



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Jiří Krejčí

**MOŽNOST PROVOZU JEDNOTEK  
BEMU NA LINKÁCH OSOBNÍ  
REGIONÁLNÍ ŽELEZNIČNÍ  
DOPRAVY**

Diplomová práce

**2023**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K612** ..... **Ústav dopravních systémů**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jiří Krejčí**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy**

Název tématu (anglicky): Possibilities of Operating BEMU Units on Passenger Regional Rail Transport Lines

**Zásady pro vypracování**

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

- představení a princip hybridních elektrických jednotek s akumulátory (BEMU)
- sestavení základního modelu nabíjení a vybíjení akumulátoru jednotek BEMU
- varianty vztahu úrovně nabití akumulátoru jednotky BEMU, jejího provozního nasazení a vybavení žel. infrastruktury pevnými trakčními zařízeními
- odvození mezních parametrů pro provozní koncepci linky, na kterou mají být jednotky BEMU nasazeny, a infrastruktury závislé elektrické trakce vzhledem ke spolehlivosti provozu vlaků tvořených jednotkami BEMU
- aplikace modelu nabíjení a vybíjení akumulátoru jednotky BEMU na vybranou linku osobní regionální žel. dopravy, která je zčásti vedena po neelektrizované trati
- návrhy na budoucí další zpřesňování modelu nabíjení a vybíjení akumulátoru jednotky BEMU



Rozsah grafických prací: stanoví vedoucí diplomové práce


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: TÝFA, L., M. JACURA a T. JAVOŘÍK. Alternativní pohony v osobní železniční dopravě a možnosti jejich aplikace v ČR - 1. a 2. část. Nová železniční technika. 2021, 29(2)+(3). ISSN 1210-3942.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Lukáš Týfa, Ph.D.**

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

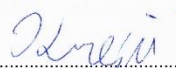
Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2023**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

  
Bc. Jiří Krejčí  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. června 2022

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Lukáši Týfovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia.

V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

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

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

V Praze dne 15. května 2023

.....

podpis

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

**MOŽNOST PROVOZU JEDNOTEK BEMU  
NA LINKÁCH OSOBNÍ REGIONÁLNÍ  
ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY**

Diplomová práce

květen 2023

Bc. Jiří Krejčí

**ABSTRAKT**

Předmětem této diplomové práce je prověření možnosti provozu jednotek BEMU na linkách osobní regionální železniční dopravy v České republice. Pro možnost stanovení spotřeby energie z trakčního akumulátoru byl vytvořen model, který byl na závěr porovnán s již existující profesionální aplikací. V práci jsou uvedeny i příklady modelových situací.

**KLÍČOVÁ SLOVA**

Železniční doprava, životní prostředí, alternativní pohony, jednotky BEMU, dvousložková metoda, trakční akumulátor, model, trať číslo 201, Tábor, Písek, Strakonice, aplikace FBS

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE**  
**FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES**

**POSSIBILITIES OF OPERATING BEMU  
UNITS ON PASSENGER REGIONAL RAIL  
TRANSPORT LINES**

Diploma thesis

May 2023

Bc. Jiří Krejčí

**ABSTRACT**

The subject of this diploma thesis is the verification of the possibility of BEMU units operating on lines of passenger regional rail transport in the Czech Republic. For the possibility of deterring the energy consumption from the traction accumulator, a model was created, which was finally compared with an already existing professional application. Examples of model situations are also presented in this thesis.

**KEY WORDS**

Rail transport, environment, alternative drives, BEMU units, two-component method, traction accumulator, model, track number 201, Tábor, Písek, Strakonice, application FBS

## OBSAH

1	ÚVOD .....	9
2	ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA A SPOTŘEBA ENERGIE .....	10
2.1	Energie pro dopravu .....	10
2.2	Vztah železnice a životního prostředí .....	12
2.3	Náhrada nezávislé trakce alternativními pohony .....	14
3	HYBRIDNÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY S AKUMULÁTORY (BEMU) .....	17
3.1	Historie jednotek BEMU .....	17
3.2	Možnosti nasazení jednotek BEMU .....	18
3.3	Akumulátory .....	21
3.4	Zdroj získávání energie .....	22
3.5	Přehled současných jednotek BEMU a jejich provoz .....	24
4	SESTAVENÍ ZÁKLADNÍHO MODELU NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ AKUMULÁTORU JEDNOTEK BEMU .....	30
4.1	Dvousložková metoda .....	31
4.2	Model .....	31
4.2.1	Počáteční podmínky – infrastruktura, jízdní doby a doby pobytu .....	35
4.2.1.1	Trakční vedení .....	35
4.2.1.2	Odstavení vozidel v nočních hodinách .....	35
4.2.1.3	Limitní příkony pro nabíjení akumulátoru .....	36
4.2.1.4	Délky jednotlivých úseků .....	37
4.2.1.5	Cestovní doby a doby pobytu .....	37
4.2.2	Počáteční podmínky – jednotka BEMU .....	40
4.2.2.1	Energie trakčního akumulátoru .....	40
4.2.2.2	Gradient trakční spotřeby .....	41
4.2.2.3	Příkon vedlejší spotřeby .....	42
4.2.2.4	Účinnost .....	44
4.2.3	Stanovení výpočtů jednotlivých veličin .....	46
4.2.3.1	Úseková rychlost .....	46
4.2.3.2	Spotřeba energie z akumulátoru .....	47

4.2.3.3	Spotřeba energie z trakčního vedení a konečný stav energie v trakčním akumulátoru.....	50
4.2.3.4	Spotřeba energie z trakčního vedení při rozložení nabíjení a konečný stav energie v trakčním akumulátoru.....	55
4.2.4	Shrnutí výsledků.....	60
4.2.5	Návrhy pro budoucí zpřesňování modelu .....	64
5	MODELOVÉ SITUACE PROVOZNÍHO NASAZENÍ JEDNOTEK BEMU V MODELU ..	65
5.1	Modelová situace číslo 1 .....	65
5.1.1	Popis situace.....	65
5.1.2	Vstupní parametry.....	65
5.1.3	Vyhodnocení výstupních parametrů .....	67
5.1.4	Závěr modelové situace a návrh řešení.....	73
5.2	Modelová situace číslo 2 .....	75
5.2.1	Popis situace.....	75
5.2.2	Vstupní parametry.....	75
5.2.3	Vyhodnocení výstupních parametrů .....	78
5.2.4	Závěr modelové situace a návrh řešení.....	84
5.3	Modelová situace číslo 3 .....	86
5.3.1	Popis situace.....	86
5.3.2	Vstupní parametry.....	86
5.3.3	Vyhodnocení výstupních parametrů .....	89
5.3.4	Závěr modelové situace a návrh řešení.....	96
6	MODELOVÁ SITUACE PROVOZNÍHO NASAZENÍ JEDNOTEK BEMU V MODELU NA KONKRÉTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATI .....	99
6.1	Modelová situace pro reálnou železniční trať.....	99
6.1.1	Popis situace.....	99
6.1.2	Vstupní parametry.....	100
6.1.3	Vyhodnocení výstupních parametrů .....	102
6.1.4	Závěr modelové situace a návrh řešení.....	109
6.2	Porovnání modelu a aplikace FBS.....	112
6.2.1	Aplikace FBS .....	112



6.2.2	Vozidlo pro simulaci v aplikaci FBS .....	112
6.2.3	Simulace v modelu a aplikaci FBS .....	113
6.2.4	Závěr simulací.....	115
7	ZÁVĚR .....	117
8	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	120
9	SEZNAM TABULEK .....	124
10	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	125
11	SEZNAM GRAFŮ .....	127

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BEMU	bateriová (akumulátorová) elektrická jednotka (battery electric multiple unit)
ČKD	Českomoravská – Kolben – Daněk, a.s.
ČSD	Československé státní dráhy
DB	Německé dráhy (Deutsche Bahn)
EMU	elektrická jednotka (electric multiple unit)
GVD	grafikon vlakové dopravy
HEMU	vodíková elektrická jednotka (hydrogen electric multiple unit)
HMU	vodíková jednotka (hydrogen multiple unit)
KJŘ	knižní jízdní řád
ÖBB	Rakouské spolkové dráhy (Österreichische Bundesbahnen)
TSI	technické specifikace pro interoperabilitu
TTP	tabulky traťových poměrů
žst.	železniční stanice

## SEZNAM DOPRAVEN PRO APLIKACI FBS

BOZE	Božejovice
SEPE	Sepekov
MILE	Milevsko
BRNC	Branice
PISM	Písek město
PISJ	Písek jih
PISK	Písek

# 1 ÚVOD

V několika posledních letech dochází k nárůstu dopravy. Tento trend se nevyhnul ani dopravě železniční, a to jak osobní, tak i nákladní. Kromě zajištění konkurenceschopnosti železnice s ostatními druhy dopravy je povinností lidstva pro následující generace zajistit ochranu životního prostředí v podobě snížení uhlíkaté stopy a produkce škodlivých emisí. Cílem tedy je dosáhnout klimatické neutrality železniční dopravy a maximální eliminace zmíněných škodlivin.

Tato práce se zabývá možností náhrady železničních vozidel pro přepravu cestujících, která jsou nasazována do pravidelného provozu na české železniční síti a využívají ke svému pohybu fosilní paliva. Náhradou by měla být vozidla s označením BEMU (battery electric multiple unit), respektive jednotky s trakčními akumulátory. Ta by právě měla být využívána na tratích bez liniové elektrizace. Především se jedná o tratě regionální, které propojují uzlové železniční stanice, které by měly představovat „nabíjecí bod“ pro obnovu energie v trakčním akumulátoru.

Aby nedocházelo k prověření možnosti nasazení jednotek BEMU (battery electric multiple unit) do pravidelného provozu pouze na základě parametrů uváděných výrobcem, byl v rámci této diplomové práce zpracován model umožňující stanovení spotřeby energie z trakčního akumulátoru. Zmíněná spotřeba vychází z takzvané dvousložkové metody. Tato metoda je založena na principu součtu spotřeby energie pro trakci a příkonu vedlejších pohonů, jako je například vytápění/klimatizace nebo kompresory. V rámci této práce byly stanoveny tři modely znázorňující výstupy ze zmíněného modelu.

Na závěr je zmíněný model aplikován na trať číslo 201 (dle tabulek traťových poměrů číslo 702B) v úseku z Tábora do Ražic. Jedná se o dráhu regionální, spojující dvě železniční tratě elektrizované střídavou soustavou o 25 kV, 50 Hz. Zmíněný úsek dosahuje délky 60 km a je na něm umožněna nejvyšší traťová rychlost 100 km/h. Dále je stanoveno prověření spotřeby energie z akumulátoru profesionální aplikací FBS a následné porovnání dosažených výsledků.

Číslování uvedených tratí zmíněných v této práci a analýza spojů se vztahuje ke knižnímu jízdnímu řádu, který platí od 11. prosince 2022 do 9. prosince 2023. U zmíněných tratí je zároveň uvedeno číslování dle TTP (tabulky traťových poměrů).

## 2 ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA A SPOTŘEBA ENERGIE

### 2.1 Energie pro dopravu

Na úvod, než bude popsán konkrétní princip jednotek BEMU, je zapotřebí zmínit problematiku energie v dopravě, jejímž důsledkem je možnost nasazení zmíněných jednotek do pravidelného provozu.

V posledních letech (vyjma úpadku spojeného s nemocí COVID-19) dochází k velkému nárůstu dopravy, ať už se jedná o dopravu osobní, tak i nákladní. S tím jsou spojeny i zvyšující se nároky na snižování spotřeby energie, produkce oxidu uhličitého způsobujícího globální oteplování a emisí škodlivých látek. Tento problém je především spojen s takzvanou primární energií, která je následně použita k přeměně na energii spotřebovanou pro pohyb dopravních prostředků. Například fosilní paliva tvoří energii primární. Při jejich spalování dochází k uvolnění takzvané sekundární energie, která se používá pro samotný pohon dopravního prostředku. Dnešní hlavní prioritou je získávat primární energii v co největším podílu právě z obnovitelných zdrojů. [1] [2]

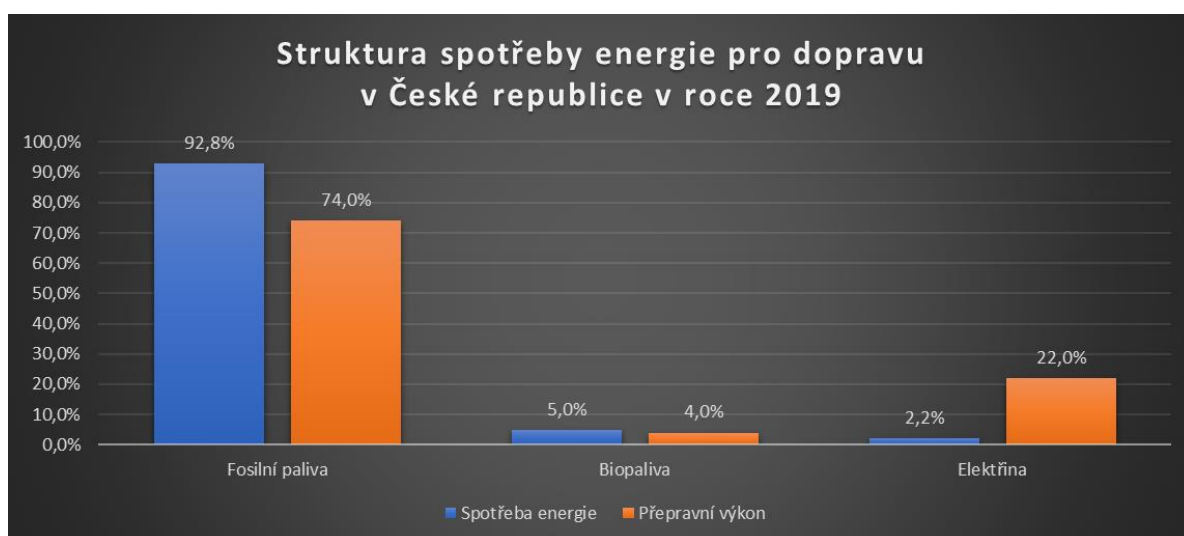
V rámci České republiky se nejedná pouze o požadavek snížit spotřebu energie, ale i snížit závislost na nákupu fosilních paliv (užité jako primární energie) od států, které jimi disponují. Téměř 93 % energie, kterou doprava v České republice spotřebovává, se totiž získává z importovaných fosilních paliv (91,3 % ropné produkty, 1,4 % zemní plyn). Pro zajímavost, podíl spotřebované ropy v rámci Evropské unie je 112krát větší než podíl vlastních zásob v rámci unie. [1] [3]

Česká republika dlouhodobě patří mezi země s vysokým podílem spotřebované energie a s velkou produkcí oxidu uhličitého, vznikajícího spalováním fosilních paliv. Na území naší země se doprava na konečné spotřebě energie podílí 27 % (průmysl 31 %). Pro porovnání spotřebovává každý obyvatel během jednoho dne 20 kWh energie a vyprodukuje 5 kg oxidu uhličitého. Zároveň struktura spotřeby energie pro dopravu není v České republice příliš příznivá. To je konkrétně znázorněno v Grafu 1. [1] [4]

Ze zmíněného grafu (Graf 1), který byl zpracován pro období před nemocí COVID-19 (pro rok 2019), je patrné, že většinu energie vytváří fosilní paliva, a to 92,8 %. Zároveň fosilní paliva se podílí nejvíce na přepravním výkonu, konkrétně 74,0 % (produkují škodlivý oxid uhličitý, viz předchozí odstavec). Naopak elektrické energie se spotřebovávají pouhých 2,2 %. V porovnání s fosilními palivy se elektřina při tak malé spotřebě energie podílí 22,0 % na přepravním výkonu. Poměr 10krát vyššího podílu elektrické vozby na přepravních výkonech než na spotřebě energie pro dopravu je dán fyzikálními zákony, ze kterých vyplývá, že elektrický motor oproti motoru spalovacímu dosahuje vyšší účinnosti. Je zapotřebí uvést, že uvedené hodnoty týkající se elektřiny zahrnují veškeré druhy dopravy

(vychází z názvu grafu). V roce 2019 bylo v České republice zaregistrováno z celkového počtu 5 989 538 osobních vozidel pouze 1 229 elektromobilů (pouze 0,02 % ze zmíněného celkového počtu). V ostatních druzích dopravy (letecké a vodní) se pro pohyb elektrická energie příliš nevyužívá. Z toho vyplývá, že uvedeného hodnoty v grafu (viz Graf 1) pro elektřinu se vztahují především k dopravě železniční. [1] [5] [6]

V grafu (viz Graf 1) jsou uvedeny i další zdroje primární energie. Jedná se o biopaliva, která se na spotřebě energie podílí pouze 5,0 %. Zároveň tvoří podíl pouze 4,0 % na celkovém přepravním výkonu. Především jejich nevýhody způsobují, že biopaliva nejsou příliš rozšířena. Mezi negativa bionafty patří například ekonomická náročnost na výrobu, vznik mastných kyselin při kontaktu s vodou a následná koroze nádob, vznik organických usazenin zanášejících palivový filtr a menší účinnost (o zhruba 5 %) než u běžné motorové nafty. [1] [7]



Graf 1 - Struktura spotřeby energie pro dopravu v ČR v roce 2019

Zdroj: Autor na základě [1]

Z předchozích odstavců a grafu (viz Graf 1) je patrné, že snížení podílu fosilních paliv v dopravě by mělo za následek zamezení vypouštění nebezpečných látek (především oxidu uhličitého) do ovzduší a zároveň finanční úsporu při nákupu fosilních paliv. Odstranění závislosti by v České republice vedlo k ušetření až 130 miliard Kč/rok. Tato motivace nahrává zvýšení podílu přepravního výkonu u energeticky úspornější dopravy, která pro pohyb vozidel užívá elektrické energie (2,2 % spotřeba energie při 22,0 % přepravním výkonu). Především se tedy jedná o dopravu železniční. Je ale zapotřebí uvést, že energeticky úspornější železnice je pouze ta, kde se k pohybu vozidel používá energie elektrická. To znamená omezení užívání fosilních paliv a především jejich náhradu. V úvahu připadají dvě možnosti. První možnost spočívá ve výstavbě trakčního vedení a následný provoz jednotek EMU. Druhým způsobem je uložení potřebné energie (v místě nabíjecí nebo plnicí stanice) do zásobníku (akumulátor, palivový článek) daného vozidla. Během jízdy využívá vozidlo

elektrickou energii přímo z akumulátoru (jednotky BEMU) anebo dochází v palivovém článku k výrobě elektrické energie (jednotky HMU), která je následně využívána pro pohyb. Při návrhu možnosti nasazení zmíněných jednotek (především BEMU a HMU) je zapotřebí vzhledem k jejich pořizovací ceně (viz kapitola 3.2) provést analýzu potřebné kapacity pro cestující. S tím souvisí, že nabízená kapacita vozidla má být plně využita. V opačném případě se jedná o takzvanou „mrtvou hmotnost“ (vozidla bez cestujících), která není žádoucí. [1]

## 2.2 Vztah železnice a životního prostředí

Postupným historickým vývojem se samotné lidstvo snaží vynalézat nové a nové prostředky, které by zjednodušovaly a ulehčovaly jakoukoliv lidskou činnost. Tento vývoj se nevyhnul ani dopravě železniční. Od prvních animálních pohonů (dráhy koněspřežné), přes parní trakci, nezávislou trakci (primární energie v podobě pohonů fosilních paliv a biopaliv, popis viz kapitola 2.1) až k trakci závislé, kde se k pohonu vozidla používá samotná elektrická energie. V tomto postupném historickém vývoji hrálo roli několik aspektů. Mezi zásadní hledisko patřila energie pro pohyb vozidla (sekundární energie) a její získávání (primární energie), zároveň se jednalo i o účinnost vozby. Přehled jednotlivých účinností vozby se nachází v následující tabulce (viz Tabulka 1). [1]

Tabulka 1 - Účinnost jednotlivých druhů pohonů

Druh pohonu	Účinnost
Parní stroj a kotel	6 %
Spalovací motor vznětový (nafta) a přenos výkonu	32 %
Spalovací motor zážehový (benzín, metan) a přenos výkonu	32 %
Trakční elektromotor a palivový článek (vodík)	48 %
Trakční elektromotor a lithiový akumulátor (pod trakčním vedením)	70 %
Trakční elektromotor a liniové trakční vedení	80 %

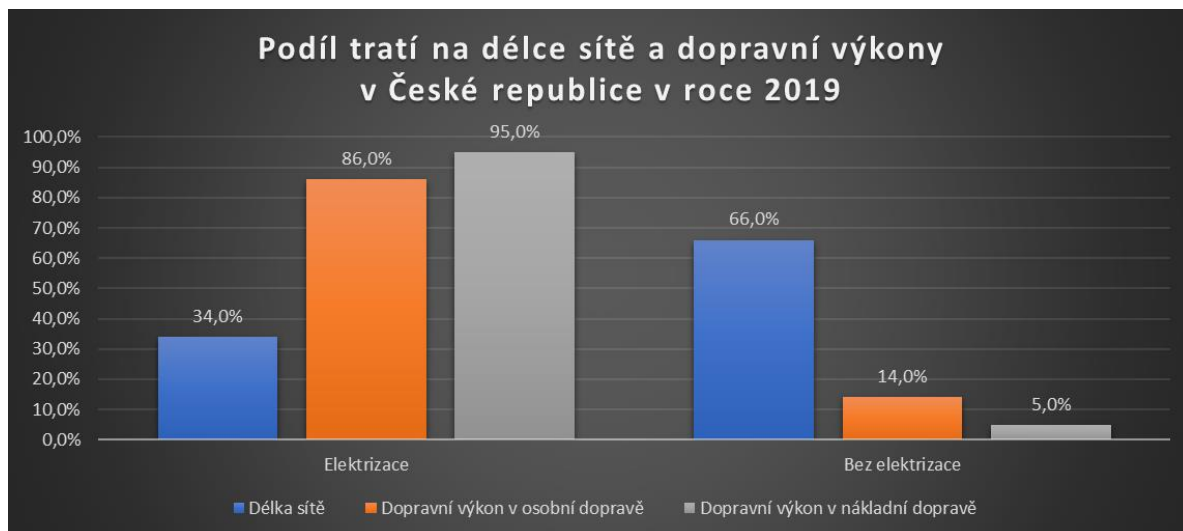
Zdroj: [2] [8]

