimenzovaná, proto je na místě zvážení BEMU s menší kapacitou baterie.

3.3 Linka R27 Ostrava – Krnov - Olomouc

Linka R27 vede přes stanice Ostrava-střed, Ostrava hl.n., Ostrava-Svinov, Opava-východ, Krnov, Bruntál, Valšov a Olomouc hl.n.

Stávající délka neelektrifikované části je přibližně 116,2 km. Kvůli sklonové náročnosti trati současná generaci vozidel BEMU nemá dostatečnou kapacitu akumulátoru pro pravidelný provoz na této trati. (3, 19).

V roce 2019 byla provedena Technicko-ekonomická studie (dále TES) trati Opava-východ – Krnov – Olomouc hl.n. zvažující liniovou elektrizaci v celé délce trati. TES neprokázala efektivnost navrhovaných investičních úprav.



Zdroj: (18)

Obrázek 45 - Stávající stav elektrifikace na lince R27

V dohledné době SŽ předpokládá zadání nové studie na prověření elektrifikace mezi Krnovem a Opavou (11).

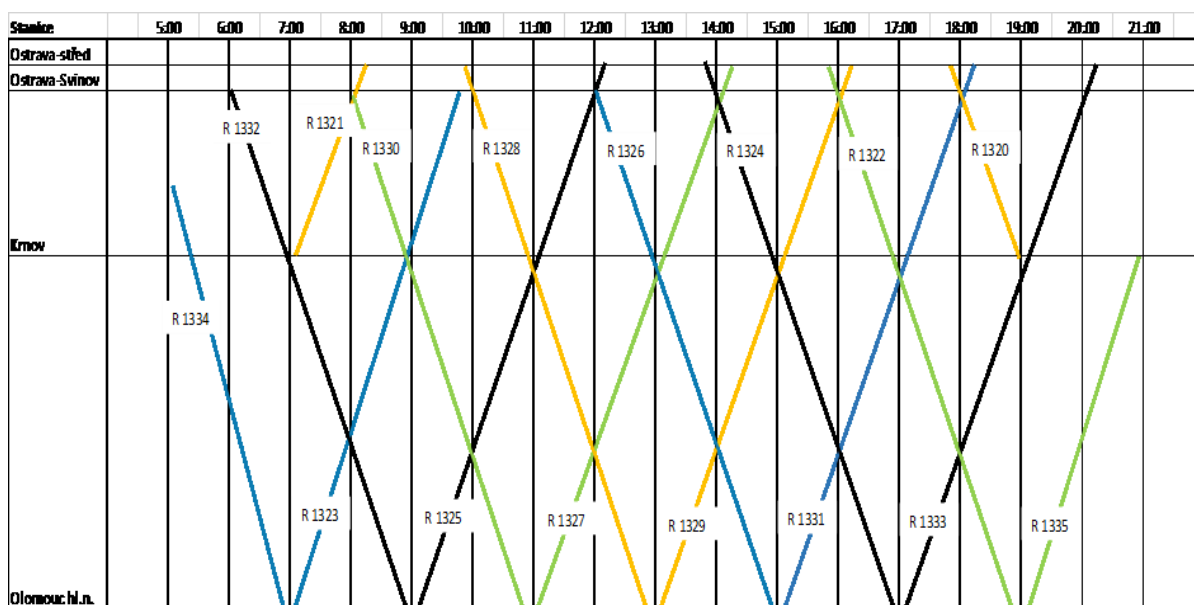
3.3.1 Parametry posuzované výhledové varianty

Posuzovaná výhledová varianta počítá s liniovou elektrifikací na úseku Krnov – Opava. Liniová elektrifikace úseku Krnov – Opava zkrátí délku neelektrifikované části linky R27 na přibližně 87 km, čímž dojde ke vzniku možnosti pravidelného provozu vozidel s technologií BEMU na této lince. Posuzovaná výhledová varianta neuvažuje s přepínáním elektrifikace na 25 kV AC.

3.3.2 Stávající oběhy vozidel

Posuzovaná výhledová varianta uvažuje se zachování stávajícího rozsahu dopravy i časové polohy v jízdním řádu. Z tohoto důvodu byl vytvořen předpoklad stávajících oběhů vozidel na lince R27.

Na základě předpokladů oběhu vozidel byl zjištěn relativně krátký čas pobytu v ŽST Olomouc. Časová poloha v ŽST Olomouc neumožňuje větší zkracování zpoždění od obratových spojů. Celkově lze oběhy vozidel na stávající lince zhodnotit z hlediska oběhových rychlostí pozitivně.



Zdroj: Autor na podkladě (55)