Hodnoty účinnosti vozby uvedené v tabulce (viz Tabulka 1) znázorňují zmíněný postupný historický vývoj pohonu na železnici. Prvním pohonem (pokud není brán pohon animální) byla parní trakce. Samotný parní stroj dosahuje účinnosti 15 %. Je ale zapotřebí brát v potaz účinnost kotle, sloužící pro výrobu páry a je tedy součástí řetězce pro přenos výkonu na kola. Po součtu účinností jednotlivých částí parní lokomotivy dosahuje výsledná hodnota účinnosti pouze 6 %. Následný objev spalovacího motoru, který začal být využíván i v železniční dopravě, přinesl zvýšení účinnosti na pětinasobek oproti parnímu pohonu. Zmíněná účinnost zahrnuje spalovací motor a přenos výkonu na obvod kol. Individuální účinnost vznětového motoru činí 40 %, zážehového 36 %. Trakční elektromotor společně s transformátory, měniči a převody dosahuje účinnosti zhruba 86 %. Při zahrnutí trakční napájecí stanice a liniového

trakčního vedení se střídavou soustavou o 25 kV, 50 Hz (s účinností 95 %) představuje výsledná účinnost hodnotu 80 %. Jedná se o nejvyšší účinnost, kterou je v železniční dopravě možné běžně využívat. V případě vozidla s trakčním akumulátorem je výsledná účinnost o 10 % nižší. Zmíněná účinnost je způsobena především větším množstvím součástí daného železničního vozidla (trakční napájecí stanice a liniové trakční vedení 25 kV, 50 Hz s účinností 95 %; transformátor, měniče, trakční akumulátor s měničem o účinnosti 88 %; trakční elektromotor s převody zhruba o účinnosti 86 %). Vozidla s nejnižší účinností, využívající pro svůj pohyb elektromotor, jsou ta s palivovými články. Jednotlivé části dosahují účinnosti až 80 % (palivový článek (vodík), vyrovnávací akumulátor, měniče, trakční elektromotor, převod), avšak výsledná účinnost je pouhých 48 %. I přesto mají jednotlivé kombinace s elektromotorem vyšší účinnost než spalovací motor.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (viz kapitola 2.1), je zapotřebí dekarbonizovat dopravu, snížit uhlíkovou stopu a eliminovat škodlivé exhalace, vypouštěné do ovzduší při spalování fosilních paliv v motorech. Tyto cíle sleduje také Evropská komise, která vydala jednotlivá sdělení. Například Sdělení Evropské komise COM(2019) 640 Green deal, kde je v kapitole 2.1.5 stanoveno, že do roku 2050 se mají snížit emise z dopravy o 90 % a do roku 2050 převést 75 % nákladní dopravy ze silnic na železnici a vodu. Je ale důležité, aby v době převodu nákladní dopravy byla železniční doprava co nejvíce ekologická. To znamená, že je zapotřebí docílit co největšího rozvoje užití elektrické energie pro pohon jednotlivých vozidel. Toto tvrzení vychází z grafu spotřeby energie (viz Graf 1), kdy se elektřina v roce 2019 podílela 22,0 % na přepravním výkonu při spotřebě pouze 2,2 % energie. Zároveň trakční elektromotor dosahuje více jak dvojnásobné účinnosti (viz Tabulka 1), oproti motoru spalovacímu. [1]

Na základě dohledatelných dat pro rok 2019 (před nemocí COVID-19) byl zpracován graf (viz Graf 2) znázorňující porovnání podílu elektrizovaných a neelektrizovaných tratí a dopravní výkony v osobní i nákladní dopravě. K 31. prosinci 2019 bylo z celkové délky tratí 9 396 km v provozu 3 213 km elektrizovaných tratí. Ačkoliv se liniová elektrizace nacházela jen na 34 % délky železniční sítě, zajišťovaly v České republice elektrizované železniční tratě 86 % dopravních výkonů v osobní dopravě a 95 % výkonů v nákladní dopravě. Je tedy patrné, že většina nákladu a osob byla přepravena po síti příznivé k životnímu prostředí. [1] [3] [6]



Graf 2 - Podíl tratí na délce sítě a dopravní výkony v České republice v roce 2019

Zdroj: Autor na základě [1]

V České republice se nacházejí čtyři napájecí systémy. Severní část republiky je napájena stejnosměrnou soustavou 3 kV, jižní část poté střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz. Třetím napájecím systémem je trať z Tábora do Bechyně s jedinečným napájecím systémem stejnosměrnou soustavou 1,5 kV. Poslední napájecí systém se nachází na trati číslo 248 Znojmo – Retz (dle TTP číslo 322A), kde došlo k elektrizaci 31. října 2009. Jedná se o rakouský napájecí systém střídavé soustavy 15 kV, 16,7 Hz. [3]

Jedním z důvodů nerozšiřování tratí s trakčním vedením je cena výstavby, která dosahuje zhruba 7 milionů Kč na kilometr (pro jednokolejnou trať). Dalším argumentem je neekologická výroba elektrické energie v uhelných elektrárnách. Jejich náhradou jsou dnes elektrárny jaderné. Nejvíce šetrné k životnímu prostředí jsou elektrárny využívající pro výrobu elektrické energie obnovitelné zdroje (elektrárny vodní nebo větrné). Na české železnici převažují tratě bez liniové elektrizace (k 31. prosinci 2022 bylo elektrizováno 3 215 km z celkové délky tratí 9 355 km), kde jsou provozována vozidla nezávislé trakce. Náhradou této trakce by měly být alternativní pohony (viz kapitola 2.3), jejichž principem je využít výhody pohonu závislé trakce a eliminovat nevýhody trakce nezávislé. [1] [9]

### 2.3 Náhrada nezávislé trakce alternativními pohony

S alternativním pohony na železnici se nejčastěji spojují následující dvě varianty. První možností jsou vozidla se zásobníky pro vodík a následné použití tohoto plynu v palivovém článku. Druhý případ je poté možnost využití zásobníků energie v podobě elektrochemických akumulátorů (zpravidla lithiových). V obou případech je pohyb umožněn trakčním elektromotorem (využití sekundární energie, viz kapitola 2.1). Rozdíl ale spočívá v primární energii (viz kapitola 2.1), která je následně převedena na energii sekundární. Mezi alternativní pohon se řadí i zemní plyn, označován někdy jako ideální palivo. Oproti motorové naftě



dosahuje menší uhlíkaté stopy, ale při jeho využití dochází k nárůstu spotřeby energie. Další nevýhodou je strategická závislost na tomto neobnovitelném zdroji. Výše zmíněné skutečnosti jsou důvodem, proč se tento pohon nerozšířil. [1] [3]

V České republice byla v roce 2015 ve spolupráci se společností České dráhy, společností Vítkovice Doprava a Výzkumného ústavu železničního představena lokomotiva řady 714.801 s pohonem na stlačený zemní plyn (CNG). Uvedená lokomotiva byla dle Českých drah první svého typu ve střední Evropě. Její délka byla 15 metrů a řadila se k nejvýkonnějším strojům svého druhu v celé Evropě. Lokomotiva měla dva motory o výkonu 260 kW, přičemž původní palivová nádrž na naftu byla nahrazena svazky tlakových lahví, jejichž objem činil 3 430 litrů. To umožňovalo dojezd na vzdálenost až 1 500 km. Lokomotiva měla být nasazována na pravidelných spojích Českých drah mezi žst. Hlučín a žst. Opava-východ. Právě v poslední zmíněné žst. měla společnost Vítkovice Doprava vybudovat plnicí stanici, kterou měly využívat i autobusy a veřejnost. V době vzniku této práce nejsou dostupné zdroje, které by popisovaly současný provoz. [3] [10]

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, jedním z alternativních pohonů využívaných na železnici je vodík a vodíkový palivový článek. Tyto jednotky jsou označovány zkratkou HMU. V případě, kdy jednotky jsou schopny odebírat energii z trakčního vedení a následně ji využívat pro pohon, jsou tyto jednotky označovány zkratkou HEMU. Výhodou využití vodíkových palivových článků oproti fosilním palivům spočívá v účinnosti vozby, která činí okolo 60 % (viz Tabulka 1). Jednotky vybaveny palivovým článkem zároveň disponují velkým dojezdem. Při představení jednotky Coradia iLint společností Alstom v České republice ve dnech 16. až 25. května 2022 bylo prezentováno, že na jedno naplnění zásobníku (celková doba plnění 15 min.) je jednotka schopná ujet vzdálenost 600 až 800 km. Nevýhoda jednotek HMU spočívá v získávání primární energie, kterou tvoří již několikrát zmíněný vodík. Aby mohlo dojít k přeměně vodíku na elektrickou energii v palivovém článku, je zapotřebí dosáhnout určité čistoty zmíněného plynu. Čistota vodíku musí být minimálně 99,97 %. Z toho je patrné, že v oblastech (především chemických závodů), kde je vodík produkován jako odpadní produkt, není možné jeho okamžité použití. Česká republika nemá v současné době uspokojivou produkci a zároveň ani infrastrukturu na dostatečně vysoké úrovni pro pokrytí spotřeby na železnici. Dosavadní možnosti výroby vodíku v Česku zajišťují chemické závody v Litvínově, Ústí nad Labem a ocelárna ve Vítkovicích, přičemž náklady na dopravu vodíku přesahují jeho vlastní cenu. I přesto jsou v plánu v roce 2030 tankovací terminály v Litvínově a Neratovicích. Nevýhodou vodíku je jeho vysoká hořlavost a výbušnost, je tedy zapotřebí jej skladovat ve vysoce odolných a těžkých nádobách (například z oceli nebo kompozitu). Na základě uvedených informací není prozatím v České republice perspektivní provoz vozů s palivovým článkem. [3] [11]

Využití zásobníků primární energie v podobě elektrochemických akumulátorů je v České republice příznivější. Jejich princip provozu spočívá v tom, že vozidla vybavena tímto zařízením spojují body na železniční síti, kde se vyskytuje možnost nabíjení (viz kapitola 3.2). Vzhledem k tomu, že se tato práce věnuje provozu jednotek s akumulátorem (označovány jako BEMU), je podrobnější popis v následující kapitole. [3]

### 3 HYBRIDNÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY S AKUMULÁTORY (BEMU)

Nedostatečná distribuce vodíku v rámci České republiky (viz kapitola 2.3) způsobuje, že perspektiva alternativních pohonů na české železnici spočívá především v jednotkách BEMU. Jejich nasazení do pravidelného provozu by mělo být v místech železniční sítě, kde není liniové trakční vedení a v nejbližší době není uvažováno o jeho výstavbě (není možnost nasazovat jednotky EMU). Provoz na těchto tratích je v dnešní době zajišťován především vozidly s pohonem na fosilní paliva, jejichž provoz není příznivý k životnímu prostředí. Jednotky BEMU se oproti jednotkám EMU na první pohled výrazně neliší. Jediný rozdíl mezi zmíněnými jednotkami EMU a BEMU je ten, že jednotky BEMU jsou vybaveny zásobníkem energie v podobě elektrochemických akumulátorů (bateriemi) pro uchování energie během jízdy mimo liniové trakční vedení. Problém u jednotek BEMU je ale jejich pořizovací cena (viz kapitola 3.2). Dnešním trendem je využívat moderní lehké jednotky, které poskytují dostatečný komfort, nízkopodlažnost, rychlou akceleraci, dostatečný výkon a stanoviště strojvedoucího mají na obou stranách jednotky. [3]

#### 3.1 Historie jednotek BEMU

Vozidla s elektrochemickým akumulátorem nemají historii pouze několik desítek let. Na území České republiky se nicméně nejednalo o žádné jednotky, ale spíše o lokomotivy posunovací. Jeden z prvních pokusů byla elektrická tramvaj s akumulátorem z roku 1899 provozována na železniční trati z Nuslí do Trnové (Praha-Vršovice – Měchenice). Jejím konstruktérem byl významný český vynálezce František Křižík. Mezi lety 1926 až 1927 začaly ČSD užívat dvě posunovací lokomotivy řady E 407.0 s akumulátory, kde první byla dodána společností Křižík, druhá pak byla vyrobena v závodech ČKD. Lokomotivy byly konstruovány tak, že uprostřed se nacházela malá krátká kabina pro strojvedoucího, na obou krajích byly prostory pro umístění velkých akumulátorů s nízkými kapotami, se shora zastřešenými vlnitými plechy. Tento koncept umožnil uložení velkých těžkých olovněných akumulátorů pro potřebný dojezd a zároveň i pro lepší polohu těžiště a lepší výhled strojvedoucího. Akumulátory zmíněných lokomotiv řady E 407.0 disponovaly jmenovitou energií 300 kWh (476 V, 630 Ah). Jejich hmotnost činila 34 t, což byla zhruba polovina celkové hmotnosti lokomotivy. Lokomotivy se velice osvědčily, a tak došlo k jejich navázání řadami E 417.0 a E 416.0. Ty už byly vyráběny Škodovými závody. Poslední lokomotivy těchto řad byly dodány v roce 1949. V 60. letech minulého století docházelo k postupnému ústupu od vozidel s akumulátory. Důvodem byla především snadně dostupná a levná fosilní paliva. Opětný pokus o lokomotivu s akumulátorem přišel v roce 1993. Jednalo se o dvounápravovou akumulátorovou lokomotivu řady A 219.0001 (odvozena z tehdy vyráběných dieselových lokomotiv řady 704.5) vyrobena ve společnosti ČKD. Jmenovitá energie dosahovala hodnoty 192 kWh (640 V, 300 Ah) a mezi její vybavení patřilo elektrodynamické rekuperační brzdění. Důvodem toho,

že lokomotiva nebyla příliš rozšířena byla především skutečnost, že vznikla v době, kdy o takováto vozidla nebyl zájem. [3]

Oproti vozidlům s akumulátory na území dnešní České republiky mají tato vozidla v zahraničí rozsáhlejší historii. Od konce 19. století doznaly v Německu elektrické akumulátorové trakční vozy velkého rozšíření. Především se jednalo o dvouvozové elektrické jednotky vycházející z návrhu Gustava Wittfelda. Akumulátory byly umístěny pod nízkými kapotami nad pojezdem na čelech vozidla. Společnost Deutsche Bahn vlastnila mezi lety 1959 až 1965 celkem 161 elektrických trakčních vozů řady ETA 150.5, později označovány 515. Díky lehké a samonosné konstrukci bylo umožněno ve velkém prostoru umístit olovňené akumulátory s energií 597 kWh (440 V, 1 365 Ah) a hmotností 23 t (zhruba 40 % celkové hmotnosti vozu). V 90. letech minulého století nebyl kladen důraz na ekologičnost, a tak docházelo k postupnému nahrazování zmíněných vozů motorovými jednotkami poháněnými spalovacími motory. [3]

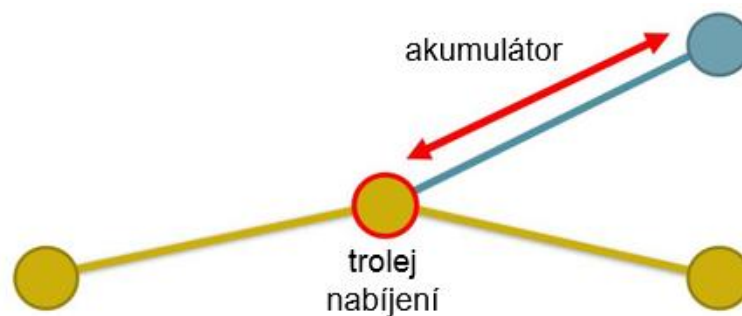
### **3.2 Možnosti nasazení jednotek BEMU**

Vozidlo s trakčním akumulátorem je uzpůsobeno jak pro jízdu na tratích s liniovou elektrizací, tak i bez liniové elektrizace. Pokud se jednotka BEMU nachází pod trakčním vedením, tak pro pohon a ostatní pomocné pohony (například vytápění/klimatizace, osvětlení, kompresory) odebírá energii ze zmíněného vedení. Zároveň umožňuje dobíjení trakčního akumulátoru. V případě, že vozidlo se pohybuje mimo liniovou elektrizaci, odebírá elektromotor a pomocné pohony energii z trakčního akumulátoru. Jednotky BEMU by měly být náhradou vozidel s pohonem na fosilní paliva, jež jsou provozovaná především na drahách regionálních.

Rozdíl mezi jednotkami EMU a BEMU je právě ve vybavení trakčním akumulátorem (úvod viz kapitola 3). Právě cena akumulátoru a potřebná technologie prodražuje jednotky BEMU oproti jednotkám EMU o 30 až 50 %. Z toho vyplývá, že před nasazením jednotek (ať už BEMU nebo EMU) je zapotřebí provést ekonomickou analýzu, spočívající v prověření těchto dvou variant. Analýza by měla porovnat nákup jednotek BEMU a jejich následný provoz s výstavbou liniové elektrizace (cena trakčního vedení je u jednokolejné trati 7 milionů Kč na kilometr), nákupem a provozem jednotek EMU. S výstavbou trakčního vedení souvisí i zajištění potřebné elektrické distribuční sítě, kde nejnákladnější stavbou jsou trakční napájecí stanice. [3]

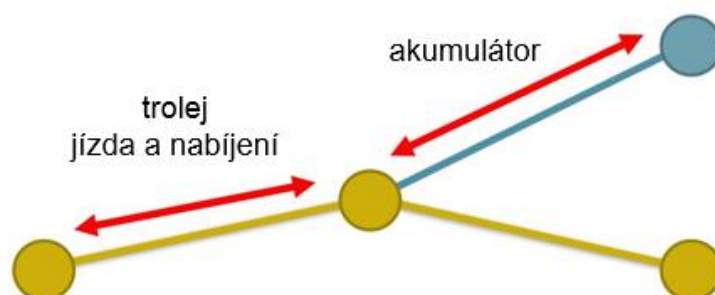
Pro provoz jednotek BEMU na železniční síti jsou zapotřebí, z hlediska možnosti nabíjení, dva předpoklady (více k nabíjení viz kapitola 3.3). První princip je založený na možnosti obnovy energie v akumulátoru (nabití baterie) pouze v jedné koncové žst. To znamená, že vozidlo odebírá energii z trakčního akumulátoru pro jízdu i pomocné pohony mezi koncovými stanicemi (tam i zpět) a zároveň pomocné pohony odebírají energii

v obrátové stanici. V následujících obrázcích (viz Obrázek 1 a Obrázek 2) je tato situace znázorněna modrou barvou. Na základě dnes vyráběných akumulátorů, garantují výrobci provoz jednotek do vzdálenosti 40 až 60 km. Tato vzdálenost se vztahuje pro jeden směr zmíněné situace (možnost nabíjení pouze v jedné koncové stanici). Interval vzdáleností pro dojezd vychází z počtu zastaveních (možnost využití rekuperace do akumulátoru viz kapitola 3.3) a následujících rozjezdů, podélného profilu tratě (stoupání a klesání) a délky pobytu v obrátové žst. Rozdíl mezi již zmíněnými následujícími obrázky (viz Obrázek 1 a Obrázek 2) spočívá v možnosti nabíjení. V prvním případě (viz Obrázek 1) se jedná o nabíjení pouze v žst., označované jako statické. Při tomto nabíjení odebírá vozidlo energii pro provoz pomocných pohonů a pro nabíjení akumulátoru z trakčního vedení. U druhého případu (viz Obrázek 2) je rozdíl v tom, že vozidlo (kromě nabíjení statického při pobytu v žst.) nabíjí akumulátor během jízdy pod trakčním vedením do následující žst. Tento princip obnovy energie je označován jako dynamický. Při dynamickém nabíjení není možné dosáhnout stejného limitního příkonu, jako při nabíjení statickém, jelikož zde dochází kromě odběru energie pro nabíjení akumulátoru a pomocné pohony také k odběru energie pro pohyb jednotky. Limitní příkon pro dynamické nabíjení je uvažován zhruba o 40 % menší než příkon pro statické nabíjení. [3]



Obrázek 1 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici

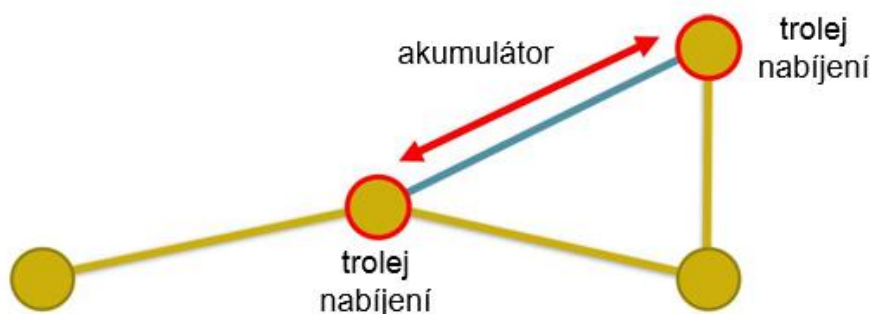
Zdroj: [4]



Obrázek 2 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici a mezistaničním úseku

Zdroj: [4]

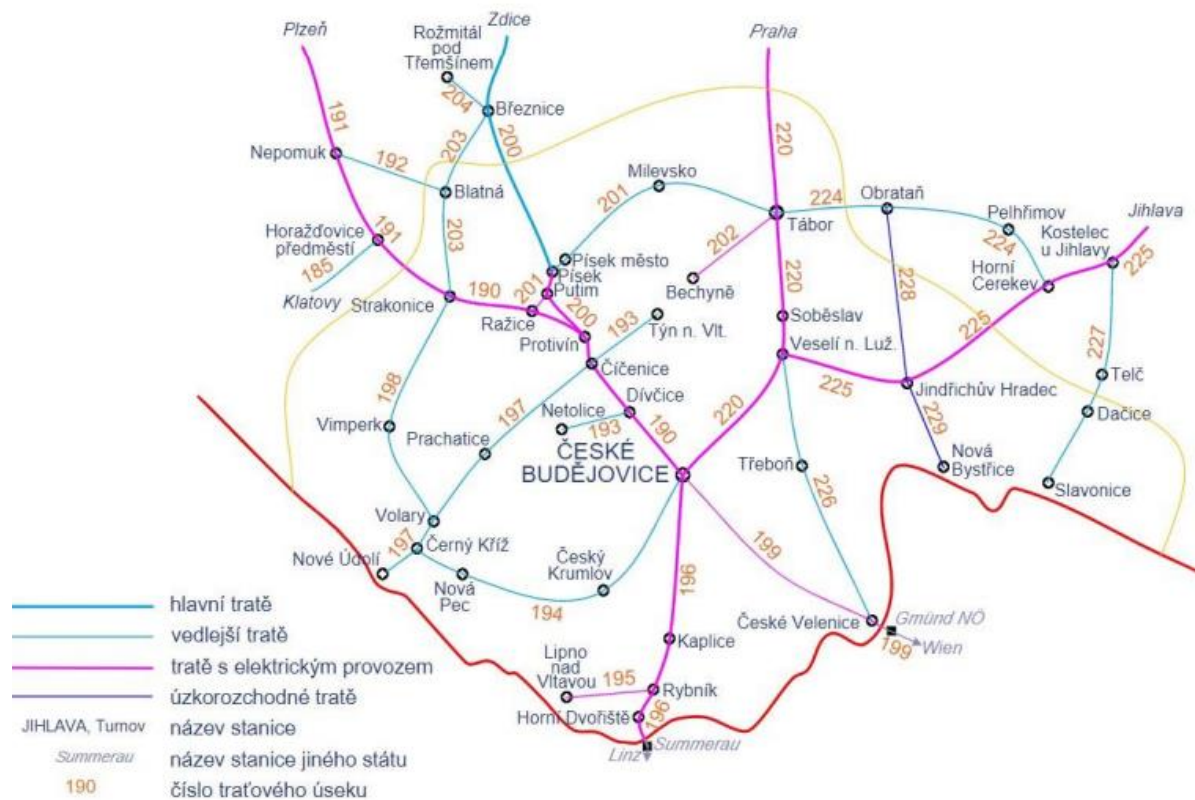
Druhý princip pro nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu spočívá v tom, že nabití akumulátoru je umožněno v obou koncových žst. (viz Obrázek 3). V tomto případě dochází k prodloužení vzdáleností mezi jednotlivými žst., kdy se jednotka pohybuje na základě energie z trakčního akumulátoru, na vzdálenost 80 až 120 km pro jeden směr. Na následujícím obrázku je pouze znázorněno nabíjení statické, tedy v žst. Je ale zároveň možné využít pro nabíjení akumulátoru trakční vedení mezi jednotlivými žst., tedy využít i nabíjení dynamické. [3]