Obrázek 46 - Předpoklad stávajících oběhů na lince R27

3.3.3 Obraty vozidel s technologií BEMU

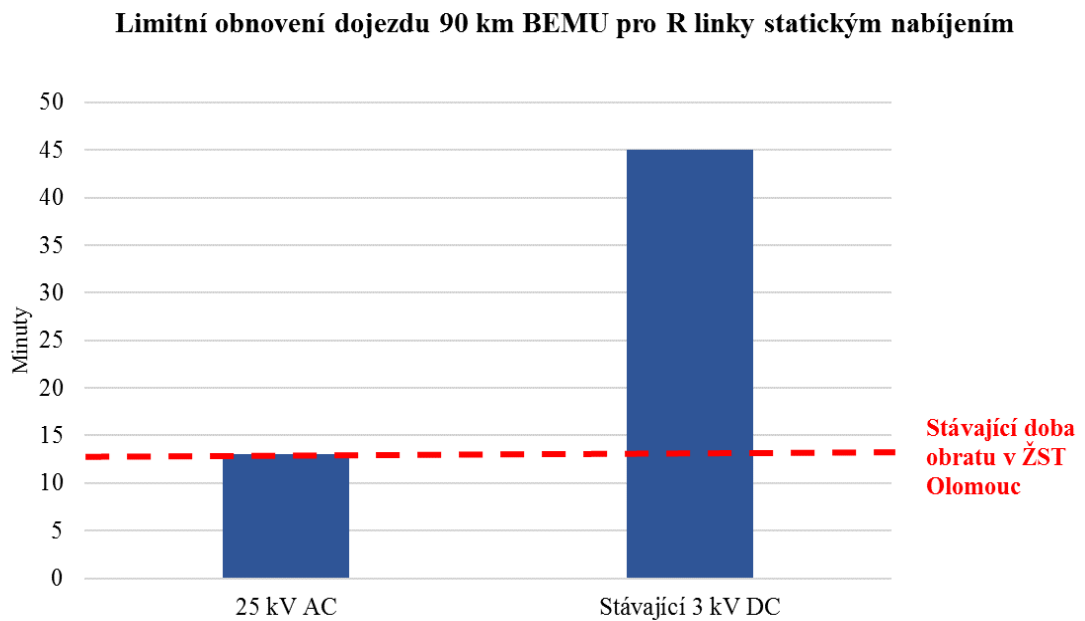
V posuzované variantě jsou pro provoz na lince R27 potřebná 4 vozidla. K této provozní potřebě čtyř vozidel je nutné navíc uvažovat se zálohou jednoho vozidla pro případ provozních mimořádností a mimořádných událostí.

Stávající stav elektrifikace 3 kV DC v ŽST Olomouc neumožňuje efektivní provozování vozidel BEMU bez zásahů do JŘ, jak ukazuje obrázek č. 47. Využívání limitních možností nabíjení akumulátoru v obratových stanicích navíc nese riziko přenášení zpoždění od obratových vlaků, a tudíž má negativní dopad na stabilitu jízdního řádu linky.

Pro efektivní využití vozidel BEMU bez použití pravidelného použití záložního vozidla na lince R27 v posuzované výhledové variantě je nutné do doby plánovaného přepínání na střídavou soustavu 25 kV AC přejít k prodloužení obratových pobytů v ŽST Olomouc. Případně lze pořídit vozidlo BEMU navíc a následně provést zaoběhování vozidel linky R27 do oběhů poblíž ŽST Olomouc, které by umožnily zhodnocení vozidla BEMU dynamickým nabíjením během jízdy vozidla.

Při analýze možností dynamického nabíjení na jiných linkách v jízdním řádu 2021 po příjezdu vozidel v ŽST Olomouc se autorovi nepovedlo najít vhodnou linku pro začlenění do stávajících oběhů linky R27. Varianta dynamického nabíjení na rychlíkové lince s názvem

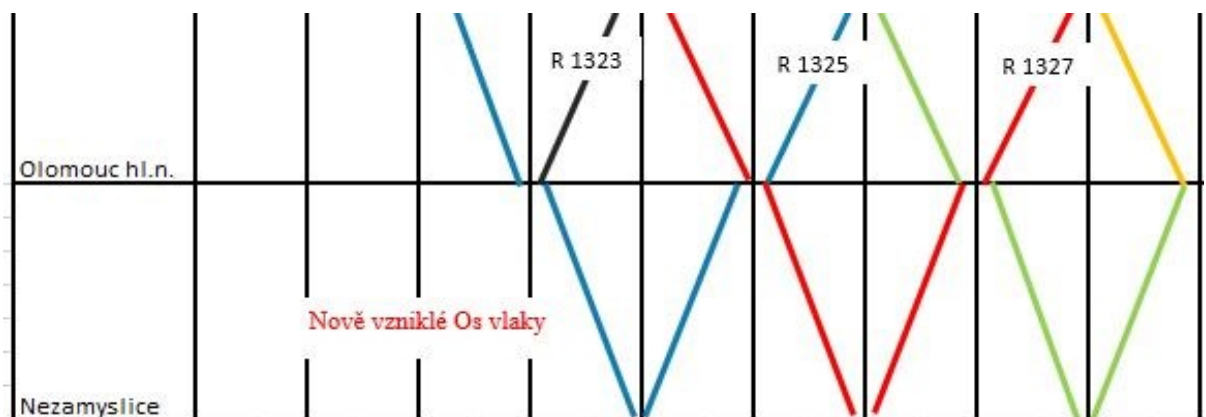
Bouzov směr Brno byla autorem odmítnuta z důvodů příliš dlouhého vozebního ramene pod liniovou elektrifikací. Proto se podle autorova názoru jeví jako nejvhodnější varianta



Zdroj: Autor na podkladě (2, 55)

Obrázek 47 - Doba trvání obrátového dobíjení v ŽST Olomouc

posílení regionální obslužnosti například ve směru Nezamyslice. Během jízdy do Nezamyslic a zpět dojde k žádoucímu pomalejšímu nabíjení akumulátoru, kterým netrpí jeho životnost a zároveň lze předpokládat plné nabití akumulátoru. Autor si netroufá odhadovat, zdali by objednatel dopravy, což je v tomto případě Olomoucký kraj, na tuto nabídku přistoupil.



Zdroj: Autor na podkladě (55)

Obrázek 48 - Os vlaky jako důsledek potřeby dynamického nabíjení na lince R27

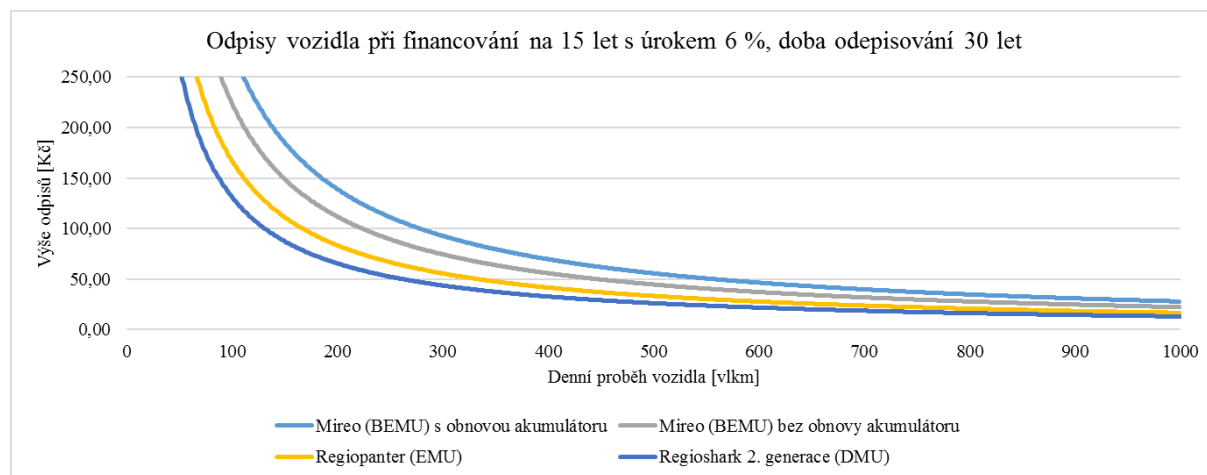
Další možností, jak dosáhnout žádoucích rychlých oběhů vozidel BEMU na lince R27, je prodloužení liniové elektrifikace ze stanice Olomouc hl.n. směrem na Bruntál. Pro zachování stávajících obrátů na lince R27 a stability jízdního řádu s vozidly BEMU za předpokladu napájení 3 kV v ŽST Olomouc je nutné liniově elektrifikovat zhruba do oblasti Velké Bystřice v případě 25 kV AC. V případě 3 kV DC by bylo nutné liniově elektrifikovat minimálně do oblasti nacházející se mezi ŽST Hlubočky-Mariánské údolí a ŽST Domašov nad Bystřicí.

3.3.4 Náklady na další vozidlo

Případ, ve kterém se objednatel ve spolupráci s dopravcem na této lince rozhodne pro variantu pořízení záložního vozidla navíc je rozepsán v tomto oddíle.

Náklady odpisů na vlakový kilometr příznivě ovlivňuje vysoký denní proběh vozidel. Ilustrační vztah denního proběhu vozidel a nákladů na odpisy je zobrazen na obrázku č. 49, kde jsou veškerá zmíněná nová vozidla již vybavena mobilní částí ETCS. Z obrázku je patrný zvláštní důraz na vysoký denní proběh drahých vozidel BEMU. Požadovanou vysokou hodnotu denního proběhu lze dosáhnout zejména nasazováním vozidel na tratích s vysokou traťovou rychlostí a efektivním oběhováním vozidel.

Potřebný počet vozidel má velký dopad na výsledné náklady linky. Případná zvýšená potřeba vozidel z důvodu obrátového nabíjení akumulátorů vozidel je u hybridních vozidel silně nežádoucí, protože hybridní technologie náklady na vozidlo značně prodražují.



Zdroj: Autor na podkladě (46, 47, 48, 49)

Obrázek 49 - Náklady na odpisy vozidla v závislosti na denním proběhu

Pro stanovení nákladů na další vozidlo byla vytvořena citlivostní analýza, která ukazuje změnu nákladů na vlkm pro jednotlivé technologie vozidel. Ačkoli autor použil v citlivostní analýze některé řady vozidel, které by se s největší pravděpodobností na této lince

neupotřebily, považuje výpovědní hodnotu této citlivostní analýza pro účely práce za dostatečnou. Náklady na obnovu akumulátoru jsou uvažovány jako čtvrtina pořizovací ceny vozidla. Citlivostní analýza je vytvořena pro roční rozsah dopravy 714 709 vlkm, což přibližně odpovídá rozsahu dopravy na lince R27 (56). Uvažovaná doba odepisování vozidla je 30 let, financování na 15 let s úrokem 6 %.