Obrázek 3 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor/trolej s možností nabíjení v železničních stanicích

Zdroj: [4]

Cílem nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu je využít stávající železniční síť. Pro názorné vysvětlení užití principů nacházejících se na předešlých obrázcích (viz Obrázek 1, Obrázek 2 a Obrázek 3) zvolil autor na základě dříve vytvořené analýzy ([12]) Jihočeský kraj. Dle mapy (viz Obrázek 4) je patrné, že hlavní tratě v kraji jsou elektrizovány střídavou soustavou o 25 kV, 50 Hz. Tento napájecí systém je výhodný pro použití jednotek BEMU (více viz kapitola 3.4). První princip (viz Obrázek 1), kdy možnost nabíjení akumulátoru je pouze v jedné koncové stanici, znázorňuje část tratě číslo 193 (dle KJŘ 2022/2023) o délce 21 km spojující obce Číčenice a Týn nad Vltavou. Možnost obnovy energie v akumulátoru by bylo umožněno z trakčního vedení nacházejícího se v žst. Číčenice. Dle GVD 2022/2023 zde není zajišťován žádný pravidelný spoj. V Jihočeském kraji by při nasazení jednotek BEMU byl využíván především poslední princip (viz Obrázek 3) s kombinací statického a dynamického nabíjení. Jako příklad uvádí autor práce spojení mezi Táborem a Strakonice přes Písek na tratích číslo 190 a 201 (dle KJŘ 2022/2023). Jednotka by využívala energii z akumulátoru mezi žst. Tábor a Písek. Jejich vzdálenost dosahuje zhruba 60 km (vzdálenost menší než 80 km). Ze stanice Písek do stanice Strakonice (vzdálenost mezi žst. činí zhruba 22 km) by se vozidlo pohybovalo již pod trakčním vedením, a tudíž by probíhalo nabíjení dynamické. V případě, pokud by nedošlo k plné obnově energie akumulátoru mezi žst. Písek a žst. Strakonice, by mohla jednotka BEMU k úplnému nabití akumulátoru využít obrat v žst. Strakonice (nabíjení statické) anebo trakční vedení při zpáteční jízdě mezi žst. Strakonice a Písek (nabíjení dynamické). [3] [13]



Obrázek 4 - Mapa železničních tratí v Jihočeském kraji a část tratí v kraji Plzeňském, Středočeském a Vysočina

Zdroj: [12], Upravil: Autor

### 3.3 Akumulátory

Opětovný rozvoj akumulátorových jednotek přinesla výroba nových akumulátorů. Největším přínosem byla výroba lithiových akumulátorů a jejich následná aplikace do elektrických zařízení, jako jsou notebooky či mobilní telefony. V dnešní době se také vyrábějí akumulátory niklové či olovněné. Tyto dva poslední zmíněné akumulátory mají jemnou vnitřní strukturu, pro kterou je typická vyšší měrná energie, ale za cenu vyššího vnitřního elektrického odporu. [3]

Zmíněné lehké a velice spolehlivé lithiové akumulátory s vysokou měrnou energií 100 až 200 kWh/t umožnily vývoj jednotek BEMU. V rámci postupného vývoje je dnes možnost rozdělit akumulátory s vysokou měrnou energií (kWh/t) anebo s vysokým měrným výkonem (kW/t) na základě použitých materiálů pro jejich výrobu. Železniční vozidla, oproti vozidlům silničním, kladou vysoké nároky na akumulátory. Především se jedná o vysoký výkon pro rychlé nabití (krátký pobyt v žst.), vysokou účinnost a dlouhou životnost (kolejová vozidla jsou konstruována pro životnost 30 až 40 let). Pro tyto požadavky je vhodné využít robustní lithiové akumulátory LTO (lithium-titanové) typu HP (High Power). Vyznačují se hrubší vnitřní strukturou a nízkým vnitřním odporem. Tyto akumulátory umožňují vysoké nabíjecí a vybíjecí výkony, životnost v několika desítkách tisíc cyklů, nízký vnitřní odpor a dlouhý pracovní čas

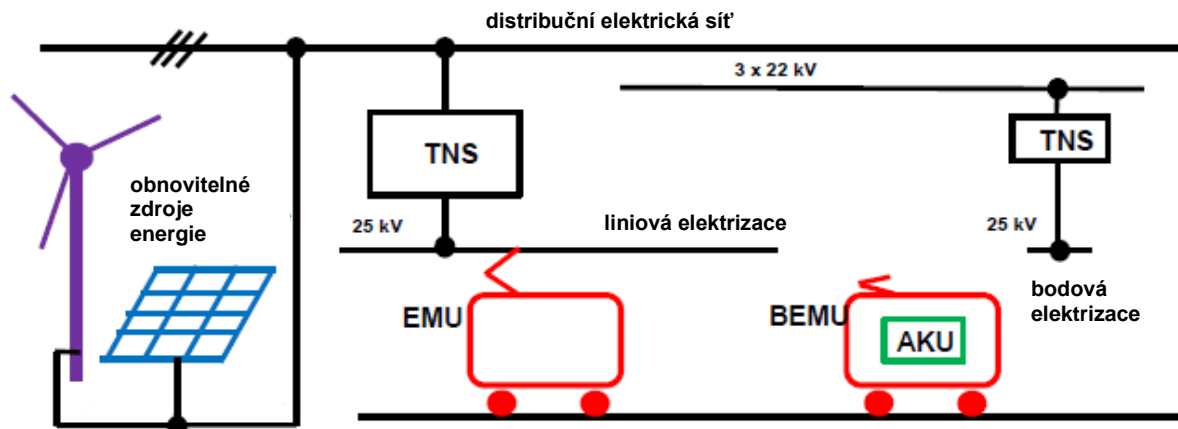
bez zahřívání. Nevýhodou je pak nižší měrná energie okolo 100 kWh/t. Na rozdíl od dálkových vlaků, regionální vlaky, kde by měly být nasazovány především jednotky BEMU, zajišťují plošnou obsluhu území, a tedy je i odlišný způsob jízdy. Vlaky regionální často brzdí a zastavují v zastávkách či žst. Z toho vyplývá, že dochází ke ztrátě kinetické energie, a tedy k vyšší spotřebě energie při rozjíždění. Proto dnes jednotky využívají rekuperační brzdění (výroba elektrické energie zpět do akumulátoru), což prodlužuje dojezd jednotek. Železniční vozidla s výkonnou rekuperační brzdou jsou méně citlivá na četnost zastavení, než vozidla využívající ztrátové třecí či elektrodynamické odporové brzdění. Životnost (pokles pod 80 % kapacity) akumulátoru je uváděna mezi 8 až 15 lety provozu jednotek, což je zhruba polovina životnosti jednotky. V rámci jednotek BEMU je tedy uvažováno, že jednou za dobu jejich životnosti bude muset dojít k obměně akumulátorů. Zároveň je zapotřebí při dimenzování brát v potaz, že jednotky budou provozovány za jakýchkoliv povětrnostních podmínek. Je tedy nutné uvažovat, že kapacita akumulátoru nesmí klesnout pod 20 % své kapacity. Pro názornost autor uvádí, že akumulátor s jmenovitou energií 1000 kWh lze využít pouze ze 60 %, tedy přibližně 600 kWh kapacity akumulátoru. Výhodou jednotek BEMU je ta, že po uplynutí životnosti akumulátorů je možnost jej úplně odebrat a provozovat jednotku jako EMU. [3] [14]

### **3.4 Zdroj získávání energie**

V kapitole zabývající se možnostmi nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu (viz kapitola 3.2) jsou uvedeny dva principy nabíjení trakčního akumulátoru. První princip, kdy se vozidlo nepohybuje, je nazýván statickým. Obnova energie v trakčním akumulátoru probíhá během pobytu v žst., kdy dochází k odběru energie pro nabíjení a pro provoz pomocných pohonů. Vozidlo odebírá energii z trakčního vedení elektrizované stanice anebo z vybudované bodové elektrizace v obrátové žst. (viz Obrázek 5). Pro vybudování krátkého slepého trolejového trakčního vedení (v případě, že žst. nedisponuje trakčním vedením) lze využít běžnou distribuční síť 3 x 22 kV. Potřebný výkon není ale veliký, pouze zhruba 500 až 1000 kW. Slepé trakční vedení je připojeno k malé jednoduché trakční napájecí stanici 3 AC 22 kV / 1 AC 25 kV. Samotné trakční vedení pro napájení může být z mechanického hlediska velice jednoduché. Postačí samotný trolejový drát bez nosného lana umístěný v ose koleje nad místem pravidelného pobytu nebo odstavení vozidel. [1]

Druhá možnost nabíjení je pak nazývaná dynamická neboli nabíjení probíhá za jízdy. To znamená, že vozidlo se pohybuje po síti mezi jednotlivými žst. s trakčním vedením. Vozidlo tak odebírá energii jak pro pohyb vozidla, tak pro nabíjení a pomocné pohony. Oproti nabíjení statickému je u dynamického snížen limitní příkon pro nabíjení akumulátoru, a to z důvodu odebírání energie pro pohyb vozidla. [1]





Obrázek 5 - Grafické znázornění možnosti nabíjení trakčního akumulátoru

Zdroj: [1]

Pro nabíjení je vhodnější střídavý napájecí systém 25 kV, 50 Hz. To je již patrné z dosazení do následujícího vzorce:

- pro stejnosměrný napájecí systém 3 kV

$$P = U \cdot I = 3 \cdot 200 = 600$$

- pro střídavý napájecí systém 25 kV, 50 Hz

$$P = U \cdot I = 25 \cdot 80 = 2\,000$$

kde:

$P$ [kW]	příkon
$U$ [kV]	elektrické napětí
$I$ [A]	elektrický proud

Z dosazení vyplývá, že střídavý napájecí systém umožňuje oproti stejnosměrnému napájecímu systému rychlejší nabíjení. Ve vzorcích se ale liší hodnoty proudu. Hodnota 200 A u stejnosměrného napájecího systému je stanovena na základě TSI. Velké proudy zároveň způsobují to, že sběrače stejnosměrných vozidel musí být silnější (schopnost odolávat velkým proudům) oproti sběračům pro střídavý napájecí systém. Zároveň u posledního zmíněného systému jsou menší proudy (nejsou stanoveny žádnými předpisy ani normami) vzhledem k vyššímu napětí. Z tohoto důvodu je pro příkon 2 000 kW dostačující proud pouze 80 A.

Další nevýhodou systému 3 kV je výše napětí stejnosměrného proudu. Akumulátorové baterie nejsou řešeny pro napětí 3 kV, ale pouze do 1 kV. V případě potřeby nabíjení ze systému 3 kV nastává ve vozidle nutnost oddělit obvody a vložit další komponenty snižující limit hmotnosti a objem akumulátoru. Na základě těchto požadavků dochází ke snížení energie akumulátoru a následně i dojezdu vozidla. [1]

Samostatnou kapitolou je přenocování jednotek BEMU v koncových (obratových) stanicích na vedlejších tratích. Během denních pravidelných jízd pokrývá spotřebu energie akumulátoru pohyb mezi jednotlivými žst. a spotřebu pomocných pohonů v řádu desítek minut v obrátové stanici trakční akumulátor. V případě přenocování mezi posledním večerním a prvním ranním spojem (například až 12 hod.) by zejména v zimním období mohlo docházet k velké spotřebě energie pro temperaci (při odstavu nedochází k vytápění až na provozní teplotu s cestujícími, ale požadovanou teplotu nutnou pro nepoškození systémů) a tudíž by pak akumulátor neměl požadovanou energii pro jízdu zpět. Z tohoto důvodu dochází v koncových stanicích k vybudování pomocných napájecích bodů. Jejich cílem není nabíjení trakčních akumulátorů, ale zajistit potřebnou energii pro pomocné pohony během nočního odstavu a zamezit odběr energie z trakčního akumulátoru. To je umožněno přes sběrač proudu a trakční vedení 25 kV 50 Hz z napájecího bodu o nízkém výkonu, anebo přes kabelový přívod ze zásuvky 3 x 400 V, 50 Hz. [1]

### **3.5 Přehled současných jednotek BEMU a jejich provoz**

Jednou z prvních jednotek (třívozová) s trakčním akumulátorem je Siemens Desiro ML ÖBB Cityjet eco. Vzhledově se jedná o jednotku ÖBB Cityjet, která navíc disponuje akumulátory. Přehled jednotlivých dohledatelných parametrů je uveden v následující tabulce (viz Tabulka 2). Cílem prototypu bylo ověření změny vlastností během ročních období. V jednotce jsou uloženy tři akumulátorové zásobníky, polovodičové měniče, chladiče akumulátorů a další potřebná zařízení. Pro zásobu energie jsou využity vysoce odolné lithiové akumulátory LTO (viz kapitola 3.3). Vozidlo je vhodné pro regionální tratě bez trakčního vedení v délce 40 km (pro jeden směr), pokud se v cílové obrátové žst. nenachází možnost obnovy energie (nabíjení) trakčního akumulátoru. V případě nabíjecí stanice v obrátové žst. se dojezdová vzdálenost v jednom směru prodlužuje až na 80 km. Možnost rychlého nabití z trakčního vedení trvá 15 až 20 min. Testování vozidel proběhlo v roce 2019 v oblasti Dolního Rakouska. Testy se uskutečnily jízdou na trase z Herzogenburgu pomocí bateriového napájení do 22 km vzdálené Kremže. Zde vlak pokračoval 10 kilometrů pod trakčním vedením do uzlové stanice Hadersdorf am Kampf. Následně souprava pokračovala na 40 km dlouhé trati do Sigmundsherbergu. Během testu musel vlak překonat převýšení 300 m. Po následném testu společnost ÖBB využila opci pro jedenáct těchto jednotek. V roce 2021 převzaly ÖBB poslední z 200 jednotek ÖBB Cityjet. Z uvedeného počtu je 35 jednotek připraveno pro osazení trakčními akumulátory. V provozu je ale pouze první testovací jednotka. [3] [15]

Mezi další výrobky společnosti Siemens patří dvoučlánková jednotka BEMU Siemens Mireo Plus B s dojezdem 80 až 120 km (viz Tabulka 2) v jednom směru při možnosti nabíjení v cílové obrátové stanici. Tyto soupravy byly zakoupeny spolkovou zemí Bádensko-Württembersko v počtu 24 ks. S jejich provozem se počítá nejprve v prosinci roku 2023. Dalším objednatelem

těchto jednotek je soukromý dopravce Niederbarnimer Eisenbahn (NEB). Celkem bude dodáno 31 jednotek, které budou zajišťovat provoz v okolí Berlína a v Braniborsku. Akumulátory v jednotkách se budou dobíjet při jízdě pod trolejemi a pomocí rekuperačního brzdění. Požadovaný dojezd má být 90 km. Na třech místech mají vzniknout také dobíjecí stanice, konkrétně půjde o města Wriezen, Templin a Beeskow. Jednotky mají být nasazeny do pravidelného provozu koncem roku 2024. [3] [16]

Na trhu s jednotkami BEMU se objevuje i domácí výrobce Škoda Group. Prototyp s trakčním akumulátorem by měl vycházet z jednotek EMU řady 650 Regiopanter. Předběžné technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 2). V říjnu roku 2022 oznámila společnost dokončení vývoje jednotky BEMU. Její první nasazení by mělo být v Moravskoslezském kraji (obsluha linky Ostrava – Studénka – Štramberk). Společnost Škoda předvedla svůj vývoj na železničním veletrhu Innotrans v Berlíně, zatím pouze na videu. Vývoj patentu je dokončen z 90 %. Plánovaný dojezd na jedno nabití trakčního akumulátoru je okolo 80 km s rychlostí 120 km/h. [3] [17]

Dalším výrobcem je společnost Stadler, která představila dvě jednotky BEMU. Konkrétně se jedná o tříčlankovou jednotku Stadler FLIRT AKKU BR 427 (více viz Tabulka 2) vycházející z modelu FLIRT EMU a druhou dvoučlankovou jednotku Stadler WINK BMU. Výrobce garantuje u obou jednotek dojezd 80 až 150 km. První zmíněná jednotka je předurčena pro napájecí systém 15 kV, 16,7 Hz. Při testovacích jízdách ujela na akumulátor jednotka FLIRT AKKU až 185 km. Německý dopravce DB Regio objednal v roce 2022 od společnosti Stadler Rail celkem 14 jednotek FLIRT AKKU. Jejich provoz má být zahájen do konce roku 2026 ve spolkové zemi Meklenbursko–Přední Pomořansko. [3] [18] [19] [20] [21]

Společnost Alstom připravila pro celý evropský trh ucelenou tříčlankovou jednotku Alstom Coradia Continental BEMU s umístěním akumulátorů na střeše soupravy. Vozidlo by mělo dosahovat rychlosti pod trolejí až 160 km/h a mělo by disponovat 150 místy k sezení. Prvních 11 kusů objednal dopravní spolek VMS (Verkehrsverbund Mittelsachsen) pro provoz na trati z Lipska do Saské Kamenice (Chemnitz). Pravidelný provoz jednotek by měl začít nejdéle v roce 2023. [3] [21] [22] [23] [24]

V roce 2019 probíhaly zkušební jízdy prototypu Bombardier Talent 3 BEMU z dílny kanadského výrobce Bombardier. Testovací jízdy proběhly na tratích ve spolkové zemi Bádensko – Württembersko. Výrobce se zavazuje k dojezdu 40 až 100 km při nabíjení ze střídavého napětí 15 kV, 16,7 Hz. [3] [21]

Španělský výrobce CAF dodá španělským státním drahám Renfe 17 třívozových jednotek s akumulátorem. Smlouva však počítá s opcí na dalších 42 jednotek. V provozu pod trakčním vedením mají jednotky dosahovat rychlosti až 200 km/h. Na základě smlouvy vzešlé

z výběrového řízení mají jednotky umožnit provoz na tratích s napájecími systémy 3 kV stejnosměrný proud a 25 kV 50 Hz střídavý proud. Zároveň zmíněný výrobce dodá celkem 63 jednotek BEMU pro projekt VRR Niederrhein-Münsterland v německém regionu Severní Porýní-Vestfálsko. Celkem se má jednat o 48 třívozových a 15 dvouvozových jednotek vycházející z EMU jednotky CAF Civity. Jednotka BEMU má disponovat 120 místy k sezení u jednotek dvoučlankových a 160 místy u jednotek tříčlankových. Maximální rychlost jednotek má být 140 km/h. Předpokládané nasazení jednotek do pravidelného provozu je mezi lety 2025 až 2028. V následující tabulce (viz Tabulka 2) jsou uvedeny parametry pro jednotky, které mají být provozované v německém regionu Severní Porýní-Vestfálsko. [25] [26] [27]

Následující tabulka (viz Tabulka 2) shrnuje parametry uvedených jednotek v předchozích odstavcích. V případě, že data nebyla k jednotkám BEMU dohledatelná, je toto pole označeno symbolem „?“.

Tabulka 2 - Přehled parametrů uvedených jednotek BEMU

Parametr	Hodnota parametru						
Výrobce	Siemens	Siemens	Škoda Group	Stadler	Alstom	Bombardier	CAF
Obchodní název jednotky (typ)	Siemens Desiro ML ÖBB Cityjet eco	Siemens Mireo Plus B	Škoda Regiopanter – BEMU prototyp	Stadler FLIRT AKKU BR 427	Alstom Coradia Continental BEMU	Bombardier Talent 3 BEMU	CAF Civity BEMU
Uspořádání náprav	Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'	Bo'2'Bo'	Bo'2'+2'Bo'	Bo'+2'+2'+Bo'	?	?	Bo'-2'-Bo' (dvoučlánková) / Bo'2'-2'Bo' (tříčlánková)
Rozchod	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm
Max. rychlost (trolej/akumulátor)	140 km/h / 120 km/h	160 km/h / 140 km/h	120 km/h / 120 km/h	160 km/h / 140 km/h	160 km/h / 160 km/h	140 km/h / 140 km/h	140 km/h / 140 km/h
Elektrické napájení	15 kV 16,7 Hz AC / 25 kV 50 Hz AC	15 kV 16,7 Hz AC	3 kV DC/ 25 kV 50 Hz AC	15 kV 16,7 Hz AC	15 kV 16,7 Hz AC	15 kV 16,7 Hz AC	15 kV 16,7 Hz AC
Výkon	do 2600 kW	1700 kW	? kW	do 1700 kW	? kW	? kW	? kW
Kapacita akumulátoru (umístění v jednotce)	528 kWh (LTO)	700 kWh (umístění pod podlahou)	? kWh (umístění na střeše vozidla)	? kWh (umístění na střeše a pod podlahou vozidla)	? kWh	440 kWh	? kWh
Rozjezdové zrychlení	1,0 m/s <sup>2</sup> / 0,77 m/s <sup>2</sup> (akumulátor)	do 1,1 m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>

Parametr	Hodnota parametru						
Obchodní název jednotky (typ)	Siemens Desiro ML ÖBB Cityjet eco	Siemens Mireo Plus B	Škoda Regiopanter – BEMU prototyp	Stadler FLIRT AKKU BR 427	Alstom Coradia Continental BEMU	Bombardier Talent 3 BEMU	CAF Civity BEMU
Předpokládaný dojezd na akumulátor	80–120 km	80–120 km	80–100 km	80–150 km	120 km	40–100 km	? km
Délka přes nárazníky	75,152 m	46,560 m	52,900 m	58,600 m	56,000 m	? m	44,900 m (dvoučlánková) / 55,080 m (tříčlánková)
Výška nástupní hrany	600 mm	610 mm	550 mm	600 mm	? mm	? mm	? mm
Obsaditelnost	244 míst	120 míst	140 míst	120–180 míst	150 míst	169 míst	120 míst (dvoučlánková) / 160 míst (tříčlánková)
Zátěž na nápravu	< 17 t (včetně akumulátorů)	< 20 t	? t	? t	? t	? t	? t
Začátek provozu	2019 (1 ks testovací provoz v Dolní Rakousko)	Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg (SFBW) objednávka na 20 ks s provozem od prosince 2023	2022 – představení patentu	Od roku 2026 ve spolkové zemi Meklenbursko–Přední Pomořansko	Na konci roku 2023 na trati z Lipska do Saské Kamenice (Chemnitz)	2019 1 ks testovací provoz	V německém regionu Severní Porýní-Vestfálsko mezi lety 2025 až 2028

Zdroj: [3] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27]

Na základě tabulky (viz Tabulka 2) je možné porovnat jednotky BEMU, které mají být nasazeny do pravidelného provozu. Mezi hlavní parametry pro porovnání patří cestovní rychlost, kapacita trakčního akumulátoru a s tím související předpokládaný dojezd (při odběru energie z trakčního akumulátoru) a elektrické napájení (možnost nabíjení akumulátoru). V případě cestovní rychlosti dochází k rozlišení, zda se BEMU jednotka pohybuje pod liniovou elektrizací (rychlost 140 až 160 km/h) nebo v místě bez elektrizace (rychlost 120 až 160 km/h). Pro porovnání jsou tyto rychlosti dostačující pro provoz na regionálních tratích na území České republiky. Jak již bylo zmíněno, dalším parametrem je předpokládaný dojezd při odběru energie z trakčního akumulátoru. Hodnoty se pohybují v intervalu 40 až 150 km. Nejčastějším intervalem dojezdu je ale 80 až 120 km (pro jeden směr s možností obnovy elektrické energie v trakčním akumulátoru v obrátových stanicích). Posledním zmíněným parametrem jsou možnosti napájecích systémů využívaných pro nabíjení akumulátorů. Vzhledem k tomu, že většina jednotek BEMU se plánuje nasazovat v zemích, kde je napájecí systém 15 kV 16,7 Hz střídavého proudu, disponují tyto jednotky zařízením pro nabíjení právě ze zmíněného systému. Jednotky lze ale uzpůsobit pro potřebné napájecí systémy. Například prototyp Škoda Regiopanter – BEMU by měl být uzpůsobený pro nejvíce rozšířené napájecí systémy na území České republiky (více viz kapitola 2.2 a Tabulka 2). Obsaditelnost závisí na počtu článků jednotky. Dle výrobců není překážkou prodloužit jednotku, a tudíž zvýšit kapacitu jednotky přidáním dalšího článku.