Tabulka 14 - Měrné náklady na záložní vozidlo navíc

Vozidlo	5 vozidel - náklady [Kč/vlkm]	6 vozidel - náklady [Kč/vlkm]	Rozdíl nákladů na šesté vozidlo [Kč/vlkm]
Siemens Mireo dvouvozové (BEMU) - bez obnovy akumulátoru	57,1	68,6	11,5
Siemens Mireo dvouvozové (BEMU) – s 1 obnovou akumulátoru	71,4	85,7	14,3
Regiopanter dvouvozový (EMU)	42,7	51,2	8,5
Regioshark 2.generace (DMU)	33,5	40,2	6,7

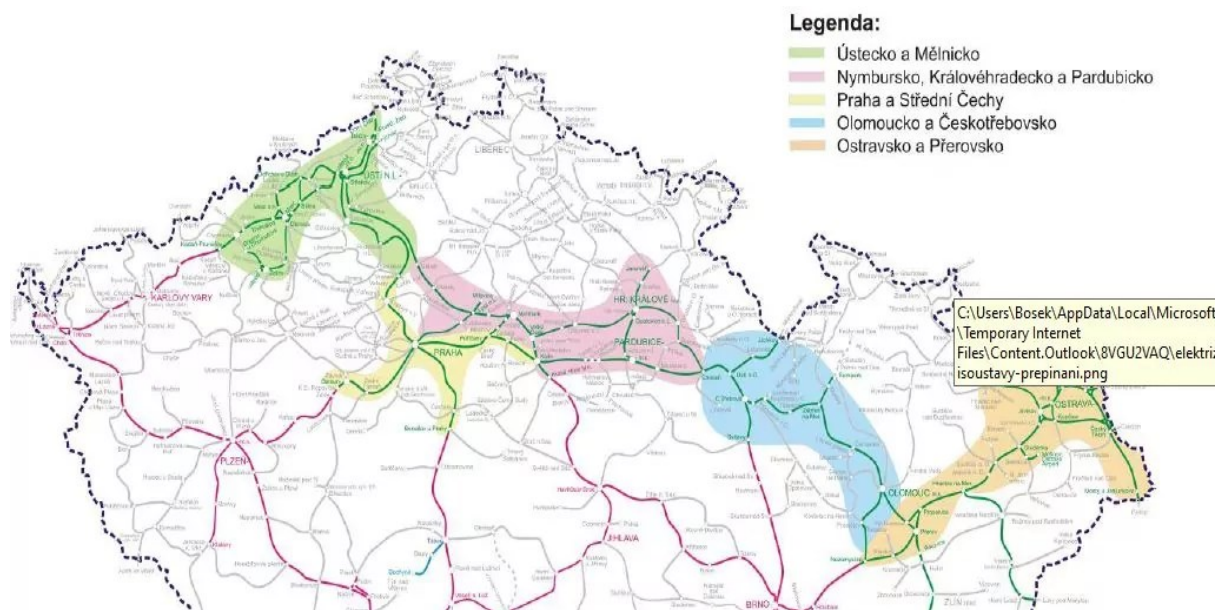
Zdroj: Autor na podkladě (46, 47, 48, 49)

3.3.5 Vyhodnocení vhodné technologie na lince

Za stávajícího stavu elektrifikace není možné zvolit pro dopravní obslužnost na lince R27 vozidla s technologií BEMU. Důvodem je nedostatečná kapacita akumulátoru stávajících vozidel pro trať s takto náročnými sklonovými poměry. Vozidla s technologií BMU či HMU nebyla v rámci návrhové varianty posuzována.

Pokud se uskuteční elektrifikace úseku Krnov – Opava (s čímž bylo v rámci návrhové varianty počítáno) bude teoreticky možné na této lince provozovat vozidla s technologií BEMU. Po dobu stejnosměrné elektrifikace v ŽST Olomouc a stávajících časových poloh v jízdním řádu by ovšem autor technologii BEMU na lince R27 silně nedoporučoval. Důvodem jsou vysoké náklady na potřebné hybridní vozidlo navíc, které by umožnilo zachovat dobu obratu 15 minut v ŽST Olomouc.

Pro realistické plány vozidel s technologií BEMU na lince je tedy kromě elektrizace úseku Krnov – Opava nutné počkat na přepnutí ŽST Olomouc do střídavé trakční soustavy. ŽST Olomouc bude přepnuta v rámci přepínání oblasti Olomoucko a Českořebovsko. Studie proveditelnosti pro zpracování plánů na přepnutí této oblasti již byla SŽ úspěšně vypsána (57).



Zdroj: (57)

Obrázek 50 - Jednotlivé oblasti přepínání na střídavý napájecí systém

3.4 Shrnutí obecných zásad pro vozidla BEMU

Podle autorova názoru je efektivní nasazení akutrolejových vozidel rámci ČR spíše okrajovou záležitostí. Nicméně pro základní orientaci o vhodnosti použití vozidel s technologií BEMU na dané železniční lince byly na základě znalostí získaných při psaní této práce sestaveny hlavní zásady jednotlivých zúčastněných subjektů, které jsou nezbytné pro účelné nasazení těchto vozidel.

Podmínky na straně správce infrastruktury jsou směřovány k použití technologie BEMU pouze v případě, že liniová elektrifikace je pro danou linku příliš nákladným řešením. Nutné podmínky na straně dopravce jsou dány vysokou pořizovací cenou hybridních vozidel, vysokou hmotností a požadavkem na úspory z rozsahu vozového parku. Úkolem objednatele a státu je koncepční a strategická podpora hybridních technologií například z úspor získaných jejich používáním.

Nutné podmínky pro účelné nasazení vozidel BEMU na dané lince:



Zdroj: Autor

Obrázek 51 - Obecné předpoklady nutné pro vhodné nasazení jednotek BEMU

ZÁVĚR

V analytické části práce byly popsány principy fungování a vlastnosti jednotlivých hybridních technologií v železniční osobní dopravě.

Nejrychlejší nabíjení akumulátoru BEMU vozidel probíhá na trakčním vedení střídavého napětí. Pomalejšího nabíjení BEMU je možné dosáhnout při jízdě pod trakčním vedením se stejnosměrným napětím. Varianta statického nabíjení BEMU pod stejnosměrným napětím 3 kV umožňuje pouze velmi pomalé obnovení dojezdu kvůli riziku přepálení troleje. Při porovnání obnovení kilometrů dojezdu v poměru k času strávenému plněním nádrží či akumulátorů vychází z porovnání technologií nejhůře právě technologie BEMU. Na druhou stranu, elektrická hybridní vozidla umožňují zhodnotit stávající investice do liniové elektrizace a jsou výborně připravena na synergii s případným postupem liniové elektrizace.

V rámci návrhové části práce byl s využitím znalostí z předmětu Mechanika dopravy, konzultací na neoborových katedrách a konzultací s panem Ing. Pohlem rozšířen simulační model z autorovy bakalářské práce za účelem stanovení jízdních dob, spotřeby trakční a netrakční energie a stanovení potřebné kapacity akumulátoru. Výsledky simulačního modelu lze na základě kontroly s hodnotami měrných spotřeb energie SŽ ze zveřejněných smluv označit za věrohodné. Zdrojové soubory simulace jsou přiloženy na kompaktním disku.

Aplikací simulačního modelu na linku Ostrava hl.n. – Štramberk byly stanoveny náklady na spotřebu energie pro jednotlivé technologie vozidel. Kvůli hmotnosti akumulátoru a jeho ztrátám vzrostla spotřeba energie na vozidle s technologií BEMU přibližně o 8 % oproti spotřebě podobného nehybridního elektrického vozidla na stejné lince. Náklady na energii dieselového vozidla vyšly v simulaci na dané lince přibližně trojnásobně větší než náklady na energii nehybridního elektrického vozidla.

Kapacitu akumulátorů 528 kWh na vozidle BEMU je možné na základě provedené simulace označit na této lince za dostatečnou až předimenzovanou i v případě provozních mimořádností. Při provozu BEMU na lince Ostrava – Štramberk lze dosáhnout určitých úspor nákladů s využitím méně kapacitního akumulátoru.

Pro linku Ostrava hl.n. – Štramberk byly v posuzovaném výhledovém rozsahu dopravy stanoveny veškeré náklady dopravce související s vozidlem a jeho technologií. V případě využití elektrického nehybridního vozidla byly navíc započteny i náklady provozovatele dráhy na výstavbu liniové elektrizace, která momentálně na úseku Sedlnice – Štramberk chybí.

Ze všech posuzovaných variant technologií vychází nejnižší součet nákladů na straně dopravce a provozovatele dráhy ve variantě liniové elektrizace střídavým napětím realizovaným souběžně s přepínáním blízkého koridorového úseku Ostrava – Hranice na Moravě. Výhodným aspektem je možnost vybudování nové trakční napájecí stanice s dostatečným výkonem i pro úsek Sedlnice – Štramberk a provoz nákladní dopravy, která díky vysoké hmotnosti vlaků významně využívá odběr energie z trakčního vedení.

Autor na základě provedené analýzy nákladů podporuje na lince Ostrava – Štramberk dočasný provoz hybridních vozidel pouze v případě, že by se objednatel rozhodl pro okamžité zvýšení komfortu cestování a snížení cestovních časů. V takovém případě se jeví investice do nových vozidel s technologií BEMU jako vhodnější než investice do nových vozidel s diesellovým pohonem. Díky technologii BEMU by mohlo dojít k okamžitému zlepšení dopravy na lince již před zavedením liniové elektrizace.

Před finálním výběrem technologie nového vozidla na této lince by ovšem autor ještě doporučil objednateli dopravy diskuzi s výrobcem vozidel ohledně potřebného počtu obnov akumulátoru, protože případný vysoký počet obnov akumulátoru by podstatně zvýšil náklady na technologii BEMU.

Časový dopad zkrácení jízdních dob na lince Ostrava – Štramberk díky novým vozidlům byl na základě simulace stanoven na 5 minut v případě vozidla BEMU Siemens Mireo a 5,5 minuty pro vozidlo Škoda Regiopanter. Významnou roli na tomto zkrácení jízdních dob hraje zejména úsek Ostrava-Svinov – Studénka, kde nová vozidla dobře zvládnou využití nabízený rychlostní profil.

Druhá posuzovaná linka R27 Ostrava – Krnov – Olomouc byla posouzena s předpokladem liniové elektrizace úseku Krnov – Opava, protože bez této elektrifikace není provoz vozidel BEMU na lince v současné době možný.

Při analýze provozních aspektů na lince R27 byl zjištěn nedostatečný obrátový čas v ŽST Olomouc potřebný pro statické nabíjení akumulátoru. Rozšíření počtu vozidel BEMU z počtu 5 na 6, které by umožnilo zachovat stávající časovou polohu v jízdním řádu, by stálo přibližně 14 Kč na vlakový kilometr. Za takovýchto nákladových podmínek autor myšlenku na provoz vozidel BEMU na lince R27 nedoporučuje.