## **4 SESTAVENÍ ZÁKLADNÍHO MODELU NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ AKUMULÁTORU JEDNOTEK BEMU**

Při návrhu dopravní obslužnosti určitého území pomocí železniční dopravy je v dnešní době možné (v některých případech) uvažovat o nasazení jednotek BEMU. Je ale zapotřebí brát v potaz parametry, které nasazení jednotek do pravidelného provozu omezují. Nejdůležitějším z nich je předpokládaný dojezd na nabitý akumulátor. Výrobci některých uvedených jednotek v této práci (příklady viz Tabulka 2) garantují ve většině případech dojezd okolo 80 až 120 km pro jeden směr za předpokladu možnosti nabíjení na obou koncích úseku bez liniové elektrizace.

Prověření nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu probíhá ve dvou krocích. Prvním z nich je vytipování tratě, na které by mohlo dojít k využití výhod zmíněných vozidel (viz kapitola 3). Jedná se o určení délky tratě bez liniové elektrizace (viz dojezd v předchozím odstavci) a možnosti nabíjení jednotky. V případě, že vytipovaná trať odpovídá možnostem nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu, dochází ke druhému prověření. To již probíhá na základě výpočtů spotřeby energie a dalších hodnot. V dnešní době probíhají výpočty a následné modely pomocí počítačových programů. Kromě simulace pravidelného provozu jsou prověřeny například vlivy zpoždění vzniklé křížováním nebo nepravidelnostmi (například uváznutí jednotky vlivem nepříznivých povětrnostních podmínek). Tyto nepravidelnosti je zapotřebí ověřit, a to za účelem, zda jednotka bude mít například při zpoždění křížování (vozidlo se v žst. nepohybuje, ale odebírá energii pro pomocné pohony viz kapitola 3.2) dostatečné množství energie pro jízdu do cílové stanice, jelikož akumulátor bude mít méně energie. Vystává tedy další otázka, zda bude pro nabíjení dostačující pravidelná doba pobytu v žst. nebo bude muset dojít k jejímu prodloužení. Z dopravního hlediska je důležité si uvědomovat možnost vzniku těchto situací, než dojde k nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu.

Cílem této práce (viz kapitola 1) bylo vytvořit model, který by umožňoval prověřit nasazení jednotek BEMU v pravidelném provozu. Na základě tohoto zadání byl v prostředí Microsoft Excel vytvořen soubor (dále jen „model“), který umožňuje modelovat kromě pravidelného provozu i nepravidelná zpoždění nebo vznik nepravidelností (viz předchozí odstavec). Jedná se o zjednodušenou aplikaci, jejíž principy výpočtů jsou založeny na takzvané dvousložkové metodě. Tato metoda a výpočty jednotlivých veličin jsou uvedeny v následujících odstavcích.



## 4.1 Dvousložková metoda

Princip modelu je založen na již zmíněné takzvané dvousložkové metodě (viz poslední odstavec kapitoly 4). Ta je definována následujícím vztahem:

$$E_{celkem\ akum} = E_L + E_T$$

kde:

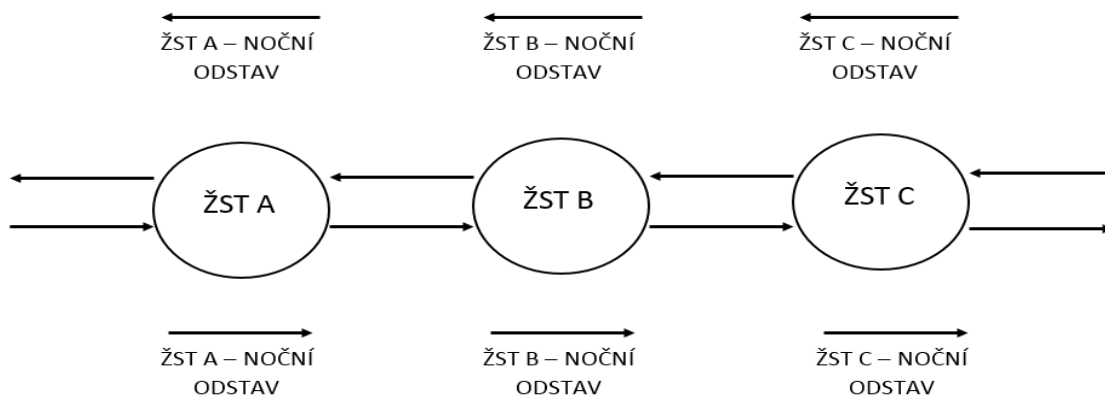
$E_{celkem\ akum} [kWh]$	celková spotřeba energie z akumulátoru
$E_L [kWh]$	spotřeba energie trakce z akumulátoru
$E_T [kWh]$	spotřeba energie vedlejších pohonů z akumulátoru

Z definovaného vztahu vyplývá, že celková spotřeba energie z trakčního akumulátoru je rovna součtu spotřeby energie pro trakci a energie pro vedlejší pohony, tedy pro dvě složky. První složka („spotřeba energie trakce z akumulátoru“) je definována jako energie spotřebována pro jízdu BEMU jednotky v rámci stanoveného úseku. Druhá složka („spotřeba energie vedlejších pohonů z akumulátoru“) je definována jako energie potřebná pro pomocné pohony, kterými jsou například vytápění/klimatizace, osvětlení nebo kompresory. Stanovení výpočtu jednotlivých složek je v rámci kapitoly 4.2.

## 4.2 Model

Jak již bylo zmíněno, model byl vytvořen v prostředí Microsoft Excel, kde se rozprostírá na třech listech. Na prvním listě nazvaném „Zadání“ se nachází tabulka, ve které jsou popsány konkrétní veličiny využitě pro jednotlivé výpočty a zároveň jsou zde uvedeny jejich definiční vztahy (v případě, že je možné danou veličinu definovat). Na druhém listě, nazvaném „Vzorový list“, je uživateli umožněno modelovat jednotlivé výstupy na základě počátečních podmínek. Tento list je vytvořen pro jeden oběh drážního vozidla. Třetí list s názvem „Vzorový list – oběhy“ se téměř shoduje s listem druhým. Rozdíl spočívá v počtu oběhů, kterých je na třetím listě pět a navzájem na sebe navazují. Tento počet není konečný, jelikož model umožňuje rozšíření počtu oběhů.

Model byl zhotoven pro fiktivní železniční trať. Ta je znázorněna na následujícím obrázku (viz Obrázek 6). Jsou zde vytvořeny celkem tři žst., které jsou označeny písmeny A, B a C. Mezi jednotlivými žst. se nacházejí mezistaniční úseky. Dále ze žst. A a C pokračuje širá trať. To umožňuje rozšíření modelu o další navazující žst. Verze modelu, vytvořená pro tuto práci, využívá širé tratě, avšak není brána v potaz obrátová žst. nacházející se na jejich koncích. Z toho vyplývá, že v případě, když se drážní vozidlo dostane na konec širé trati (například od žst. C), výsledné hodnoty se rovnají začátku širé trati v opačném směru (do žst. C).



Obrázek 6 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro model

Zdroj: Autor

Fiktivní trať je pro výpočty spotřeby energie a dalších veličin rozdělena na jednotlivé úseky, které jsou dle schématu (viz Obrázek 6) následující:

- ŠR – Úsek A (širá trať – žst. A)
- Úsek A (žst. A)
- Úsek A – B (žst. A – žst. B)
- Úsek B (žst. B)
- Úsek B – C (žst. B – žst. C)
- Úsek C (žst. C)
- Úsek C – ŠR (žst. C – širá trať)
- Úsek ŠR – C (širá trať – žst. C)
- Úsek C (žst. C)
- Úsek C – B (žst. C – žst. B)
- Úsek B (žst. B)
- Úsek B – A (žst. B – žst. A)
- Úsek A (žst. A)
- Úsek A – ŠR (žst. A – širá trať)

Rozdělení fiktivní tratě na jednotlivé úseky je shodné pro oba směry (názvy totožné s modelem, viz Obrázek 7). Na schématu jsou tyto směry znázorněny pomocí šipek (viz Obrázek 6). Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, výpočty spotřeby energie a hodnoty související s možnostmi nabíjení trakčního akumulátoru zpracovává model pro každý úsek zvlášť. Na závěr modelu je uvedena tabulka, která shrnuje výsledky pro jednotlivé veličiny. Příklad tabulky s výslednými hodnotami pro žst. A („Úsek A“) je znázorněn na následujícím obrázku (viz Obrázek 7).

S oběhy vozidel souvisí jedna podmínka, která určuje, že vozidlo musí být výchozí ze žst. A (nebo do této žst. může přijet po širé trati) a musí se vrátit nazpět do žst. A, odkud může pokračovat dále v jízdě po širé trati. Ostatní počáteční podmínky (například zvolení žst. B za obratovou) závisí na uvážení uživatele a zadání.

Model zahrnuje spotřebu energie během nočního odstavu do celkové spotřeby. Při odstavu, oproti běžnému pobytu v žst., je spotřeba energie nižší, jelikož dochází k omezení pomocných pohonů (snížení teploty pro vytápění/klimatizaci, vypnutí osvětlení, vypnutí kompresorů a další).

Úsek A			
Základní parametry pro úsek			
Pobyt v ŽST	-	1	0; 1
Trakční vedení	-	1	0; 1
Noční pobyt v ŽST	-	0	0; 1
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	E <sub>poč - A</sub>	350,00	kWh
Ujetá vzdálenost	L <sub>A</sub>	0,00	km
Doba pobytu	T <sub>pobyt - A</sub>	0:05	hh:mm
Doba po příjezdu do ŽST a příkon vedlejší spotřeby	T <sub>pobyt v noci příjezd - A</sub>	0:00	hh:mm
Doba před odjezdem ze ŽST a příkon vedlejší spotřeby	T <sub>pobyt v noci odjezd - A</sub>	0:00	hh:mm
Úseková rychlost	V <sub>úsek - A</sub>	0,00	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	E <sub>L - A</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	E <sub>T - A</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie cekem z akumulátoru	E <sub>celkem aku - A</sub>	0,00	kWh
Stav akumulátoru bez obnovy energie	E <sub>bez obnovy - A</sub>	350,00	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	E <sub>potř obnovy - A</sub>	0,00	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie			
Možnost obnovit energii akumulátoru	E <sub>mož obnovy - A (η)</sub>	66,67	kWh
Potřebná obnova energie akumulátoru	E <sub>obnova skutečná - A (η)</sub>	0,00	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	E <sub>konec stav aku - A (η)</sub>	350,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	E <sub>pro nabíjení aku z trakčního vedení - A (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	E <sub>pro jízdu pod trakčním vedením - A (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	E <sub>pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení - A (η)</sub>	3,33	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	E <sub>celkem z trakčního vedení - A (η)</sub>	3,33	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie - rozložení nabíjení			
Čas možnosti nabíjení v ŽST	T <sub>pobyt - A</sub>	0:05	hh:mm
Čas možnosti nabíjení v následném mezistaničním úseku	T <sub>ces.dob. - A/B</sub>	0:00	hh:mm
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	E <sub>poč - A</sub>	350,00	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	E <sub>potř obnovy - A (η)</sub>	0,00	kWh
Možnost obnovit energii akumulátoru v ŽST a na následujícím mezistaničním úseku	E <sub>mož obnovy - A + A/B (η)</sub>	66,67	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST a mezistaničním úseku	E <sub>nabíjení - A + A/B (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST (s rezervou 50%)	E <sub>nabíjení (+50%) - A (η)</sub>	0,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	E <sub>celkem z trakčního vedení - A (η)</sub>	3,33	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	E <sub>konec stav aku (nabíjení A+A/B) - A (η)</sub>	350,00	kWh

Obrázek 7 - Vzorový obrázek modelu se spočítanými hodnotami pro Úsek A (Žst. A)

Zdroj: Autor

#### 4.2.1 Počáteční podmínky – infrastruktura, jízdní doby a doby pobytu

Cílem autora této práce bylo vytvořit model, který bude co nejvíce variabilní. To umožňuje uživateli zvolit velké množství počátečních podmínek v různých kombinacích. Pro lepší zorientování v prostředí modelu je na začátku každého listu úvodní tabulka, kde jsou vysvětleny potřebné informace (například hodnoty, které je zapotřebí zadat a které jsou již vypočteny na základě určitých vztahů).

##### 4.2.1.1 Trakční vedení

První počáteční podmínkou je nastavení trakčního vedení pro jednotlivé úseky, které jsou znázorněné na následujícím obrázku (viz Obrázek 8). Pro nastavení přítomnosti trakčního vedení se užívá hodnot „0“ a „1“. V případě, že se v daném úseku trakční vedení nachází nastaví uživatel hodnotu „1“, v opačném případě dojde k nastavení hodnoty „0“. Model dovoluje nastavit i nabíjecí stanici v určité žst. Toho uživatel docílí tak, že v konkrétní stanici nastaví hodnotu „1“ a v mezistaničních úsecích nastaví hodnotu „0“. Názorně je toto zobrazeno na následujícím obrázku (viz Obrázek 8), kdy se trakční vedení nachází na širých tratích a v žst. A a C. Žst. B disponuje pouze vybudovanou nabíjecí stanicí (možnost snížení příkonu viz kapitola 4.2.1.3).

Trakční vedení		
Trakční vedení ze širé trati do ŽST A	1	0; 1
Trakční vedení v ŽST A	1	0; 1
Trakční vedení mezi ŽST A-B	0	0; 1
Trakční vedení v ŽST B	1	0; 1
Trakční vedení mezi ŽST B-C	0	0; 1
Trakční vedení v ŽST C	1	0; 1
Trakční vedení ze ŽST C na širou trať	1	0; 1

Obrázek 8 - Tabulka z modelu pro nastavení přítomnosti trakčního vedení

Zdroj: Autor

##### 4.2.1.2 Odstavení vozidel v nočních hodinách

Mezi další možnosti nastavení je odstav jednotek BEMU v nočních hodinách (již zmíněno viz kapitola 4.2). Model poskytuje možnost odstavení drážních vozidel v každé žst., a to i pro směr do žst. C (ve směru ze žst. A) a do žst. A (ve směru ze žst. C). V případě, že vozidlo končí svou jízdu například v žst. B (nepokračuje dále směrem do žst. C) a zároveň zde bude probíhat noční odstav, je zapotřebí nastavit noční odstav v obou směrech (ve směru ze žst. A i ve směru ze žst. C). Pro přehlednost je daná situace znázorněna na následujícím obrázku (viz Obrázek 9). Nastavení nočního pobytu v žst. je umožněno stejně jako v předchozím případě, pomocí hodnot „0“ (nebude probíhat noční odstav) a „1“ (bude probíhat noční odstav vozidla). Dále uživatel nastaví po jak dlouhý časový úsek bude vozidlo odebírat energii pro pomocné pohony (aktivní stav), než přejde k úspornému režimu (snížení teploty

u vytápění/klimatizace, vypnutí osvětlení, kompresorů a dalších pohonů). Druhý čas, který je potřebný nastavit, je po jak dlouhou dobu bude uváděna jednotka z úsporného stavu do stavu aktivního (jak dlouho bude vytápěna/klimatizována jednotka na požadovanou provozní teplotu a další). Pro názornost jsou obě hodnoty na následujícím obrázku (viz Obrázek 9) nastaveny na 5 min. Doba odstavení se následně nastaví jako doba pobytu v žst.

Odstavení vozidel v nočních hodinách		
Přenocování v ŽST A (ve směru ze ŽST A)	0	0; 1
Přenocování v ŽST B (ve směru ze ŽST A)	1	0; 1
Přenocování v ŽST C (ve směru ze ŽST A)	0	0; 1
Přenocování v ŽST A (ve směru ze ŽST C)	0	0; 1
Přenocování v ŽST B (ve směru ze ŽST C)	1	0; 1
Přenocování v ŽST C (ve směru ze ŽST C)	0	0; 1
Doba udržování aktivního stavu vozidla po příjezdu do ŽST	0:05	hh:mm
Doba udržování aktivního stavu vozidla před odjezdem ze ŽST	0:05	hh:mm

Obrázek 9 - Tabulka z modelu pro nastavení odstavení vozidel v nočních hodinách

Zdroj: Autor

#### 4.2.1.3 Limitní příkony pro nabíjení akumulátoru

Uživatel dále může nastavit limitní příkony pro nabíjení trakčního akumulátoru. Jedná se tedy o příkon, kterým je možný akumulátor nabíjet. Možnost nastavení hodnot je pro jednotlivé žst. a zároveň pro mezistaniční úseky (včetně širých tratí). Z tabulky na následujícím obrázku (viz Obrázek 10) je patrné, že příkon za jízdy (tedy na mezistaničních úsecích nebo na širých tratích) je nižší než v jednotlivých žst. To je způsobené tím, že při pobytu jednotky BEMU v žst. s trakčním vedením odebírá jednotka energii pro nabíjení akumulátoru a energii pro pomocné pohony. V případě jízdy pod trakčním vedením mezi jednotlivými žst. dochází k odběru energie pro pomocné pohony a pohon samostatné jednotky. Z tohoto důvodu již není možné zajistit tak velký příkon pro nabíjení akumulátoru. Dále je zapotřebí uvést, že v případě, pokud uživatel modelu nastaví úsek bez trakčního vedení, nebude model s limitním příkonem počítat, tudíž uživatel nemusí nastavit nulovou hodnotu.

Limitní možné příkony pro nabíjení akumulátoru		
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST A	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST B	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST C	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie za jízdy	600,00	kW

Obrázek 10 - Tabulka z modelu pro nastavení limitního příkonu pro nabíjení akumulátoru

Zdroj: Autor

#### 4.2.1.4 Délky jednotlivých úseků

Mezi další možnosti nastavení patří délky mezistaničních úseků (tedy vzdálenosti mezi jednotlivými žst.) a mezi žst. a širou tratí. Jestliže uživatel nastaví, že se vozidlo v daném úseku nepohybuje, není zapotřebí nastavit hodnoty na nulu, jelikož model s nimi nepočítá.

Délky jednotlivých úseků		
Vzdálenost širé trati a ŽST A	10,00	km
Vzdálenost mezi ŽST A a ŽST B	40,00	km
Vzdálenost mezi ŽST B a ŽST C	10,00	km
Vzdálenost širé trati a ŽST C	40,00	km

Obrázek 11 - Tabulka z modelu pro nastavení délek jednotlivých úseků

Zdroj: Autor

#### 4.2.1.5 Cestovní doby a doby pobytu

Uživatel modelu musí v neposlední řadě nastavit cestovní doby mezi jednotlivými žst. a doby pobytu v jednotlivých žst. Názorná tabulka z modelu se nachází na následujícím obrázku (viz Obrázek 12). Nejprve uživatel nastaví čas, kdy bude zahájen oběh. Dále je zapotřebí nastavit, zda se vozidlo nachází v daném úseku. To je opět možné, jako v předchozích částech pomocí hodnot „0“ a „1“. V případě, že se vozidlo nachází nebo pohybuje v daném úseku, nastaví uživatel hodnotu „1“, v opačném případě dojde k nastavení hodnoty „0“. Na následujícím řádku modelu dojde k nastavení jednotlivých časů. V případě, že probíhá noční odstav v určité žst., rovná se doba pobytu době nočního odstavu v žst. (viz kapitola 4.2.1.2). Ve zmíněné tabulce (viz Obrázek 12) je nastavena situace, kdy se jednotka BEMU pohybuje po širé trati do žst. A, následně do žst. B, kde probíhá obrat. Odtud pokračuje nazpět do žst. A, kde svou jízdu končí. Dochází tak ke splnění podmínky pro oběhy (viz kapitola 4.2). Zároveň je zde zobrazena situace pro nastavení obratu v žst. B. Doba pobytu v žst. B se nastaví pomocí hodnoty „1“ ve směru ze žst. C, respektive při zpáteční cestě. Ve směru ze žst. A uživatel zvolí u pobytu v žst. B hodnotu „0“. Pro lepší orientaci uživatele se na konci modelu nachází tabulka se souhrnnými hodnotami pro jednotlivé úseky. Ta zároveň znázorňuje zvolenou situaci a zaručuje kontrolu uživateli, zdali zvolené úseky na sebe navazují. V případě, že se vozidlo nachází v daném úseku, v tabulce jsou uvedeny konkrétní hodnoty. Jestliže nastane opačný případ, tedy že se vozidlo v daném úseku nevyskytuje, v tabulce se objeví výraz „NEJEDE“ (viz Obrázek 13). Popis k jednotlivým hodnotám se nachází v kapitole 4.2.3.

Na konci tabulky s cestovními dobami a dobami pobytů se nacházejí souhrnné výsledky (viz Obrázek 12). Celková doba oběhu je definována jako součet všech cestovních dob a dob pobytů (nastaveno s hodnotou „1“). Celková ujetá vzdálenost jednoho oběhu je pak určena jako součet všech mezistaničních úseků, kde se jednotka pohybovala (tam i zpět).

Oběhová rychlost vychází z podílu celkové ujeté vzdálenosti jednoho oběhu a celkové doby jednoho oběhu.