Pro efektivní provoz vozidel s technologií BEMU na lince R27 ve stávající časové poloze v jízdním řádu je nutné přepnutí ŽST Olomouc na střídavé napětí a liniová elektrifikace úseku Krnov – Opava. Do doby realizace těchto zlepšení infrastruktury není provoz vozidel s technologií BEMU na lince R27 podle autorova názoru vhodný.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- (1) Město Praha 8 [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://m.praha8.cz/vytluky-v-ulici-bulovka-jsou-opraveny-novou-technologii.html>
- (2) POHL, Jiří. Dekarbonizace železniční osobní dopravy koordinovanou kombinací liniového, akumulátorového a vodíkového napájení vozidel [online]. 2019 [cit. 2020-11-22].
- (3) POHL, Jiří. Siemens. Emailová a telefonická komunikace. 2020 a 2021.
- (4) Globenewswire.com [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/06/11/1866702/0/en/Bombardier-launches-new-generation-of-MITRAC-propulsion-controls-and-energy-management-solutions.html>
- (5) Bi-mode trains: Unlocking opportunity? [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.railengineer.co.uk/bi-mode-trains-unlocking-opportunity/>
- (6) TVP.INFO [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.tvp.info/44906731/polska-hybryda?image=44906795>
- (7) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/newag-prisel-s-novym-hybridnim-vlakem-kombinuje-elektrinu-a-naftu-35018/>
- (8) ALSTOM [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>
- (9) CNBC.com [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.cnbc.com/2020/09/30/uk-trials-hydrogen-train-in-step-forward-for-transport-innovation-.html#close>
- (10) HOMOLKA, Pavel. Možnosti využití BEMU v podmínkách České republiky [online]. 2020 [cit. 2020-12-06]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- (11) BOŠEK, Petr. SŽ. Emailová komunikace. 2020 a 2021.
- (12) UIC [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://uic.org/IMG/pdf/uic-statistics-synopsis-2020.pdf>
- (13) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/jeseta-hrozi-ze-na-lokalkach-nebudeme-mit-s-cim-jezdit-chybi-nastupce-810-64812/>
- (14) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/pet-kilometru-trate-do-kadane-elektrizuje-skanska-vznikne-nova-zastavka-18847/>

- (15) MICHÁLEK, Tomáš. Oddělení kolejových vozidel DFJP. Emailová a osobní komunikace. 2021.
- (16) NOVÁK, Jaroslav. Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě DFJP. Emailová komunikace. 2021.
- (17) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/nahrada-za-810-ceske-drahy-zvazuji-nakup-200-vozu-na-baterie-pro-50-lidi-64909/>
- (18) Prohlášení o dráze 2021 [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/prohlaseni-o-draze-2021>
- (19) Kalkulačka za použití dráhy jízdou vlaku [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/kalkulacka/Vypocet.aspx>
- (20) NACHTIGALL, Petr. Oddělení logistických systémů DFJP. Elektronická komunikace. 2020 a 2021.
- (21) ŽELEZNIČÁŘ ČD [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: [https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/provoz-a-technika/cd-prukopnikem--predstavi-hybridni-vlaky/-19799/21,0,/,/](https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/provoz-a-technika/cd-prukopnikem--predstavi-hybridni-vlaky/-19799/21,0,/)
- (22) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/v-rakousku-vyjel-prvni-vlak-na-baterie-ceske-drahy-hledaji-vhodny-regiopanter-27079/>
- (23) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/rozhovor-arriva-uvazuje-pro-rychliky-z-usti-do-liberce-o-vodikovych-vlacich-62270/>
- (24) POLAR.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://polar.cz/zpravy/moravskoslezsky-kraj/cely-ms-kraj/11000017830/eko-magazin-ms-kraj-chysta-vodikovou-revoluci-na-vodik-budou-jezdit-autobusy-auta-i-lokomotivy>
- (25) IDNES.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ostrava/zpravy/vodik-koksovna-doprava-unucka.A190924_503767_ostrava-zpravy_jaga
- (26) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/vyjedou-u-nas-vlaky-na-vodik-zvazuje-je-uz-druhy-kraj-moravskoslezsky-uz-vymysli-dopravni-model-43632/>
- (27) DOPRAVNÍ NOVINY [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.dnoviny.cz/zeleznicni-doprava/prvni-osobni-vlaky-na-vodik-se-v-ostrem-provozu-v-nemecku-osvedcily-pribydou-desitky-dalsich>

- (28) RAILTECH [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z:
<https://www.railtech.com/rolling-stock/2020/02/06/more-german-operators-prefer-hybrid-trains/?gdpr=accept>
- (29) ÖBB Cityjet eco [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z:
<https://www.oebb.at/en/neuigkeiten/cityjet-eco>
- (30) SMARTCITYVPRAXI.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z:
http://www.smartcityvpraxi.cz/zajimave_projekty_345.php
- (31) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/koleje-dolnoslaskie-koupi-hybridni-vlaky-od-newagu-jina-nabidka-neprisla-59464/>
- (32) MONEY.PL [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z:
<https://www.money.pl/gospodarka/lodzka-kolej-aglomeracyjna-kupuje-pociagi-hybridowe-beda-3-nowe-pojazdy-6528406933596289a.htm>
- (33) I-DOPRAVA.COM [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://i-doprava.com/2020/07/16/v-okoli-stetina-vyjedou-hybridni-vlaky-newag-uspel-s-impulsy-druhe-generace/>
- (34) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/podtatrami-vyjela-poprve-na-trat-nova-hybridni-jednotka-od-stadleru-77665/>
- (35) SLÁDEK, František. Zlepšení železniční osobní dopravy na trati Studénka- Veřovice [online]. Pardubice, 2019 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z:
<https://hdl.handle.net/10195/73739>. Bakalářská práce. Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.
- (36) ŠLAPÁK, Jiří. Vliv elektrifikace trati Klatovy–Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie [online]. 2016 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z:
https://vts.cd.cz/documents/168518/195357/4209_Mich%C3%A1lek%20C5%A0lap%C3%A1k_Vliv+elektrif.trati.pdf/dba93553-7a76-4d8e-950b-e070a13cf5d4
- (37) ZELENKA, Jaromír, Tomáš MICHÁLEK a Martin KOHOUT. Mechanika dopravy: studijní opora. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, dislokované pracoviště Česká Třebová, 2013. ISBN 978 – 80 – 7395 – 739 – 1.
- (38) Knižní jízdní řád tratě č. 325 [online]. 2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z:
https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/115131601/k325_od_2021-04-06.pdf/fa1d7085-e297-42d6-ae2e-6c9fa0787d94
- (39) Mapa počtu traťových kolejí, systémů trakčních soustav a čísla tratí podle knižního jízdního řádu [online]. 2021 [cit. 2021-3]. Dostupné z:
<https://provoz.spravazeleznic.cz/portal/Show.aspx?path=/Data/Mapy/kol.pdf>

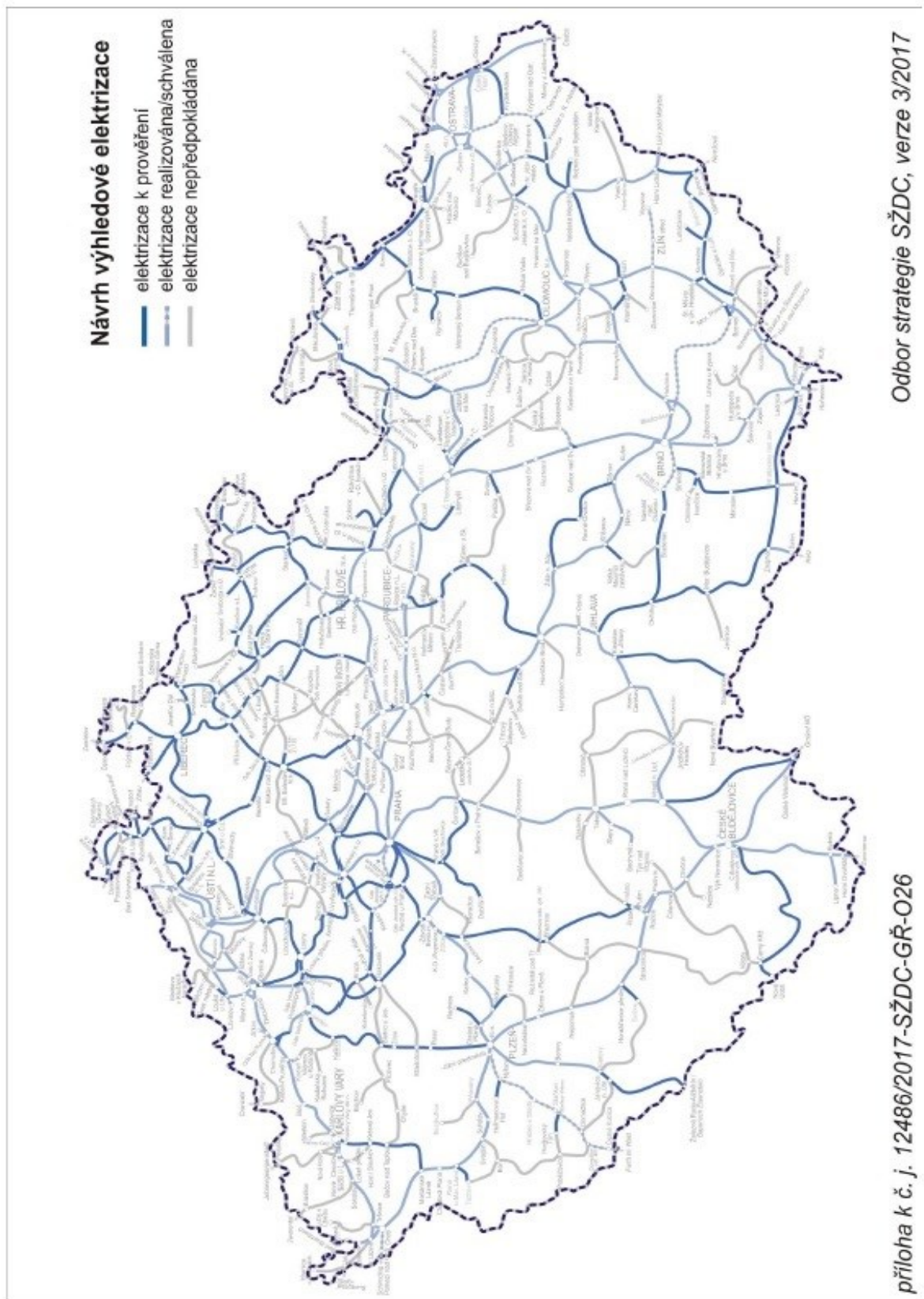
- (40) DALIX.CZ [online]. [cit. 2021-3]. Dostupné z: <https://www.dalix.cz/eshop/nezavisle-teplovodni-teplovodni-topeni-hydronic-35-24v-dc.html>
- (41) Mireo Plus B Ortenau: Siemens [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:636c61e0-bd2d-4f97-a2c7-78e690792a44/mors-b10022-00dbmireoplusortenaueus-72_original.pdf
- (42) Mireo [online]. [cit. 2021-4]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_Mireo#/media/File:DB_BR_463_001_Velim.jpg
- (43) Správa železnic [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50172200/sml-dodavky-tee-2019.pdf>
- (44) ELSTNER, Martin. Zvýšení provozní spolehlivosti motorových vozů ř. 842 [online]. 2009 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/33575>. Diplomová práce. Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Alois Kotrba, Ph.D.
- (45) MAPY.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- (46) ŽELPAGE.CZ [online]. 2018 [cit. 2021-4]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/zpravy/8073>
- (47) ŽELPAGE [online]. 2021 [cit. 2021-4]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/zpravy/7532>
- (48) ŽELPAGE [online]. 2021 [cit. 2021-4]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/zpravy/64903>
- (49) ČESKÉ DRÁHY [online]. 2021 [cit. 2021-4]. Dostupné z: <http://www.ceskedrahy.cz/tiskove-centrum/tiskove-zpravy/-31805/>
- (50) SUDOP BRNO, SPOL S.R.O., DOPRAVNÍ PROJEKTOVÁNÍ, SPOL. S.R.O. a AF – CITYPLAN LTD. Studie proveditelnosti Beskydy. 2016.
- (51) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/sprava-zeleznic-zacina-resit-prepinani-trakcni-soustavy-v-dalsi-oblasti-v-praze-bude-delestejnosmer-64708/>
- (52) SŽ. Tabelární jízdní řád pro rok 2020. 2020.
- (53) Webinář - Liniová elektrifikace, akumulátor nebo vodík. Zvolte tu správnou technologii pro vaše potřeby! Siemens. [online]. 2021 [cit. 2021-4-28].
- (54) BATTERY.CZ [online]. 2021 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/trakcni-baterie-varta-professional-dual-purpose-agm-840-060-068--12v-60ah--la60/>