Cestovní doby a doby pobytu		
Začátek oběhu	6:00	hh:mm
Jízda mezi širou tratí a ŽST A	1	0; 1
Cestovní doba mezi širou tratí a ŽST A	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST A	1	0; 1
Doba pobytu v ŽST A	0:05	hh:mm
Jízda mezi ŽST A a B	1	0; 1
Cestovní doba mezi ŽST A a B	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST B	0	0; 1
Doba pobytu v ŽST B	0:05	hh:mm
Jízda mezi ŽST B a C	0	0; 1
Cestovní doba mezi ŽST B a C	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST C	0	0; 1
Doba pobytu v ŽST C	0:10	hh:mm
Jízda mezi ŽST C a širou tratí	0	0; 1
Cestovní doba ze ŽST C na širou trať	1:00	hh:mm
Jízda mezi širou tratí a ŽST C	0	0; 1
Cestovní doba na širé trati do ŽST C	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST C	0	0; 1
Doba pobytu v ŽST C	0:10	hh:mm
Jízda mezi ŽST C a B	0	0; 1
Cestovní doba mezi ŽST C a B	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST B	1	0; 1
Doba pobytu v ŽST B	0:05	hh:mm
Jízda mezi ŽST B a A	1	0; 1
Cestovní doba mezi ŽST B a A	1:00	hh:mm
Pobyt v ŽST A	1	0; 1
Doba pobytu v ŽST A	0:05	hh:mm
Jízda mezi ŽST A a širou tratí	0	0; 1
Cestovní doba ze ŽST A na širou trať	1:00	hh:mm
Souhrné výsledky		
Celková doba jednoho oběhu	3:15	hh:mm
Celkem ujetá vzdálenost jednoho oběhu	90,00	km
Oběhová rychlost	27,69	km/h

Obrázek 12 - Tabulka z modelu pro nastavení cestovních dob a dob pobytů

Zdroj: Autor



Souhrnná tabulka hodnot							
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Stav akumulátoru - rozložené nabíjení [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Odebraná energie ze sítě - rozložené nabíjení [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	6:00	200,00	200,00	0,00	0,00	70,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST A	7:00	350,00	350,00	247,50	247,50	70,00	10,00
Čas odjezdu ze ŽST A	7:05	350,00	350,00	250,83	250,83	70,00	10,00
Čas příjezdu do ŽST B	8:05	230,00	230,00	250,83	250,83	70,00	50,00
Čas odjezdu ze ŽST B	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST B	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST B	8:10	226,67	226,67	250,83	250,83	70,00	50,00
Čas příjezdu do ŽST A	9:10	106,67	106,67	250,83	250,83	70,00	10,00
Čas odjezdu ze ŽST A	9:15	173,33	173,33	337,50	337,50	70,00	10,00
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	70,00	NEJEDE

Obrázek 13 - Tabulka z modelu znázorňující celkový souhrn hodnot daného oběhu

Zdroj: Autor

## 4.2.2 Počáteční podmínky – jednotka BEMU

Uživatel modelu musí dále nastavit počáteční podmínky spojené s jednotkou BEMU. Jedná se o nastavení parametrů trakčního akumulátoru, dále pak gradientu trakční spotřeby a příkonu spotřeby energie pro pomocné pohony. Popis jednotlivých veličin je uveden v následujících odstavcích. Pro názornou představu se zde nachází tabulka z modelu (viz Obrázek 14).

### 4.2.2.1 Energie trakčního akumulátoru

V první případě má uživatel modelu možnost nastavit kapacitu trakčního akumulátoru. Tato veličina je nazývána „Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie“ a její jednotkou je kWh. Tuto energii uvádějí výrobci BEMU jednotek jako kapacitu akumulátoru (viz Tabulka 2). Zmíněná energie není ale plně využitelná, jelikož se jedná o energii na začátku životnosti trakčního akumulátoru. Nicméně tato energie během životnosti (zhruba 15 let) postupně klesá a na konci dosahuje zhruba 80 % původní kapacity. Tuto informaci je zapotřebí brát v potaz během prověřování nasazování jednotek BEMU do pravidelného provozu, a tedy modelovat jednotlivé situace se sníženou kapacitou trakčního akumulátoru. Nemůže tak dojít k situaci, že BEMU jednotka byla (na začátku životnosti akumulátoru) schopna se pohybovat na určitou vzdálenost při využití energie z trakčního akumulátoru a na konci životnosti (trakčního akumulátoru) by nebyla schopna ujet vzdálenost do určitého cíle. Z tohoto důvodu počítá model s disponibilní energií trakčního akumulátoru, která je definována dle následujícího vztahu:

$$E_{disp} = E_{jmen} \cdot k$$

kde:

$E_{disp}$ [kWh]	disponibilní energie trakčního akumulátoru
$E_{jmen}$ [kWh]	jmenovitá energie trakčního akumulátoru
$k$ [-]	koeficient pro stanovení disponibilní energie

Ze vztahu vyplývá, že disponibilní energie trakčního akumulátoru se rovná součinu jmenovité energie trakčního akumulátoru a koeficientu pro stanovení této zmíněné energie. Koeficient je zadáván v intervalu od 0 do 1, přičemž desetinné číslo určuje procentuální vyjádření kapacity energie trakčního akumulátoru, se kterou bude následně probíhat výpočet. Příklady jsou znázorněny v následující tabulce (viz Obrázek 14).

Kromě maximální kapacity trakčního akumulátoru je zapotřebí zadat i minimální kapacitu. Trakční akumulátor je z technického hlediska možné úplně vybit. Avšak během pravidelného provozu jednotek BEMU se s touto možností neuvažuje a ponechává se částečně nabitý

trakční akumulátor. Tuto situaci lze přirovnat k silničním vozidlům, kdy řidič nespotřebuje veškeré palivo v palivové nádrži, ale uvažuje s rezervou. Z tohoto důvodu nedochází k úplnému vyčerpání energie v akumulátoru a je stanovena hodnota minimální energie trakčního akumulátoru, pod kterou by hladina neměla klesnout. Zmíněná hodnota je následně znázorněna v grafickém výstupu.

Definice minimální kapacity energie v trakčním akumulátoru je následující:

$$E_{min} = E_{disp} \cdot k_{min}$$

kde:

$E_{min}$ [kWh]	minimální stav energie trakční akumulátorové baterie
$E_{disp}$ [kWh]	disponibilní energie trakčního akumulátoru
$k_{min}$ [-]	koeficient pro minimální stav energie trakčního akumulátoru

Minimální stav energie je definován jako součin disponibilní energie a koeficientu pro minimální stav energie trakčního akumulátoru. Hodnota disponibilní energie vychází z předchozího výpočtu. Koeficient musí opět uživatel modelu zadat v intervalu od 0 do 1. Desetinné číslo je procentuální vyjádření disponibilní energie trakčního akumulátoru, pod kterou nesmí hladina energie v akumulátoru klesnout. Při modelaci se nejvíce uvažuje alespoň s 20 % disponibilní energie. Příklad je znázorněn v následující tabulce (viz Obrázek 14).

Na začátku oběhu je zapotřebí, aby uživatel modelu nastavil počáteční hodnotu kapacity trakčního akumulátoru, ta musí být menší nebo rovna než energie disponibilní. Pokud dané tvrzení platí, objeví se uživateli věta „Ano, vztah platí“ (názorné zobrazení v následující tabulce viz Obrázek 14). V opačném případě dojde k vypsání věty „Ne, neplatí. Je zapotřebí zadat menší počáteční stav akumulátoru“. Uživatel tedy musí změnit počáteční hodnotu energie, aby tvrzení bylo platné.

#### 4.2.2.2 Gradient trakční spotřeby

Gradient trakční spotřeby (také nazýván jako průměrná trakční spotřeba) představuje první složku takzvané dvousložkové metody (viz kapitola 4.1). Stanovuje, kolik energie potřebuje jednotka BEMU pro ujetí jednoho kilometru (jednotky kWh/km). Zadaná hodnota je následně využívána pro výpočty v jednotlivých úsecích. Nezáleží na tom, zda jednotka BEMU odebírá energii z trakčního akumulátoru anebo z trakčního vedení (model je schopen rozlišit, odkud je energie odebírána). Tento gradient není během celého roku stejný. Největší změny způsobuje odpor vzduchu, který narůstá s druhou mocninou. Ten je odlišný v jednotlivých ročních obdobích. Největší hodnoty dosahuje v zimě, naopak nejmenší v létě. Model umožňuje modelovat různé gradienty, které prověří rozdíl mezi průměrnou roční spotřebou

trakční energie a spotřebu energie (a z toho vyplývající prověření dojezdu) za všech okolností. Z tohoto důvodu je výsledný gradient definován na základě tohoto vztahu:

$$e_{L, \text{výsledný}} = \frac{e_{L, \text{střední roční}}}{k_{SeL}}$$

kde:

$e_{L, \text{výsledný}} [kWh/km]$	gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)
$e_{L, \text{střední roční}} [kWh/km]$	gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení
$k_{SeL} [-]$	koeficient pro stanovení extrémních hodnot gradientu trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení

Výsledný gradient je definovaný jako podíl gradientu středního ročního a koeficientu pro stanovení extrémních hodnot. Gradient střední roční lze určit jako střední hodnotu gradientů během celého roku. Extrémní hodnoty může uživatel nastavit pomocí koeficientu. Jedná se o bezrozměrnou hodnotu, ale v modelu číslice „1“ stanovuje gradient střední roční. Nastavení koeficientu pro stanovení extrémních hodnot se v reálné situaci uvažuje v intervalu od 0,9 do 1,1. Tyto uvedené hodnoty ale nejsou závazné žádnými normami ani předpisy.

Příklad je uvedený v následující tabulce (viz Obrázek 14), kde výsledný gradient je na základě koeficientu rovný gradientu výslednému.

#### 4.2.2.3 Příkon vedlejší spotřeby

Druhou složku v rámci dvousložkové metody (viz kapitola 4.1) tvoří spotřeba energie pro pomocné pohony. Jedná se tedy o spotřebu energie (z trakčního akumulátoru anebo z trakčního vedení) během jedné hodiny provozu jednotky BEMU. Jednotkou tohoto příkonu jsou kW. Příkon vedlejší spotřeby se mění během celého roku (stejný případ s gradientem viz kapitola 4.2.2.2). Vliv má především roční období. Pro názornost se liší spotřeba energie pro vytápění jednotky BEMU v zimním období oproti klimatizování jednotky v letních měsících. V jarních či podzimních měsících nedochází k potřebě vozidlo klimatizovat ani vytápět.

Pro tyto případy je výsledný příkon definován dle následujícího vztahu:

$$P_{v, \text{výsledný}} = \frac{P_{v, \text{střední roční}}}{k_{SPv}}$$

kde:

$P_{v, \text{výsledný}} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)
$P_{v, \text{střední roční}} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení
$k_{SPv} [-]$	koeficient pro stanovení extrémních hodnot příkonu vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení

Ze vztahu vyplývá, že výsledný příkon se rovná podílu příkonu středního ročního a koeficientu pro stanovení extrémních hodnot. Příkon střední roční je definován jako střední hodnota příkonů během celého roku. Extrémní hodnoty může uživatel modelu určit na základě již zmíněného koeficientu, který je opět bezrozměrný, za předpokladu, že číslice „1“ je definována pro příkon střední roční. Na základě změny tohoto koeficientu dojde k prověření průměrné roční spotřeby energie pro vedlejší spotřebu s prověřením spotřeby energie při extrémních podmínkách během různých ročních období. Pro extrémní hodnoty koeficientu se uvažuje o hodnotách mezi 0,5 a 2,0. Zmíněné hodnoty v uvedeném intervalu nejsou závazné žádnými normami ani předpisy.

Pro noční odstav dochází ke snížení zmíněného příkonu, jelikož BEMU jednotka odebírá energii v úspornějším režimu (viz kapitola 4.2.1.2). Z tohoto důvodu umožňuje model uživateli zadat i příkon pro noční odstav, pro který platí následující vztah:

$$P_{v, \text{výsledný pro odstav}} = \frac{P_{v, \text{odstav střední roční}}}{k_{SPv, \text{odstav}}}$$

kde:

$P_{v, \text{výsledný pro odstav}} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení při odstavu (výsledný)
$P_{v, \text{odstav střední roční}} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení při odstavu
$k_{SPv, \text{odstav}} [-]$	koeficient pro stanovení extrémních hodnot příkonu vedlejší spotřeby z aku./trak. vedení při odstavu

Výsledný příkon pro odstav je definován jako podíl příkonu odstav střední roční a koeficientu pro extrémní hodnoty pro odstav. Výsledný příkon i příkon střední roční pro odstav by měly být menší než příkon střední roční. Důvodem je, že jednotka odebírá energii v úsporném režimu (viz předchozí odstavec). Koeficient extrémních hodnot je, jako v ostatních případech, bezrozměrný a umožňuje prověření spotřeby energie během celého roku. Číslice „1“ je určena pro příkon odstav střední roční. Stejně, jako v případě provozu jednotky v aktivním stavu,

je zde uvažováno s extrémními hodnotami v intervalu od 0,5 do 2,0 (nejsou závazné žádnými normami ani předpisy).

Názorné příklady příkonů jsou uvedeny v následující tabulce (viz Obrázek 14).

#### **4.2.2.4 Účinnost**

Poslední počáteční podmínkou je účinnost. V případě modelu se jedná o účinnost vstupu energie do trakčního akumulátoru, respektive o účinnost na sběrači (v modelu je tato veličina nazývána „Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívod elektrické energie – vstup akumulátorové baterie“). Hodnota je zadávána v intervalu od 0 do 1, přičemž hodnota vyjadřuje procentuální účinnost, která je nejčastěji uváděna okolo 80 %. Příklad je uveden v následující tabulce (viz Obrázek 14).

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotky
<b>Základní parametry</b>			
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie	E <sub>jmen</sub>	500,00	kWh
Koeficient pro stanovení využitelné energie	k	0,70	<0;1>
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie	E <sub>disp</sub>	350,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie	E <sub>poč</sub>	200,00	kWh
Platí vztah $E_{poč} \leq E_{disp}$	Ano, vztah platí		
Koeficient pro minimální stav energie trakčního akumulátoru	k <sub>min</sub>	0,20	<0;1>
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie	E <sub>min</sub>	70,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení	e <sub>L</sub> , střední roční	2,00	kWh/km
Koeficient pro stanovení extrémních hodnot gradientu trakční spotřeby z akumulátoru (1=střední roční)	k <sub>SeL</sub>	1,00	-
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení	e <sub>L</sub> , výsledný	2,00	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení	P <sub>v</sub> , střední roční	40,00	kW
Koeficient pro stanovení extrémních hodnot příkonu vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (1=střední roční)	k <sub>SPv</sub>	1,00	-
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení	P <sub>v</sub> , výsledný	40,00	kW
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení při odstavu	P <sub>v</sub> , odstav střední roční	20,00	kW
Koeficient pro stanovení extrémních hodnot příkonu vedlejší spotřeby z aku./trak. vedení při odstavu (1=střední roční)	k <sub>SPv</sub> , odstav	1,00	-
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení při odstavu	P <sub>v</sub> , výsledný pro odstav	20,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívod elektrické energie - vstup akumulátorové baterie	$\eta$	0,80	<0;1>

Obrázek 14 - Tabulka z modelu znázorňující parametry jednotky BEMU, které lze zadat

Zdroj: Autor

### 4.2.3 Stanovení výpočtů jednotlivých veličin

Výpočty jednotlivých veličin a jejich výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce pro každý úsek zvlášť. V rámci této kapitoly jsou pro názorný příklad uvedeny tabulky pro úseky B (žst. B, viz Obrázek 15) a B – C (žst. B – žst. C, viz Obrázek 16). Hodnoty v úsecích na sebe nenavazují, jelikož se jedná o různé názorné situace.

Na úvod každé tabulky jednotlivého úseku jsou pro přehlednost uvedeny parametry, které byly zvoleny v rámci počátečních podmínek (viz kapitoly 4.2.1 a 4.2.2). Nejprve je uvedena počáteční kapacita trakčního akumulátoru. Pro první úsek oběhu (úsek širá trať – žst. A anebo žst. A) je kapacita akumulátoru zadána v rámci počátečních podmínek. V ostatních úsecích je hodnota rovna konečné hodnotě z předchozího úseku. Dále pak je uvedena přítomnost jednotky BEMU v daných úsecích (hodnoty „0“ a „1“), trakční vedení (hodnoty „0“ a „1“), cestovní doba nebo doba pobytu a ujetá vzdálenost, která je v úsecích žst. nulová (vozidlo se v žst. nepohybuje). V tabulce pro úseky žst. je navíc uvedeno, zda bude vozidlo odstaveno v nočních hodinách (hodnoty „0“ a „1“). Zároveň jsou uvedeny doby mezi přechody z aktivního do úsporného režimu jednotky a naopak (viz kapitola 4.2.1.2). Ostatní veličiny a jejich definiční vztahy jsou uvedeny v následujících kapitolách.

#### 4.2.3.1 Úseková rychlost

Stanovuje, jakou rychlostí se v daném úseku vozidlo pohybuje. Definiční vztah této veličiny je následující:

$$V_{\text{úsek}} = \frac{L}{T_{\text{pobyt (cestovní doba)}}$$

kde:

$V_{\text{úsek}} [km/h]$	úseková rychlost
$L [km]$	ujetá vzdálenost
$T_{\text{pobyt (cestovní doba)}} [hod.]$	doba pobytu/cestovní doba

Úseková rychlost je dle zmíněného vztahu rovna podílu ujeté vzdálenosti mezi žst. a cestovní dobou (pro mezistaniční úseky nebo širou trať). V uvedeném vztahu je uvedena i doba pobytu, respektive doba pobytu v žst. Vzhledem k tomu, že se vozidlo v žst. nepohybuje, je v tomto případě úseková rychlost nulová. Příkladem je tabulka pro žst. B (viz Obrázek 15). V úseku mezi žst. B a C úseková rychlost nulová není (viz Obrázek 16). Vzdálenost mezi zmíněnými žst. je 10 km, cestovní doba 1 hod. Po dosazení do uvedeného vztahu je úseková rychlost 10 km/h. Hodnoty uvedené v tabulkách nejsou reálné, pouze byly zvoleny pro názorný příklad v modelu. Reálné hodnoty jsou uvedeny v kapitole 6, kde je prověřen provoz jednotky BEMU na trati číslo 201 dle KJŘ 2022/2023 (dle TTP trať číslo 702B).



#### 4.2.3.2 Spotřeba energie z akumulátoru

V této kapitole jsou uvedeny definiční vztahy spojené se spotřebou energie z trakčního akumulátoru. V případě, že se vozidlo v daném úseku nachází pod trakčním vedením, jsou hodnoty spotřeby energie z akumulátoru v tabulce nulové. Následující veličiny jsou uvedeny v tabulce v části „Základní parametry pro úsek“.

#### Spotřeba energie trakce z akumulátoru

První složka z dvousložkové metody (viz kapitola 4.1) určuje, kolik energie z trakčního akumulátoru spotřebovala jednotka pro ujetí daného úseku. Výsledné hodnoty vycházejí z tohoto definičního vztahu:

$$E_L = e_{L, \text{výsledný}} \cdot L$$

kde:

$E_L$ [kWh]	spotřeba energie trakce z akumulátoru
$e_{L, \text{výsledný}}$ [kWh/km]	gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)
$L$ [km]	ujetá vzdálenost

Spotřeba energie trakce z akumulátoru je rovna součinu výsledného gradientu trakční spotřeby (viz kapitola 4.2.2.2) a vzdálenosti mezi jednotlivými žst. Pro úsek žst. B (viz Obrázek 15) nedosahuje tato veličina žádných hodnot (nulová hodnota). Důvodem je, že se vozidlo v daném úseku nepohybuje. V druhém případě (úsek mezi žst. B a C, viz Obrázek 16) je hodnota taktéž nulová. Toto je z důvodu pohybu vozidla pod trakčním vedením (v opačném případě by se zde nacházela patřičná hodnota).

#### Spotřeba energie vedlejších (pomocných) pohonů z akumulátoru

Jak již bylo zmíněno, druhou složku (viz kapitola 4.1) tvoří spotřeba energie z akumulátoru pro pomocné pohony. Definiční vztah této veličiny je následující:

$$E_T = T_{\text{pobyt (cestovní doba)}} \cdot P_{V, \text{výsledný (pro odstav)}}$$

kde:

$E_T$ [kWh]	Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru
$T_{\text{pobyt (cestovní doba)}}$ [hod.]	Doba pobytu/cestovní doba
$P_{V- \text{výsledný (pro odstav)}}$ [kW]	Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru (výsledný)

Spotřeba energie z trakčního akumulátoru pro pomocné pohony je rovna součinu doby pobytu (pro žst.) anebo cestovní doby (pro mezistaniční úseky a širou trať) s příkonem pro vedlejší výsledný příkon (viz kapitola 4.2.2.3). Pro názorný úsek žst. B (viz Obrázek 15) je spotřeba

energie 3,33 kWh. Příkon je zde násobený dobou pobytu, tedy 5 min., respektive 0,08 hod. V úseku mezi žst. B a C (viz Obrázek 16) dosahuje veličina nulových hodnot, jelikož se BEMU jednotka nachází v místě liniové elektrizace.

Model zároveň sčítá hodnoty spotřeby energie z trakčního akumulátoru pro dobu pobytu a noční odstav. V případě, že dojde k nočnímu odstavnému v žst., je spotřeba energie vedlejší rovna následujícího vztahu:

$$E_T = T_{pobyt (přech. ak-ús)} \cdot P_{V, výsledný} + T_{noční odstav} \cdot P_{V, výsledný (pro odstav)} + T_{pobyt (přech. ús-ak)} \cdot P_{V, výsledný}$$

kde:

$E_T [kWh]$	celková spotřeba energie pro pomocné pohony během nočního odstavu v žst.
$T_{pobyt (přech. ak-ús)} [hod.]$	doba pobytu v žst. pro přechod z aktivního stavu jednotky BEMU do úsporného (viz kapitola 4.2.1.2)
$P_{V, výsledný} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru (výsledný)
$T_{noční odstav} [hod.]$	doba nočního odstavu v žst. (zadááno jako doba pobytu v žst, viz kapitola 4.2.1.2)
$P_{V, výsledný (pro odstav)} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru (výsledný) pro úspornější režim BEMU jednotky
$T_{pobyt (přech. ús-ak)} [hod.]$	doba pobytu v žst. pro přechod z úsporného stavu jednotky BEMU do aktivního (viz kapitola 4.2.1.2)
$P_{V, výsledný} [kW]$	příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru (výsledný)

Z definičního vztahu vyplývá, že celková spotřeba energie pro vedlejší pohony během odstavu je stanovena jako součet spotřeby energie během přechodových fází a samotného odstavu. Za přechodové fáze jsou uvažovány doby, kdy vozidlo spotřebovává větší množství energie potřebné například pro vytápění či klimatizování vozidla, pohon kompresorů a podobně. V tomto případě je uvažován příkon označovaný  $P_{V, výsledný}$ . Během nočního odstavu jednotka spotřebovává menší množství energie (není zapotřebí vytápět či klimatizovat jednotku na provozní teplotu a některé části vozidla nejsou v provozu). Z toho vyplývá, že během doby odstavu značené  $T_{noční odstav}$  je příkon vedlejší spotřeby nižší (značen  $P_{V, výsledný (pro odstav)}$ ). Popis přechodu jednotlivých stavů a názorný příklad z modelu je uveden v kapitole 4.2.1.2.

### **Celková spotřeba energie z akumulátoru**

Celková spotřebovaná energie je dána součtem spotřeby energie trakce a vedlejších pohonů. Její definiční vztah je:

$$E_{celkem\ akum} = E_L + E_T$$

kde:

$E_{celkem\ akum}$ [kWh]	celková spotřeba energie z akumulátoru v příslušném úseku
$E_L$ [kWh]	spotřeba energie trakce z akumulátoru
$E_T$ [kWh]	spotřeba energie vedlejší z akumulátoru

Pro úsek žst. B (viz Obrázek 15) je tato hodnota rovna 3,33 kWh, jelikož probíhá odběr pouze pro pomocné pohony. V úseku mezi žst. B a C je hodnota nulová (viz Obrázek 16), protože se vozidlo pohybuje pod trakčním vedením.

### **Cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru**

Znárodnuje konečnou energii trakčního akumulátoru na konci úseku v případě, že by nebyla možnost nabíjení. Definiční vztah je následující:

$$E_{bez\ obnovy} = E_{poč} - E_{celkem\ akum}$$

kde:

$E_{bez\ obnovy}$ [kWh]	cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru
$E_{poč}$ [kWh]	počáteční stav akumulátoru (viz kapitola 4.2.3)
$E_{celkem\ akum}$ [kWh]	celková spotřeba energie z akumulátoru v příslušném úseku

Veličina je rovna rozdílu počátečního stavu akumulátoru a celkové spotřeby energie ze zmíněného akumulátoru. Konečný stav bez obnovy je pro úsek žst. B (viz Obrázek 15) 226,67 kWh (počáteční stav byl 230,00 kWh a celková spotřeba činila 3,33 kWh). V úseku mezi žst. B a C (Obrázek 16) je počáteční hodnota kapacity akumulátoru 296,67 kWh (není uvažován rozklad nabíjení, viz kapitola 4.2.3.4). Vozidlo se pohybuje pod trakčním vedením, tudíž je celková spotřeba energie z akumulátoru nulová. Z toho vyplývá, že cílový stav energie v trakčním akumulátoru je počáteční stav, tedy zmíněných 296,67 kWh.

### Potřebná obnova energie v trakčním akumulátoru na výstupu

Veličina určující potřebné množství energie pro dosažení maximální kapacity trakčního akumulátoru ( $E_{disp}$ , viz 4.2.2.1). Zmíněná veličina je definována:

$$E_{potř. obnova} = E_{disp} - E_{bez obnovy}$$

kde:

$E_{potř. obnova} [kWh]$	cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru
$E_{disp} [kWh]$	disponibilní energie trakčního akumulátoru
$E_{bez obnovy} [kWh]$	cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru

Definiční vztah určuje, že výsledná hodnota veličiny je rovna rozdílu disponibilní energie a cílového stavu energie v akumulátoru bez obnovy. Disponibilní energie pro úsek žst. B a úsek mezi žst. B a C činí 350,00 kWh. Z tohoto důvodu je pro první zmíněný úsek potřeba obnovit v trakčním akumulátoru 123,33 kWh (viz Obrázek 15), pro druhý úsek 53,33 kWh (viz Obrázek 16).

#### 4.2.3.3 Spotřeba energie z trakčního vedení a konečný stav energie v trakčním akumulátoru

V této kapitole jsou uvedeny definiční vztahy pro určení celkové spotřeby energie z trakčního vedení. Jedná se o energii pro pohon BEMU jednotky, pomocné pohony a nabíjení trakčního akumulátoru. Hodnoty se v tabulce (část „Výpočet celkové spotřeby energie“) uvádějí pouze v případě, že se vozidlo pohybuje v úseku s liniovou elektrizací (viz Obrázek 16), v opačném případě jsou hodnoty nulové (viz Obrázek 16).

Na závěr je uvedena konečná hodnota kapacity trakčního akumulátoru.

#### Možnost obnovy energie v akumulátoru

Tato veličina určuje množství energie, které je možné dodat během doby pobytu v žst. nebo cestovní doby při jízdě v mezistaničním úseku pro obnovu stavu trakčního akumulátoru. Výsledné hodnoty vycházejí z následujícího definičního vztahu:

$$E_{mož obnovy} = T_{pobyt(cestovní doba)} \cdot Lim \cdot \eta$$

kde:

$E_{mož. obnova} [kWh]$	spotřeba energie trakce z akumulátoru
$T_{pobyt(cestovní doba)} [hod.]$	doba pobytu/cestovní doba
$Lim [kW]$	limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST/za jízdy (viz kapitola 4.2.1.3)
$\eta [-]$	účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie – vstup akumulátorové baterie

Možná obnova vychází z doby, jak dlouho může být trakční akumulátor v daném úseku nabíjen (cestovní doba nebo doba pobytu), dále pak limitním příkonem pro nabíjení v daném úseku. Výsledná hodnota je následně ovlivněna účinností na vstupu do akumulátoru. Vzhledem k tomu, že se vozidlo v úseku žst. B (viz Obrázek 15) nenachází pod trakčním vedením, je tato hodnota nulová. Pro úsek mezi žst. B a C (v daném úseku se nachází trakční vedení) dosahuje zmíněná veličina hodnoty 480,00 kWh (viz Obrázek 16).

### Skutečná obnova energie v trakčním akumulátoru

Veličina, v modelu nazvána  $E_{obnova\ skutečná}$ , určuje skutečné množství energie dodané do trakčního akumulátoru. Její definice vychází na základě následujícího vztahu:

$$E_{obnova\ skutečná} = MIN\{E_{mož.\ obnova}; E_{potř.\ obnova}\}$$

kde:

$E_{obnova\ skutečná}$ [kWh]	možnost obnovení energie
$E_{mož.\ obnova}$ [kWh]	spotřeba energie trakce z akumulátoru
$E_{potř.\ obnova}$ [kWh]	cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru

Jsou tedy porovnány hodnoty  $E_{mož.\ obnova}$  a  $E_{potř.\ obnova}$ . V případě, že je možná obnovená energie větší než potřebná, je jako hodnota uvedena energie potřebná (viz Obrázek 16). V opačném případě je uvedena hodnota pro energii možnou obnovitelnou.

### Konečný stav trakčního akumulátoru

Konečný stav energie trakčního akumulátoru vychází z tohoto vztahu:

$$E_{konec\ stav\ aku(\eta)} = E_{obnova\ skutečná(\eta)} + E_{bez\ obnovy}$$

kde:

$E_{konec\ stav\ aku}$ [kWh]	Konečný stav akumulátoru
$E_{obnova\ skutečná}$ [kWh]	Skutečná obnova energie v trakčním akumulátoru
$E_{bez\ obnovy}$ [kWh]	Cílový stav bez obnovy energie v akumulátoru

Z definičního vztahu je patné, že konečný stav vychází ze součtu skutečné obnovené energie a hodnoty bez obnovy. V tabulce pro úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 16) je konečná hodnota 350,00 kWh (součet zaokrouhlených hodnot 296,67 kWh + 53,33 kWh). Pro úsek žst. B (viz Obrázek 15) je hodnota rovna hodnotě energie bez obnovy.

### Spotřeba energie z trakčního vedení pro nabíjení akumulátoru

V případě nabíjení akumulátoru nelze uvažovat, že skutečná obnovená energie se rovná dodané energii pro nabíjení. Zde je zapotřebí uvažovat s účinností. Definiční vztah pro tuto veličinu je následující:

$$E_{\text{pro nabíjení a z trak. ved.}} (\eta) = \frac{E_{\text{mož. obnova}}}{\eta}$$

kde:

$E_{\text{pro nabíjení z trak. ved.}} [kWh]$  konečný stav akumulátoru

$E_{\text{mož. obnova}} [kWh]$  spotřeba energie trakce z akumulátoru

$\eta [-]$  účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie – vstup akumulátorové baterie

Výsledná hodnota spotřebované energie pro nabití trakčního akumulátoru je stanovena na základě možné obnovy energie v daném úseku a účinností nabíjení, respektive na vstupu energie z trakčního vedení do jednotky BEMU. Tento příklad je viditelný v tabulce pro úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 16). Potřebná obnovitelná energie v trakčním akumulátoru činí 53,33 kWh, avšak je zapotřebí dodat 66,67 kWh. V úseku žst. B (viz Obrázek 15) jsou zmíněné hodnoty nulové, jelikož se vozidlo nenachází pod trakčním vedením.

### Spotřeba energie trakce z trakčního vedení

Odběr energie z trakčního vedení je stejně jako u odběru z trakčního akumulátoru, založen na dvousložkové metodě (viz kapitola 4.1). První složku opět tvoří energie spotřebovaná pro pohyb vozidla. Vychází z následujícího definičního vztahu (totožná, jako u spotřeby energie z akumulátoru):

$$E_{\text{pro jízdu pod trakčním vedením}} (\eta) = e_{L, \text{výsledný}} \cdot L$$

kde:

$E_{\text{pro jízdu pod trak. ved.}} [kWh]$  spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením

$e_{L, \text{výsledný}} [kWh/km]$  gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)

$L [km]$  ujetá vzdálenost

Výsledná spotřeba je rovna součinu gradientu trakční spotřeby a ujeté vzdálenosti v daném úseku. Názorný příklad je uveden v tabulce pro úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 16), kde hodnota zmíněné veličiny dosahuje 20,00 kWh.

### Spotřeba energie vedlejších (pomocných) pohonů z trakčního vedení

Druhou složku opět tvoří energie spotřebovaná pomocí pomocných pohonů. Definiční vztah je téměř totožný (liší se pouze názvem veličiny) jako u spotřeby energie z akumulátoru. Definiční vztah této veličiny je:

$$E_{\text{pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení}} (\eta) = T_{\text{pobyt(cestovní doba)}} \cdot P_{V, \text{výsledný}}$$

$E_{\text{pro ved. spo. z trak. ved.}}$  [kWh] spotřeba energie vedlejší z trakčního vedení

$T_{\text{pobyt(cestovní doba)}}$  [hod.] doba pobytu/cestovní doba

$P_{V, \text{výsledný}}$  (pro odstav) [kW] příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)

Spotřeba energie z trakčního vedení pro pomocné pohony je opět rovna (stejně, jako u spotřeby z akumulátoru) součinu doby pobytu (pro žst.) anebo pro cestovní dobu (pro mezistaniční úseky a širou trať) s příkonem pro vedlejší výsledný příkon (viz kapitola 4.2.2.3). Pro názorný úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 16) dosahuje veličina hodnot 40,00 kWh. V úseku žst. B je hodnota nulová, jelikož se vozidlo nenachází pod trakčním vedením. Model zároveň sčítá hodnoty spotřeby energie z trakčního vedení pro dobu pobytu a noční odstav.

V případě, že dojde k nočnímu odstavu v žst., je spotřeba energie vedlejší energie na základě následujícího vztahu:

$$E_T = T_{\text{pobyt(přech. ak-ús)}} \cdot P_{V, \text{výsledný}} + T_{\text{noční odstav}} \cdot P_{V, \text{výsledný (pro odstav)}} \\ + T_{\text{pobyt(přech. ús-ak)}} \cdot P_{V, \text{výsledný}}$$

kde:

$E_T$  [kWh] celková spotřeba energie pro pomocné pohony během nočního odstavu v žst.

$T_{\text{pobyt(přech. ak-ús)}}$  [hod.] doba pobytu v žst. pro přechod z aktivního stavu jednotky BEMU do úsporného (viz kapitola 4.2.1.2)

$P_{V, \text{výsledný}}$  [kW] příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)

$T_{\text{noční odstav}}$  [hod.] doba nočního odstavu v žst. (zadáváno jako doba pobytu v žst, viz kapitola 4.2.1.2)

$P_{V, \text{výsledný (pro odstav)}}$  [kW] příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný) pro úspornější režim BEMU jednotky

$T_{\text{pobyt(přech. ús-ak)}}$  [hod.] doba pobytu v žst. pro přechod z úsporného stavu jednotky BEMU do aktivního (viz kapitola 4.2.1.2)

Z uvedeného vztahu je patrné, že celková spotřeba energie pro vedlejší pohony během odstavu je stanovena jako součet spotřeby energie během přechodových fází a samotného odstavu. V případě přechodových fází se jedná o doby, kdy vozidlo spotřebovává větší množství energie potřebnou pro vytápění či klimatizování vozidla, respektive energii potřebnou pro provoz jednotky. V tomto případě se uvažuje s příkonem značeným  $P_{V, \text{výsledný}}$ . Během samotného nočního odstavení vozidlo spotřebovává menší množství energie (není zapotřebí vytápění či klimatizování na potřebné provozní teploty anebo některé části nejsou vůbec v provozu). Pro hodnotu odstavení značenou jako  $T_{\text{noční odstavení}}$  je příkon vedlejší spotřeby nižší a je značen jako  $P_{V, \text{výsledný (pro odstavení)}}$ . Popis přechodu jednotlivých stavů a názorný příklad z modelu je uveden v kapitole 4.2.1.2.

### **Celková spotřeba energie z trakčního vedení**

Celková spotřebovaná energie z trakčního vedení je dána součtem spotřeby energie trakce a vedlejších pohonů. Její definiční vztah je:

$$E_{\text{celkem z trakčního vedení}}(\eta) = E_{\text{pro nabíjení a z trakčního vedení}}(\eta) + E_{\text{pro jízdu pod trakčním vedením}}(\eta) + E_{\text{pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení}}(\eta)$$

kde:

$E_{\text{celkem z trak. ved.}} [kWh]$  celková spotřeba energie z trakčního vedení

$E_{\text{pro nabíjení z trak. ved.}} [kWh]$  konečný stav akumulátoru

$E_{\text{pro jízdu pod trak. ved.}} [kWh]$  spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením

$E_{\text{pro ved. spo. z trak. ved.}} [kWh]$  spotřeba energie vedlejší z trakčního vedení

Pro úsek žst. B (viz Obrázek 15) je tato hodnota nulová, jelikož vozidlo se nenachází pod trakčním vedením. Z tohoto důvodu probíhá odběr z trakčního akumulátoru. Je pouze uveden konečný stav energie v akumulátoru, který je 226,67 kWh. V úseku mezi žst. B a C dosahuje veličina hodnoty 126,67 kWh (viz Obrázek 16). Jednotka BEMU odebírá z trakčního vedení energii pro nabíjení akumulátoru, dále pak pro pohon samotné jednotky a pro pomocné pohony.



#### 4.2.3.4 Spotřeba energie z trakčního vedení při rozložení nabíjení a konečný stav energie v trakčním akumulátoru

V reálném provozu může být jednotka BEMU nasazena na linku, kde část své jízdy bude odebírat energii z trakčního akumulátoru a ve zbylé části své trasy bude odebírat energii z trakčního vedení. Příkladem je spojení mezi městy Tábor, Písek a Strakonice, kdy se v úseku Tábor – Písek nenachází liniová elektrizace. Při připojení k trakčnímu vedení v žst. Písek by byl trakční akumulátor okamžitě nabíjen limitním příkonem energie. Okamžitý velký příkon energie není příliš šetrný k trakčnímu akumulátoru, jelikož dochází k jeho poničení. Z tohoto důvodu by vozidlo mohlo využít možnost pozvolného nabíjení akumulátoru až do žst. Strakonice. Jednotky BEMU disponují takzvanými asistenčními systémy. Do softwaru vozidla je nahraná konkrétní trať s možnostmi nabíjení trakčního akumulátoru. Počítač si již následně hlídá odběr energie pro nabíjení. Tuto zmíněnou situaci lze nastavit i v modelu. Ten umožňuje rozložení nabíjení mezi žst. a následný mezistaniční úsek (v případě, že se v úseku nachází trakční vedení). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce s názvem „Výpočet celkové spotřeby energie – rozložené nabíjení“ pro úsek žst. B a úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 15 a Obrázek 16). V tomto případě hodnoty uvedené v tabulkách na zmíněných obrázcích navzájem na sebe navazují. Veličiny jsou určeny na základě stejných definičních vztahů, jako v případě okamžitého nabíjení (viz kapitola 4.2.3.3). Popis rozdílů mezi rozloženým a okamžitým nabíjením je uveden v následujících odstavcích.

Model nejprve v tabulce pro žst. ověří, zda se v obou úsecích nachází liniová elektrizace. V případě, že se trakční vedení v obou úsecích nachází (žst. a navazující úsek), stanoví model pomocí výpočtu celkovou možnou obnovu energie v trakčním akumulátoru. Výpočet probíhá na základě součinu doby pobytu v žst. (cestovní doby), limitního příkonu pro daný úsek a účinností (možnost obnovy energie v akumulátoru viz kapitola 4.2.3.3). Tento výpočet probíhá pro každý úsek zvlášť a výsledná hodnota uvedená v tabulce je jejich součtem. Názorný příklad se nachází v tabulce z modelu pro úsek žst. B (viz Obrázek 17), kde je tato hodnota 546,67 kWh. V případě, že je zapotřebí obnovit více energie v trakčním akumulátoru, než je hodnota možné obnovy, nedochází k rozkladu nabíjení a probíhá standardní výpočet (viz kapitola 4.2.3.3), respektive aby v akumulátoru byla energie co nejdříve obnovena. Model sám ohlídá, že energie pro možnou obnovu je menší, než jsou limitní příkony. Následně model rozdělí potřebné množství energie mezi zmíněné úseky. Hodnota je definována energií pro možnost nabíjení akumulátoru, účinností a součtem dob pobytu v žst. a cestovní doby (vychází ze vzorce pro spotřebu energie z trakčního vedení pro nabíjení akumulátoru, viz kapitola 4.2.3.3). V tabulce pro žst. B (viz Obrázek 17) je tato veličina označena jako  $E_{nabíjení - B + B/C}(\eta)$  a dosahuje hodnoty 150,00 kWh. Pro zajištění, že se za oba úseky trakční akumulátor nabije na 100 % své disponibilní kapacity, uvažuje autor této práce o 50 % rezervě. To znamená, že v úseku žst. je akumulátor nabit o 50 % více, než je zapotřebí (v tabulce veličina nazvána  $E_{nabíjení (+50\%) - B}(\eta)$  a dosahuje hodnoty 13,85 kWh, viz Obrázek 17).

Na závěr jsou určeny hodnoty pro celkovou spotřebu energie z trakčního vedení. Ty vycházejí ze součtu energií pro nabíjení trakčního akumulátoru, pro jízdu vozidla pod trakčním vedením a pomocné pohony (na základě vzorce pro celkovou spotřebu energie z trakčního vedení, viz kapitola 4.2.3.3). Zároveň je stanoven konečný stav energie trakčního akumulátoru na konci úseku. V tabulce s příkladem (viz Obrázek 17) je konečný stav 241,08 kWh.

Na začátku tabulky pro mezistaniční úsek (širou trať) je uvedena počáteční hodnota z rozkladu nabíjení označována  $E_{poč - B/C}$  (při rozložení nabíjení). Výpočet veličin spojených s rozloženým nabíjením je stejný jako v úseku žst. Na konci této kapitoly je uvedena tabulka s uvedeným příkladem pro úsek mezi žst. B a C (viz Obrázek 18).

Úsek B			
Základní parametry pro úsek			
Pobyt v ŽST	-	1	0; 1
Trakční vedení	-	0	0; 1
Noční pobyt v ŽST	-	0	0; 1
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	E <sub>poč - B</sub>	230,00	kWh
Ujetá vzdálenost	L <sub>B</sub>	0,00	km
Doba pobytu	T <sub>pobyt - B</sub>	0:05	hh:mm
Doba po příjezdu do ŽST a příkon vedlejší spotřeby	T <sub>pobyt v noci příjezd - B</sub>	0:00	hh:mm
Doba před odjezdem ze ŽST a příkon vedlejší spotřeby	T <sub>pobyt v noci odjezd - B</sub>	0:00	hh:mm
Úseková rychlost	V <sub>úsek - B</sub>	0,00	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	E <sub>L - B</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	E <sub>T - B</sub>	3,33	kWh
Spotřeba energie cekem z akumulátoru	E <sub>celkem aku - B</sub>	3,33	kWh
Stav akumulátoru bez obnovy energie	E <sub>bez obnovy - B</sub>	226,67	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	E <sub>potř obnovy - B</sub>	123,33	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie			
Možnost obnovit energii akumulátoru	E <sub>mož obnova - B (η)</sub>	0,00	kWh
Potřebná obnova energie akumulátoru	E <sub>obnova skutečná - B (η)</sub>	0,00	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	E <sub>konec stav aku - B (η)</sub>	226,67	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	E <sub>pro nabíjení aku z trakčního vedení - B (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	E <sub>pro jízdu pod trakčním vedením - B (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	E <sub>pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení - B (η)</sub>	0,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	E <sub>celkem z trakčního vedení - B (η)</sub>	0,00	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie - rozložení nabíjení			
Čas možnosti nabíjení v ŽST	T <sub>pobyt - B</sub>	0:00	hh:mm
Čas možnosti nabíjení v následném mezistaničním úseku	T <sub>ces.dob. - B/C</sub>	1:00	hh:mm
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	E <sub>poč - B</sub>	230,00	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	E <sub>potř obnovy - B (η)</sub>	123,33	kWh
Možnost obnovit energii akumulátoru v ŽST a na následujícím mezistaničním úseku	E <sub>mož obnova - B + B/C (η)</sub>	480,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST a mezistaničním úseku	E <sub>nabíjení - B + B/C (η)</sub>	0,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST (s rezervou 50%)	E <sub>nabíjení (+50%) - B (η)</sub>	0,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	E <sub>celkem z trakčního vedení - B (η)</sub>	0,00	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	E <sub>konec stav aku (nabíjení B+B/C) - B (η)</sub>	226,67	kWh

Obrázek 15 - Tabulka z modelu se spočítanými hodnotami pro Úsek B (Žst. B)

Zdroj: Autor

Úsek B - C			
Základní parametry pro úsek			
Jízda mezi ŽST B a ŽST C	-	1	0; 1
Trakční vedení	-	1	0; 1
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	Epoč - B/C	296,67	kWh
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie při rozložení nabíjení v ŽST a v mezistaničním úseku	Epoč - B/C (při rozložení nabíjení)	241,08	kWh
Ujetá vzdálenost	LB/C	10,00	km
Cestovní doba	Tces.dob. - B/C	1:00	hh:mm
Úseková rychlost	Vúsek - B/C	10,00	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	EL - B/C	0,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	ET - B/C	0,00	kWh
Spotřeba energie cekem z akumulátoru	Ecelkem aku - B/C	0,00	kWh
Cílový stav bez obnovy energie akumulátoru	Ebez obnovy - B/C	296,67	kWh
Potřeba obnovit energii	Epotř obnova - B/C	53,33	kWh
Stav akumulátoru bez obnovy energie	Ebez obnovy - B/C (rozložení nabíjení)	241,08	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	Epotř obnova - B/C (rozložení nabíjení)	108,92	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie			
Možnost obnovit energii akumulátoru	Emoz obnova - B/C(η)	480,00	kWh
Potřebná obnova energie akumulátoru	Eobnova skutečná - B/C (η)	53,33	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	Ekonec stav aku - B/C (η)	350,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	Epro nabíjení aku z trakčního vedení - B/C (η)	66,67	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	Epro jízdu pod trakčním vedením - B/C (η)	20,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	Epro vedlejší spotřebu z trakčního vedení - B/C (η)	40,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem z trakčního vedení - B/C (η)	126,67	kWh
Výpočet celkové spotřeby energie - rozložení nabíjení			
Možnost obnovit energii skutečné	Emoz obnova - B/C (η) (rozložení nabíjení)	480,00	kWh
Skutečná potřebná obnovená energie	Eobnova skutečná - B/C (η) (rozložení nabíjení)	108,92	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	Ekonec stav aku - B/C (η) (rozložení nabíjení)	350,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v mezistaničním úseku	Epro nabíjení - B/C (η) (rozložení nabíjení)	136,15	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením v mezistaničním úseku	Epro jízdu - B/C (η) (rozložení nabíjení)	20,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu pod trakčním vedením v mezistaničním úseku	Epro vedlejší spotřebu - B/C (η) (rozložení nabíjení)	40,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem - B/C (η) (rozložení nabíjení)	196,15	kWh