- (55) ČESKÉ DRÁHY [online]. 2021 [cit. 2021-4]. Dostupné z:
<https://www.cd.cz/images/cdosn/trains/R27-2020.pdf>
- (56) ZDOPRAVY.CZ [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/ceske-drahy-zverejnily-smlouvu-se-statem-na-dalkove-vlaky-zlevnily-desetiletou-jistotu-maji-u-7-linek-38271/>
- (57) Ministerstvo dopravy [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z:
<https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Návrh výhledové elektrizace v ČR.....	76
Příloha B – Přehled měrných spotřeb a koeficientů na síti SŽ.....	77
Příloha C – Kompaktní disk se zdrojovými daty simulace jízdních dob a spotřeby energie ...	78

Příloha A – Návrh výhledové elektrizace v ČR



Zdroj: (11)

Příloha B – Přehled měrných spotřeb a koeficientů na síti SŽ

Způsob výpočtu příslušné konečné MS_k : $MS_k = MS \times k_r \times k_z \times k_t$

Přehled měrných spotřeb a koeficientů:

Střídavá trakční soustava

Měrné spotřeby - MS

Typ vlaku	Měrná spotřeba EE [kWh/tis. hrtkm]
Vlaky Ex a R (SC, EC, IC, Ex, R, Sp, Sv)	24,5
Vlaky Os (zast. Os. vlaky, ostatní vlaky osobní dopravy)	34,5
Vlaky nákladní (Nex, Rn, Pn, Vn, Mn+Vleč)	14,75
Ostatní vlaky (lokomotivní)	29

Koeficienty ročního období - k_r

Měsíce			
prosinec - únor	březen - květen	červen - srpen	září - listopad
1,02	1	1	1,02
1,02	1	1	1,02
1	1	1	1
1	1	1	1

Koeficient technických ztrát - k_z 1,09

Stejnoseměrná trakční soustava

Měrné spotřeby - MS

Typ vlaku	Měrná spotřeba EE [kWh/tis. hrtkm]
Vlaky Ex a R (SC, EC, IC, Ex, R, Sp, Sv)	23,3
Vlaky Os (zast. Os. vlaky, ostatní vlaky osobní dopravy)	33,5
Vlaky nákladní (Nex, Rn, Pn, Vn, Mn+Vleč)	13,35
Ostatní vlaky (lokomotivní)	29

Koeficienty ročního období - k_r

Měsíce			
prosinec - únor	březen - květen	červen - srpen	září - listopad
1,03	1	1	1,02
1,03	1	1	1,02
1	1	1	1
1	1	1	1

Koeficient technických ztrát - k_z 1,18

Koeficient technologické spotřeby - k_t

Typ vlaku	hodnota
Vlaky Ex a R (SC, EC, IC, Ex, R, Sp, Sv)	1,11
Vlaky Os (zast. Os. vlaky, ostatní vlaky osobní dopravy)	1,11
Vlaky nákladní (Nex, Rn, Pn, Vn, Mn+Vleč)	1,08
Ostatní vlaky (lokomotivní)	1

Celkový bilanční koeficient pro trakční soustavu 5% (průměrná roční hodnota).

Zdroj: (43)

Příloha C – Kompaktní disk se zdrojovými daty simulace jízdních dob a spotřeby energie