Obrázek 16 - Tabulka z modelu se spočítanými hodnotami pro Úsek B – C (Žst. B – Žst. C)

Zdroj: Autor

Výpočet celkové spotřeby energie - rozložení nabíjení			
Čas možnosti nabíjení v ŽST	$T_{pobyt} - B$	0:05	hh:mm
Čas možnosti nabíjení v následném mezistaničním úseku	$T_{ces.dob.} - B/C$	1:00	hh:mm
Počáteční stav trakční akumulátorové baterie	$E_{poč} - B$	230,00	kWh
Potřeba obnovit energii na výstupu z akumulátoru	$E_{potř} \text{ obnova} - B (\eta)$	120,00	kWh
Možnost obnovit energii akumulátoru v ŽST a na následujícím mezistaničním úseku	$E_{mož} \text{ obnova} - B + B/C (\eta)$	546,67	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST a mezistaničním úseku	$E_{nabíjení} - B + B/C (\eta)$	150,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v ŽST (s rezervou 50%)	$E_{nabíjení} (+50\%) - B (\eta)$	13,85	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	$E_{celkem} \text{ z trakčního vedení} - B (\eta)$	17,18	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	$E_{konec} \text{ stav} \text{ aku} (\text{nabíjení } B+B/C) - B (\eta)$	241,08	kWh

Obrázek 17 - Tabulka z modelu se spočítanými hodnotami pro rozložení nabíjení pro Úsek B (Žst. B)

Zdroj: Autor

Výpočet celkové spotřeby energie - rozložení nabíjení			
Možnost obnovit energii skutečné	$E_{mož} \text{ obnova} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	480,00	kWh
Skutečná potřebná obnovená energie	$E_{obnova} \text{ skutečná} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	108,92	kWh
Konečný stav akumulátorové baterie	$E_{konec} \text{ stav} \text{ aku} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	350,00	kWh
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie v mezistaničním úseku	$E_{pro} \text{ nabíjení} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	136,15	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením v mezistaničním úseku	$E_{pro} \text{ jízdu} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	20,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu pod trakčním vedením v mezistaničním úseku	$E_{pro} \text{ vedlejší} \text{ spotřebu} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	40,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	$E_{celkem} - B/C (\eta)$ (rozložení nabíjení)	196,15	kWh

Obrázek 18 - Tabulka z modelu se spočítanými hodnotami pro rozložení nabíjení pro Úsek B – C (Žst. B – Žst. C)

Zdroj: Autor

#### 4.2.4 Shrnutí výsledků

Závěrem modelu je souhrnná tabulka (viz Obrázek 19) pro všechny úseky, kde se vozidlo nacházelo. Hodnoty jednotlivých veličin jsou definovány jako součet jednotlivých hodnot v každém úseku. Veličiny, které byly získány pomocí výpočtů, jsou následující. Výsledné spotřeby energie jsou stanoveny pouze pro spotřebu energie bez rozložené energie. Tento důvod je především proto, že hlavní prioritou je co nejrychleji obnovit energii v akumulátoru. Rozložené nabíjení je až následující prioritou. Hodnoty uvedené v tabulce se shrnutými výsledky (viz Obrázek 19) nenavazují na předchozí uvedené tabulky, jelikož je vždy uveden jiný znázorňující příklad.

##### Oběhová rychlost

Veličina znázorňující rychlost během oběhu. Definiční vztah této veličiny je:

$$V_{\text{celkem oběh}} = L_{\text{celkem oběh}} / T_{\text{celkem oběh}}$$

kde:

$V_{\text{celkem oběh}} [km/h]$	oběhová rychlost
$L_{\text{celkem oběh}} [km]$	celková ujetá vzdálenost během oběhu
$T_{\text{celkem oběh}} [hod.]$	celková doba provozu jednotky během oběhu

V tabulce (viz Obrázek 19) má oběhová rychlost hodnotu 19,67 km/h, kdy oběh jednotce trval 10 hod. a 10 min. a ujela vzdálenost 200,00 km. Do celkové doby provozu jsou zahrnuty i případné doby nočních odstavů. Z tohoto důvodu jsou v modelu uvedeny veličiny s názvem  $T_{\text{celkem oběh, bez odstavů}}$  a  $V_{\text{celkem oběh, bez odstavů}}$  užívají pak hodnoty, kde nejsou zahrnuty noční odstavy, respektive je uvažováno pouze s dobami jednotky v aktivním stavu (viz kapitola 4.2.1.2). Pro názornost byla nastavena v modelu doba odstavu v jedné ze žst. na 1 hod. a 5 min. (doba přechodu z aktivního stavu a úsporný 10 min., v opačném případě 20 min.). Rozdílné jsou tedy hodnoty celkové doby provozu uvedené v následující tabulce (viz Obrázek 19), kdy doba provozu bez oběhů je právě o 1 hod. a 5 min. kratší než standartní doba provozu jednotky. To je důsledkem i rozdílných oběhových rychlostí, kdy bez odstavů dosahuje vyšší hodnoty 22,02 km/h, s odstavu pak 19,67 km/h. Ujetá vzdálenost je v obou případech totožná, jelikož během odstavu se vozidlo nepohybuje. V případě, kdy v oběhu není žádný odstav, jsou hodnoty pro odstavu a bez odstavů totožné. Zároveň je ale zapotřebí uvést, že celková spotřeba energie pro vedlejší příkony z trakčního akumulátoru zahrnuje spotřebu energie v přechodových fázích i během samotného odstavu (viz kapitoly 4.2.3.2 a 4.2.3.3).

### Výsledný gradient spotřeby

Určuje, kolik energie z trakčního akumulátoru bylo spotřebováno na celkovou ujetou vzdálenost během oběhu. Výsledná hodnota je stanovena na základě následujícího definičního vztahu:

$$e_{L, \text{výsledný}} = E_{\text{celkem oběh}} / L_{\text{celkem oběh}}$$

kde:

$e_{L, \text{výsledný}} [kWh/km]$	výsledný gradient spotřeby
$E_{\text{celkem oběh}} [kWh]$	celková spotřeba energie z akumulátoru
$L_{\text{celkem oběh}} [km]$	celková ujetá vzdálenost během oběhu

Celková spotřeba energie je dělena hodnotou celkové ujeté vzdáleností během oběhu. Gradient v tabulce (viz Obrázek 19) dosahuje hodnoty 1,43 kWh/km.

### Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení

Jedná se o veličinu, která určuje výsledný gradient spotřeby energie bez vlivu nabíjení trakčního akumulátoru. Hodnota vychází z následujícího vztahu:

$$e_{L, \text{bez dobíjení}} = e_{L, \text{výsledný}} + P_{V, \text{výsledný}} / V_{\text{celkem oběh}}$$

kde:

$e_{L, \text{bez dobíjení}} [kWh/km]$	výsledný gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení
$e_{L, \text{výsledný}} [kWh/km]$	gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení (výsledný)
$P_{V, \text{výsledný}} [kW]$	příkon vedlejší (výsledné) spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení
$V_{\text{celkem oběh}} [km/h]$	oběhová rychlost

Výsledný gradient v tabulce (viz Obrázek 19) po součtu výsledného gradientu (počáteční podmínka) a příkonu (suma příkonu pro provoz a odstav) děleného oběhovou rychlostí dosahuje hodnoty 4,60 kWh/km. Vzhledem k tomu, že uvedená hodnota zahrnuje i odstav v žst., je v modelu uveden gradient nezahrnující odstavy. To znamená, že namísto hodnoty  $V_{\text{celkem oběh}}$  model počítá s  $V_{\text{celkem oběh, bez odstavů}}$  a zároveň je uvažováno s příkonem pouze pro provoz. Tento zmíněný gradient má hodnotu menší, konkrétně 3,73 kWh.

### Rozdíl počáteční a koncové kapacity trakčního akumulátoru

Tato veličina porovnává rozdíl mezi počáteční kapacitou trakčního akumulátoru (zadáno v rámci počátečních podmínek) a stavu na konci oběhu. Definiční vztah zmíněné veličiny je následující:

$$E_{rozdl} = E_{stav\ aku} - E_{poč}$$

kde:

$E_{rozdl}$ [kWh]	Rozdíl počáteční a koncové kapacity trakčního akumulátoru
$E_{stav-aku}$ [kWh]	Konečný stav akumulátorové baterie
$E_{poč}$ [kWh]	Počáteční stav akumulátoru (viz kapitola 4.2.3)

Rozdíl počáteční a koncové kapacity trakčního akumulátoru je roven rozdílu konečného stavu akumulátoru na konci oběhu (vozidlo může končit oběh v žst. A nebo na konci širé trati, viz kapitola 4.2) a počáteční hodnoty zadané v již zmíněných počátečních podmínkách. Jako příklad je v tabulce (viz Obrázek 19) stanovena výsledná hodnota 150,00 kWh (počáteční stav akumulátoru činil 200,00 kWh a koncový 350,00 kWh).

### Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci

Veličina určující bilanci obnovené energie. Jedná se o obnovenou energii pro vyrovnanou bilanci, tedy kolik energie bylo dodáno navíc při nabíjení od plně nabitého akumulátoru. Výsledná hodnota je stanovena na základě následujícího definičního vztahu:

$$E_{obnova, bilance} = E_{obnova, celkem} - E_{rozdl}$$

$E_{obnova, bilance}$ [kWh]	Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci
$E_{obnova, celkem}$ [kWh]	Celková obnovená energie
$E_{rozdl}$ [kWh]	Rozdíl počáteční a koncové kapacity trakčního akumulátoru

Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci je veličina, která vychází z rozdílu celkové obnovené energie trakčního akumulátoru a rozdílu počáteční a koncové energie. Počáteční stav akumulátoru činil 200,00 kWh, pro úplné nabití akumulátoru (při disponibilní energii 350,00 kWh) tedy bylo zapotřebí 150,00 kWh ( $E_{rozdl}$ ). Během oběhu však docházelo k poklesu energie v akumulátoru. Z toho vyplývá, že bylo zapotřebí obnovit 396,67 kWh. Hodnota bilance v tabulce (viz Obrázek 19) činí 246,67 kWh (kolik energie od plného nabití akumulátoru bylo navíc obnoveno).



Celkové výsledky			
Celková ujetá vzdálenost během oběhu	$L_{\text{celkem oběh}}$	200,00	km
Celková doba provozu jednotky během oběhu	$T_{\text{celkem oběh}}$	8:40	hh:mm
Celková doba provozu jednotky během oběhu (bez nočních odstavů)	$T_{\text{celkem oběh, bez odstavů}}$	8:40	hh:mm
Oběhová rychlost	$V_{\text{celkem oběh}}$	23,08	km/h
Oběhová rychlost (bez nočních odstavů)	$V_{\text{celkem oběh, bez odstavů}}$	23,08	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	$E_L$ , celkem oběh	160,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	$E_T$ , celkem oběh	86,67	kWh
Spotřeba energie cekem z akumulátoru	$E_{\text{celkem, oběh}}$	246,67	kWh
Výsledný gradient spotřeby	$e_L$ , výsledný	1,23	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení	$e_L$ , bez dobíjení	4,60	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení (bez nočních odstavů)	$e_L$ , bez dobíjení a odstavů	3,73	kWh/km
Obnovená energie	$E_{\text{obnova, celkem}}$	396,67	kWh
Rozdíl konce a začátku	$E_{\text{rozdíl}}$	150,00	kWh
Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci	$E_{\text{obnova, bilance}}$	246,67	kWh
Možnost doby nabíjení	$T_{\text{celkem nabíjení}}$	6:30	hh:mm
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	$E_{\text{pro nabíjení aku z trakčního vedení, celkem}} (\eta)$	495,83	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	$E_{\text{pro jízdu pod trakčním vedením, celkem}} (\eta)$	240,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	$E_{\text{pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení, celkem}} (\eta)$	260,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	$E_{\text{celkem z trakčního vedení, celkem}} (\eta)$	995,83	kWh

Obrázek 19 - Tabulka z modelu se závěrečnými výsledky pro celý oběh

Zdroj: Autor

#### 4.2.5 Návrhy pro budoucí zpřesňování modelu

Prozatímním cílem samotného modelu není stanovení přesné spotřeby energie z trakčního akumulátoru. Spotřeba energie a z toho vyplývající i možný dojezd při využívání energie z akumulátoru je založen na dvousložkové metodě (viz kapitola 4.1). Z hlediska infrastruktury je úbytek energie v akumulátoru založen na již zmíněné vzdálenosti dvou bodů bez trakčního vedení, cestovní době nebo době pobytu. V případě samotného vozidla vychází z gradientu trakce a příkonu vedlejších pohonů. Tyto zmíněné parametry nejsou jediné, které ovlivňují využití energie z trakčního akumulátoru. Pro zpřesnění modelu je možné zahrnout další ovlivňující veličiny.

Hlavním možným rozšířením modelu je spotřeba energie během zrychlení či zpomalení jednotky. V případě zrychlení nastane rozdílná situace, kdy bude větší spotřeba energie z nulové rychlosti oproti zrychlení z rychlosti nenulové. Mezi další rozšíření patří výpočet se zpomalením. To je situace, kdy vozidlo nemusí odebírat energii pro pohon vozidla. Zároveň může využít rekuperační brzdění. V tomto případě si vozidlo vyrobí část energie a použije ji k obnově energie v trakčním akumulátoru. Na základě tohoto principu je možné prodloužit vzdálenost pro dojezd jednotek BEMU.

Pro další zpřesnění výsledků je možné do modelu zahrnout směrové a výškové vedení tratě a s tím související jednotlivé odpory (odporové síly působící na jedoucí vozidlo, respektive vlak). Také lze zpřesnit model o započítání odporu vzduchu (rozdílná hustota vzduchu vlivem počasí – teplota, vlhkost) a odpor valivý. Zároveň zpřesnění výsledku je možné na základě rozdělení mezistaničních úseků na více částí, například na jednotlivé zastávky. Z hlediska nabíjení akumulátoru je možné v modelu rozšířit rozklad nabíjení i na další navazující úseky. Stávající princip je založen pouze na rozkladu mezi žst. a následný mezistaniční úsek (viz kapitola 4.2.3.4). Důsledkem by bylo možné snížení rezervy nabíjení, které je v rámci verze modelu pro tuto práci uvažován 50 %. Při rozšíření by daná hodnota mohla klesnout až na 10 % i nižší.

## 5 MODELOVÉ SITUACE PROVOZNÍHO NASAZENÍ JEDNOTEK BEMU V MODELU

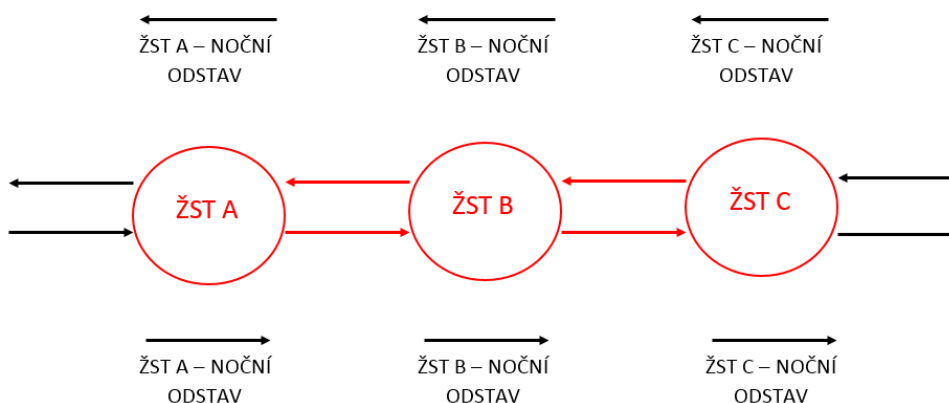
V této kapitole jsou uvedeny některé modelové situace nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu. Situace byly zpracovány v modelu vytvořeném v rámci této práce. Cílem je ověřit varianty vztahu úrovně nabití akumulátoru jednotky BEMU, jejího provozního nasazení a vybavení železniční infrastruktury trakčními zařízeními.

### 5.1 Modelová situace číslo 1

#### 5.1.1 Popis situace

V první modelové situaci je trakční vedení pouze v jedné obrátové žst., konkrétně v žst. A.

Jednotka BEMU je výchozí ze žst. A, odkud pokračuje do mezilehlé žst. B. Zde proběhne křížování s protijedoucím vozidlem. Následně se jednotka pohybuje do žst. C, kde dojde k obratu jednotky. Stejná situace nastane i ve směru zpět. Pro názornost jsou části využitých úseků fiktivní trati na následujícím obrázku zvýrazněny červenou barvou (viz Obrázek 20).



Obrázek 20 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro modelovou situaci číslo 1

Zdroj: Autor

#### 5.1.2 Vstupní parametry

Možnost nabíjení jednotky BEMU je umožněno pouze v žst. A, kde se nachází trakční vedení. Limitní příkon je 1 000,00 kW.

Vzdálenost mezi žst. A a B je 25,00 km. Následný úsek, tedy mezi žst. B a C, dosahuje délky 20,00 km. Tyto vzdálenosti jsou zvoleny záměrně. Výrobci jednotek garantují dojezd v jednom směru mezi 40,00 až 60,00 km při možnosti nabíjení zvolené v této situaci (viz kapitola 3.2). Oběh začíná v 6:45, tedy v čase přistavení jednotky pro nástup cestujících. Po 20 min. vozidlo opouští žst. A (v čase 7:05) a za 35 min. přijede do žst. B. Zde probíhá křížování s protijedoucí jednotkou a doba pobytu činí 10 min. Následně pokračuje 25 min. do žst. C,

kde probíhá obrat (20 min.). Ve zpátečním směru jsou časové údaje totožné. Příjezd jednotky BEMU do žst. A je v 9:45. Doba pobytu je 20 min. V 10:05 vozidlo opět opouští žst. A.

Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie je 500,00 kWh. Vzhledem k životnosti akumulátoru se uvažuje s 80 % kapacitou (viz kapitola 4.2.2.1), tedy disponibilní energie činí 400,00 kWh. Počáteční stav se rovná hodnotě 350,00 kWh. Energie v akumulátoru nesmí klesnout pod 20 % disponibilní energie (80,00 kWh). Gradient trakční spotřeby a příkon pro vedlejší spotřebu jsou uvažovány jako střední roční (viz kapitoly 4.2.2.2 a 4.2.2.3). Účinnost na vstupu do akumulátoru dosahuje 0,80.

Shrnutí uvedených veličin a jejich hodnot je v následující tabulce (viz Tabulka 3).

Tabulka 3 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 1

Veličina [značka]	Hodnota	Jednotky
Trakční vedení [-]	žst. A	-
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. A [-]	1 000,00	kW
Vzdálenost mezi žst. A a žst. B [-]	25,00	km
Vzdálenost mezi žst. B a žst. C [-]	20,00	km
Začátek oběhu [-]	6:45	hh:mm
Doba pobytu v žst. A [-]	0:20	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. A a žst. B [-]	0:35	hh:mm
Doba pobytu v žst. B [-]	0:10	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. B a žst. C [-]	0:25	hh:mm
Doba pobytu v žst. C [-]	0:20	hh:mm
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{jmen}$ ]	500,00	kWh
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{disp}$ ]	400,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{poč}$ ]	350,00	kWh
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{min}$ ]	80,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $e_L$ , výsledný]	3,00	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $P_V$ , výsledný]	40,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie [ $\eta$ ]	0,80	-

Zdroj: Autor

### 5.1.3 Vyhodnocení výstupních parametrů

Celkové výsledky			
Celková ujetá vzdálenost během oběhu	Lcelkem oběh	90,00	km
Celková doba provozu jednotky během oběhu	Tcelkem oběh	3:20	hh:mm
Celková doba provozu jednotky během oběhu (bez nočních odstavů)	Tcelkem oběh, bez odstavů	3:20	hh:mm
Oběhová rychlost	Vcelkem oběh	27,00	km/h
Oběhová rychlost (bez nočních odstavů)	Vcelkem oběh, bez odstavů	27,00	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	EL, celkem oběh	270,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	ET, celkem oběh	106,67	kWh
Spotřeba energie celkem z akumulátoru	Ecelkem, oběh	376,67	kWh
Výsledný gradient spotřeby	eL, výsledný	4,19	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení	eL, bez dobíjení	4,48	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení (bez nočních odstavů)	eL, bez dobíjení a odstavů	4,48	kWh/km
Obnovená energie	Eobnova, celkem	316,67	kWh
Rozdíl konce a začátku	Erozdíl	-60,00	kWh
Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci	Eobnova, bilance	376,67	kWh
Možnost doby nabíjení	Tcelkem nabíjení	0:40	hh:mm
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	Epro nabíjení aku z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	395,83	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	Epro jízdu pod trakčním vedením, celkem ( $\eta$ )	0,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	Epro vedlejší spotřebu z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	26,67	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	422,50	kWh

Obrázek 21 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 1

Zdroj: Autor

Souhrnná tabulka hodnot					
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST A	6:45	350,00	0,00	80,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	7:05	400,00	75,83	80,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST B	7:40	301,67	75,83	80,00	25,00
Čas odjezdu ze ŽST B	7:50	295,00	75,83	80,00	25,00
Čas příjezdu do ŽST C	8:15	218,33	75,83	80,00	45,00
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	8:35	205,00	75,83	80,00	45,00
Čas příjezdu do ŽST B	9:00	128,33	75,83	80,00	25,00
Čas odjezdu ze ŽST B	9:10	121,67	75,83	80,00	25,00
Čas příjezdu do ŽST A	9:45	23,33	75,83	80,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	10:05	290,00	422,50	80,00	0,00
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	80,00	NEJEDE

Obrázek 22 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 1

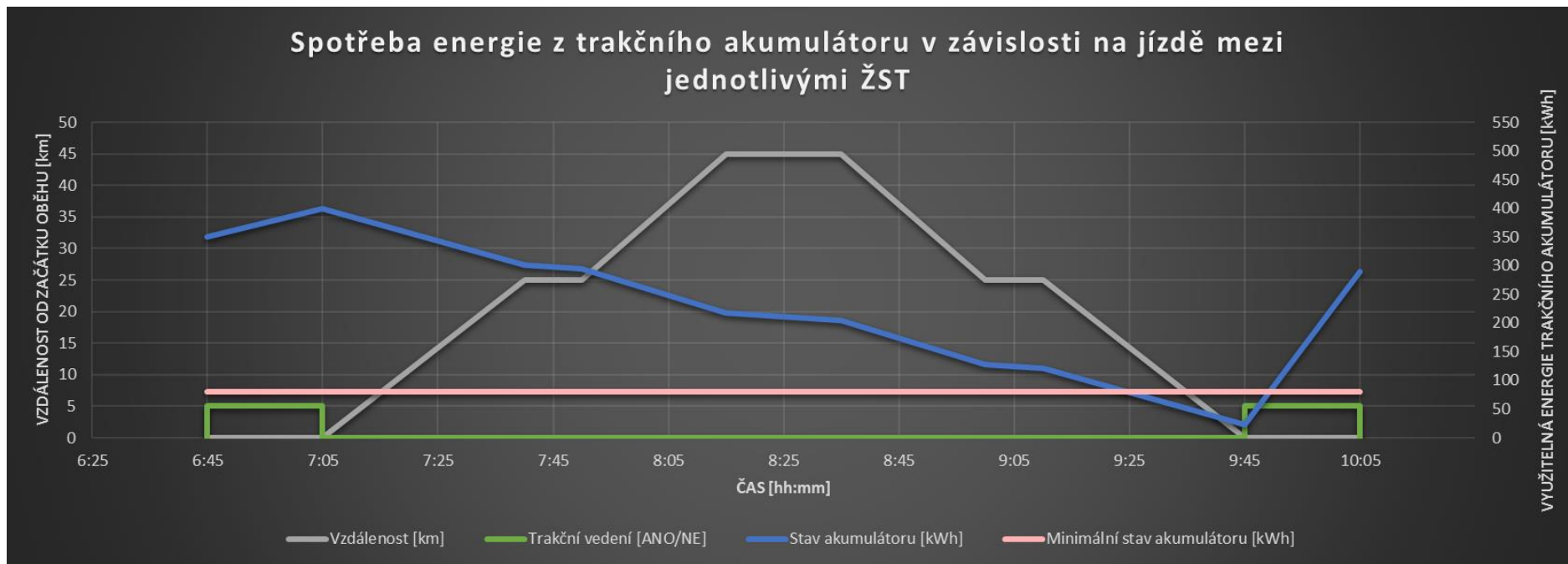
Zdroj: Autor

Celková doba oběhu trvala 3 hod. a 20 min. (není výskyt odstavů, hodnoty jsou tedy totožné jak pro dobu s odstavou, tak i bez), kdy jednotka ujela vzdálenost 90,00 km a cestovní rychlost činila 27,00 km/h. V oběhu je počítána i druhá doba pobytu v žst. A (20 min.). V případě, kdy nebude tento časový údaj brán v potaz, je doba oběhu 3 hod. s oběhovou rychlostí 30,00 km/h (vzdálenost zůstává stejná). Celkem bylo z akumulátoru spotřebováno 376,67 kWh. Výsledný gradient spotřeby dosahuje hodnoty 4,19 kWh/km a gradient bez vlivu dobíjení 4,48 kWh/km (vzhledem k tomu, že při oběhu nebyl žádný odstav, je hodnota totožná i pro veličiny gradientu s odstavou i bez odstavů). V trakčním akumulátoru bylo obnoveno 316,67 kWh během 40 min. Celková spotřeba energie z trakčního vedení činí 422,50 kWh, z toho pro nabíjení 395,83 kWh a 26,67 kWh pro pomocné pohony. Tyto shrnuté hodnoty jsou patrné v uvedené tabulce pro modelaci číslo 1 (viz Obrázek 21).

V předešlém odstavci byly shrnuty jednotlivé hodnoty, avšak nebylo stanoveno, zda jednotka BEMU zadaným provozním a infrastrukturním parametrům vyhovuje. Z tabulky pro jednotlivé úseky (viz Obrázek 22) je patrné, že jednotka nevyhovuje. V čase 7:05 opustilo vozidlo žst. A s plně nabitým trakčním akumulátorem (400,00 kWh). Při příjezdu do žst. C (v 8:15) disponoval trakční akumulátor 218,33 kWh energie. Následoval dvacetiminutový obrat, kdy jednotka spotřebovala pro pomocné pohony 13,33 kWh. V čase příjezdu do žst. A dosahovala energie akumulátoru méně než minimální energie. Konkrétně se jednalo o hodnotu 23,33 kWh. Během pobytu v žst. A nebyl trakční akumulátor plně nabit (pouze 290,00 kWh). Při následném oběhu by totiž jednotce chybělo pro zpětný návrat do výchozí žst. 86,67 kWh.

Ve zmíněné tabulce (viz Obrázek 22) jsou dále uvedené hodnoty týkající se odebrané energie ze sítě, respektive z trakčního vedení. K jejímu nárůstu dochází při odjezdu ze žst. A (v 7:05), kde probíhalo nabíjení trakčního akumulátoru během doby pobytu. Následně je tato hodnota konstantní, jelikož v žádném úseku se nenachází trakční vedení, tudíž neprobíhá nabíjení. Zvýšení hodnoty odběru je opět při odjezdu jednotky BEMU ze žst. A, konkrétně na hodnotu 422,50 kWh.

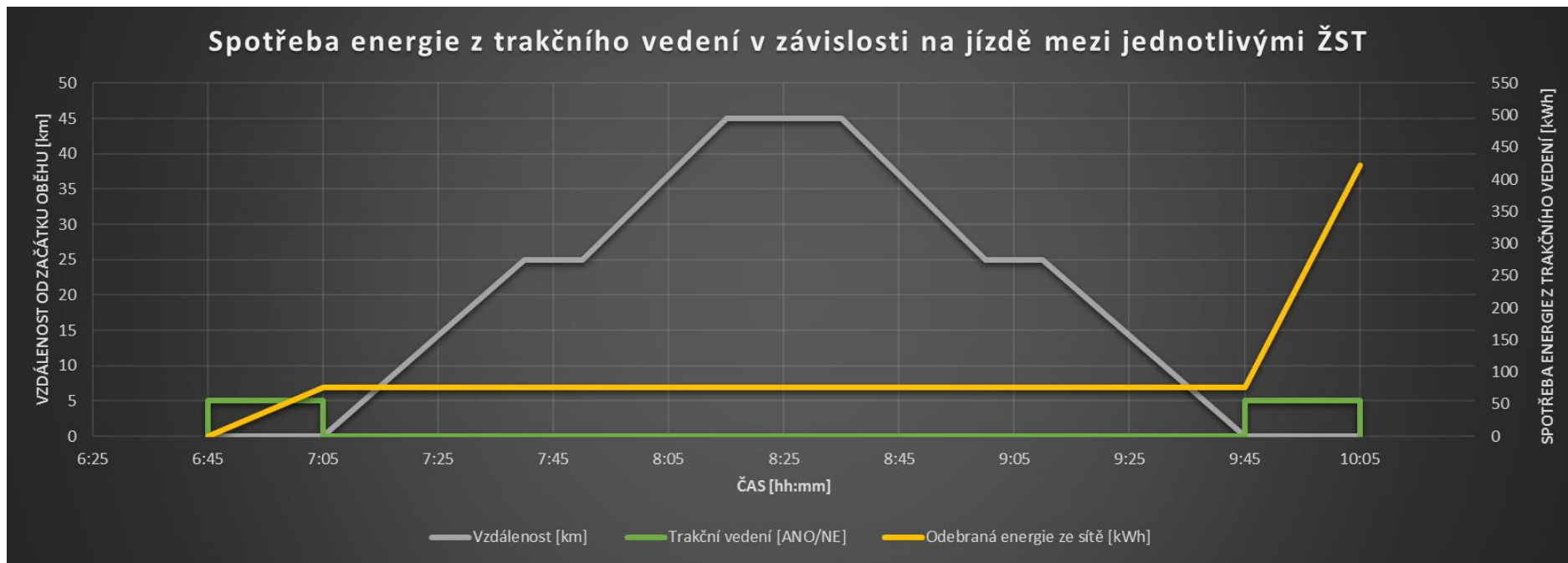
Mezi další hodnoty v tabulce (viz Obrázek 22) patří minimální energie trakčního akumulátoru. Ta je uvedena u všech úseků i přes to, že se jednotka BEMU v některých nenachází. Na závěr je uvedena vzdálenost od výchozího bodu, kterým je v dané situaci žst. A. V následujících grafech (viz Graf 3 a Graf 4) je tento průběh znázorněn šedivou křivkou, kdy při nulové hodnotě se jednotka nachází ve zmíněné žst. A.



Graf 3 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1

Zdroj: Autor





Graf 4 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1

Zdroj: Autor

Mezi výstupní parametry patří grafické znázornění spotřeb energie z trakčního akumulátoru a trakčního vedení.

Spotřeba energie z trakčního akumulátoru je znázorněna na prvním uvedeném grafu (viz Graf 3). Na vodorovné ose je uveden čas, během které došlo k oběhu jednotky. Na hlavní svislé ose je uvedena vzdálenost od výchozího bodu. V grafu je tento průběh v čase znázorněn šedivou barvou. Při nulové hodnotě se jednotka BEMU nachází v žst. A. Hodnota v čase narůstá až na 25,00 km, kde dochází k jejímu ustálení a v čase se nemění (pobyt vozidla v žst. B). Po uplynutí doby pobytu v žst. B (10 min.) narůstá hodnota až na 45,00 km. Jedná se o vzdálenost žst. C od žst. A. V druhé části grafu je průběh vzdálenosti v čase zrcadlově otočený. To znamená, že dochází k poklesu vzdálenosti (vozidlo se přibližuje do výchozího bodu). Růžovou barvou je v grafu znázorněna hranice minimální kapacity akumulátoru, která dle zadání je 80,00 kWh. Pro názornost je v grafu uvedeno místo s trakčním vedením (zelená barva). V případě úseku s liniovou elektrizací dosahuje hodnoty „5“, v opačné situaci hodnoty „0“. Hlavním grafickým znázorněním je průběh energie trakčního akumulátoru v čase, znázorněný modrou barvou (vedlejší svislá osa). V době přistavení vozidla k nástupišti disponuje trakční akumulátor kapacitou 350,00 kWh. Během doby pobytu v žst. A dochází k pozvolnému nabíjení. V grafu je to viditelné nárůstem až na hodnotu 400,00 kWh. Při pohybu jednotky BEMU v úsecích bez trakčního vedení je patrný úbytek energie. V úseku, kde se vozidlo pohybuje, spotřebovává větší množství energie (energie pro pohyb a pomocné pohony) než během pobytu v žst. (energie pouze pro pomocné pohony). Střídání těchto situací je v grafu zřejmé pozvolným (vozidlo v žst.) a prudkým (vozidlo v mezistaničním úseku) poklesem modré křivky. Opětovný nárůst energie je znatelný při příjezdu jednotky BEMU do žst. A a následném nabíjení na hodnotu 290,00 kWh. Jak již bylo zmíněno u shrnutí hodnot z tabulek, energie v akumulátoru klesla pod minimální hodnotu. Toto tvrzení je zřejmé i v uvedeném grafu.

Druhý graf (viz Graf 4) znázorňuje spotřebu energie z trakčního vedení. Spotřeba v závislosti na čase je znázorněna žlutou barvou (vedlejší svislá osa). Nárůst spotřeby nastává v případě doby pobytu jednotky BEMU v žst. A. Energie je využívána pro nabíjení akumulátoru a provoz pomocných pohonů. První nárůst spotřeby nastává během přistavení vozidla pro nástup cestujících, kdy trakční akumulátor nebyl plně nabit. Spotřeba je následně konstantní. K jejímu opětovnému zvýšení dochází v době, kdy se vozidlo opět nachází v žst. A. Probíhá obnova energie v trakčním akumulátoru a spotřeba energie pro pomocné pohony. V grafu jsou zároveň znázorněny vzdálenosti od žst. A a přítomnost trakčního vedení v jednotlivých úsecích (viz předchozí odstavec). Zároveň hlavní vodorovná osa uvádí čas, jako v případě předchozího grafu.

#### 5.1.4 Závěr modelové situace a návrh řešení

Na základě výstupů z předchozí kapitoly (viz kapitola 5.1.3) je nasazení jednotek do pravidelného provozu na zvolenou fiktivní trať nevhodný. Z tohoto důvodu nedošlo k následnému prověření například vzniku nepravidelností ani změn hodnot gradientu trakční spotřeby a příkonu pro vedlejší pohony.

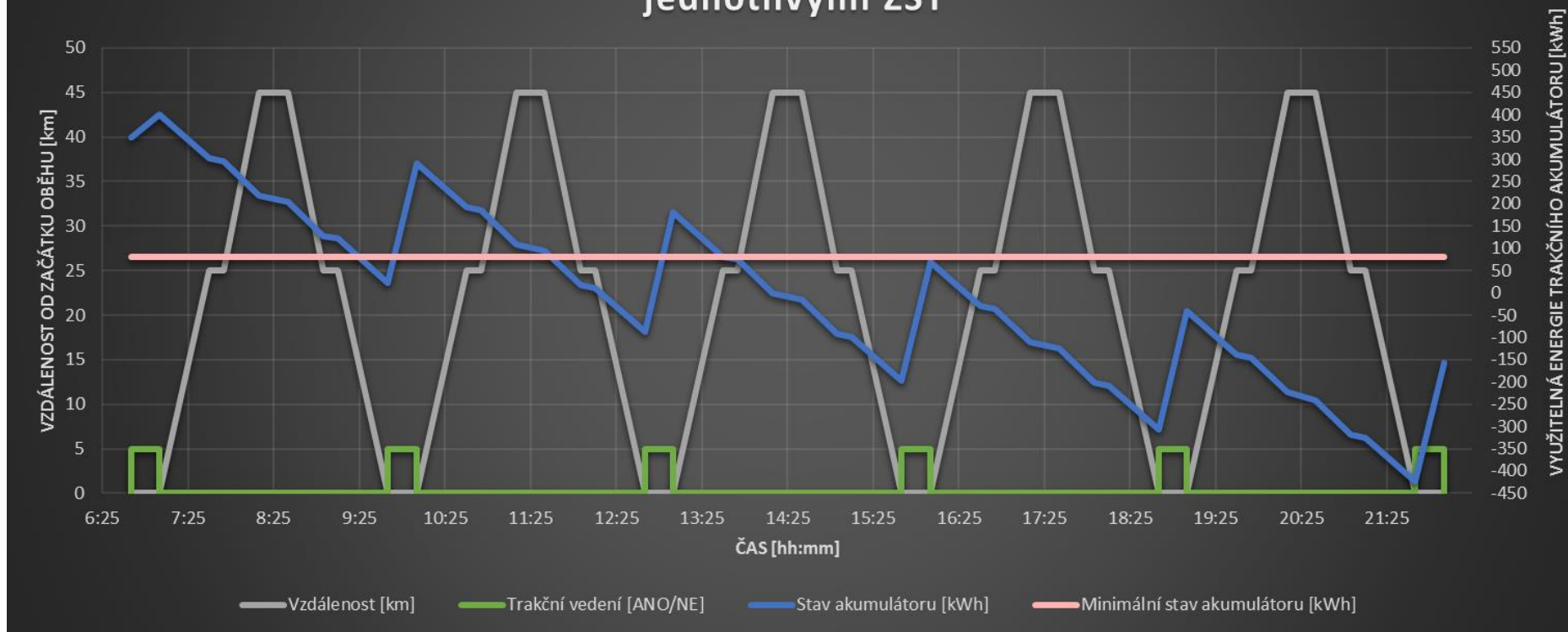
Kapacita akumulátoru nedosahuje na konci oběhu nulových hodnot, ale je menší než požadovaná minimální kapacita. Zároveň během doby pobytu v žst. A (20 min.) nedojde k plné obnově energie v trakčním akumulátoru. To má za následek, že v následujícím oběhu bude vozidlu chybět 86,67 kWh energie. V případě, že by akumulátor měl navýšenou kapacitu o zmíněnou hodnotu, při následujícím oběhu by se kapacita rovnala nule. Zmíněné hodnoty byly ověřeny v modelu s oběhy (viz Graf 5). Na uvedeném grafu je patrný nedostatek energie v trakčním akumulátoru během každého následujícího oběhu vlivem nedostatku nabití během pobytu v žst. A.

Jedním z možných řešení je navýšení kapacity trakčního akumulátoru na hodnotu 700,00 kWh, při 80 % využitelnosti 560,00 kWh. Akumulátorem s touto kapacitou má disponovat jednotka Siemens Mireo Plus B (viz Tabulka 2). Spotřeba energie za jeden oběh činí 376,67 kWh. Zbylá kapacita by dosahovala hodnoty 183,33 kWh. Z toho vyplývá, že nedojde k situaci s překročením minimální kapacity. Opětovný problém nastává s obnovou energie. Během doby pobytu v žst. A (20 min.) by došlo k nabití akumulátoru pouze na hodnotu 450,00 kWh. Důsledek spočívá v nedostatku energie při následujícím oběhu. Pro plnou obnovu trakčního akumulátoru je zapotřebí doba pobytu minimálně 29 min.

Z hlediska provozního nastává možnost prodloužení doby pobytu v žst. A, a to konkrétně o 9 min. Jedná se o totožný čas, který byl již uveden v předchozím odstavci. Zde je ale uvažováno se zadanou disponibilní hodnotou energie trakčního akumulátoru.

Dalším řešením, týkajícím se infrastruktury, je vybudování alespoň částečné nabíjecí stanice v žst. C. Limitní příkon pro ověření úvahy autora této práce byl v modelu zvolen 500,00 kW. Při příjezdu do zmíněné žst. by trakční akumulátor disponoval energií 218,33 kWh. Obnovená energie během doby pobytu (20 min.) činí 133,34 kWh. Výsledná kapacita je 351,67 kWh (při odjezdu ze žst. C). V době příjezdu do žst. A disponuje trakční akumulátor energií 170,00 kWh. V případě vybudování částečné nabíjecí stanice (stanice o menším limitním příkonu, než běžné trakční vedení) by musela proběhnout analýza ohledně změny gradientu trakce, příkonu vedlejší spotřeby a vzniku nepravidelnosti vzhledem k pravidelnému provozu (například zpoždění křižování).

## Spotřeba energie z trakčního akumulátoru v závislosti na jízdě mezi jednotlivými ŽST



Graf 5 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během následujících oběhů jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1

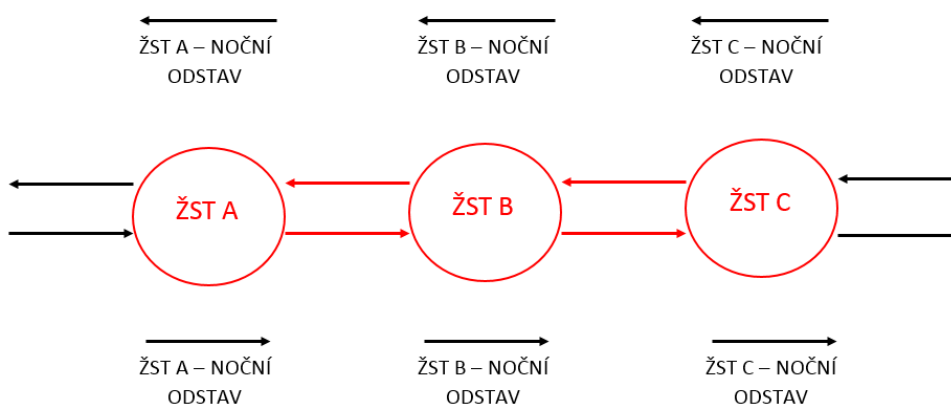
Zdroj: Autor

## 5.2 Modelová situace číslo 2

### 5.2.1 Popis situace

V rámci dané modelové situace se trakční vedení nachází v obou obratových stanicích, tedy v žst. A a žst. C.

Výchozí stanicí je opět žst. A. Jednotka BEMU pokračuje do mezilehlé žst. B, kde proběhne křižování s jednotkou jedoucí v opačném směru. Po uplynutí doby pobytu vozidlo pokračuje do žst. C, kde následně dojde k obratu. Stejná situace nastane i ve směru zpět. Pro zpřehlednění zadání jsou části využitých úseků fiktivní trati na následujícím obrázku zvýrazněny červenou barvou (viz Obrázek 23).



Obrázek 23 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro modelovou situaci číslo 2

Zdroj: Autor

### 5.2.2 Vstupní parametry

Nabíjení trakčního akumulátoru je v rámci této situace umožněno v žst. A a C. Tyto zmíněné stanice disponují trakčním vedením o limitním příkonu 1 000,00 kW.

Celková vzdálenost úseku bez trakčního vedení dosahuje délky 90,00 km. Konkrétně se jedná o 40,00 km mezi žst. A a B a navazujícím úseku mezi žst. B a C 50,00 km. Zmíněné vzdálenosti byly opět zvoleny záměrně. Ve většině případů je výrobcem jednotek BEMU garantován dojezd mezi 80,00 až 120,00 km (viz Tabulka 2), jestliže infrastruktura umožňuje obnovení energie v trakčním akumulátoru v obou obratových žst. Simulovaný oběh začíná v 6:40. Jedná se o časový údaj, kdy samotné vozidlo je přistaveno k nástupišti pro nástup cestujících. Po době pobytu trvající 25 min. vozidlo pokračuje směrem do žst. B. Cestovní doba mezi žst. A a žst. B činí 40 min. V žst. B probíhá křižování s protijedoucím vozidlem během doby pobytu 10 min. Následuje cestovní doba 45 min. mezi žst. B a C. V poslední zmíněné žst. probíhá obrat jednotky včetně možnosti nabíjení. Doba pobytu je 25 min. Při zpáteční jízdě do žst. A jsou časové údaje totožné. Jednotka přijíždí do žst. A v čase 10:40.

Odjezd jednotky BEMU ze žst. A do žst. C je opět po 25 min. pobytu, tedy v 11:05.

Trakční akumulátorová baterie dosahuje v této simulaci jmenovité energie 700,00 kWh. Akumulátorem s touto kapacitou má disponovat dle výrobcem uvedených parametrů jednotka Siemens Mireo Plus B (viz Tabulka 2). Stejně, jako při první simulaci, byla zohledněna životnost akumulátoru. Disponibilní energie činí 560,00 kWh (80 % kapacity akumulátoru, viz kapitola 4.2.2.1). Počáteční stav energie v trakčním akumulátoru se rovná hodnotě 350,00 kWh. Minimální energie se rovná 20 % kapacity disponibilní energie, tedy 112,00 kWh. Gradient trakční spotřeby a příkon pro vedlejší spotřebu jsou uvažovány, jako střední roční (viz kapitoly 4.2.2.2 a 4.2.2.3). Účinnost na vstupu do akumulátoru při nabíjení, respektive účinnost na sběrači, dosahuje 0,80.

Shrnutí uvedených veličin a jejich hodnot je v následující tabulce (viz Tabulka 4).

Tabulka 4 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 2

Veličina [značka]	Hodnota	Jednotky
Trakční vedení [-]	žst. A žst. C	-
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. A [-]	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. C [-]	1 000,00	kW
Vzdálenost mezi žst. A a žst. B [-]	40,00	km
Vzdálenost mezi žst. B a žst. C [-]	50,00	km
Začátek oběhu [-]	6:40	hh:mm
Doba pobytu v žst. A [-]	0:25	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. A a žst. B [-]	0:40	hh:mm
Doba pobytu v žst. B [-]	0:10	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. B a žst. C [-]	0:45	hh:mm
Doba pobytu v žst. C [-]	0:25	hh:mm
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{jmen}$ ]	700,00	kWh
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{disp}$ ]	560,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{poč}$ ]	350,00	kWh
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{min}$ ]	112,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $e_L$ , výsledný]	3,00	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $P_V$ , výsledný]	40,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie [ $\eta$ ]	0,80	-

Zdroj: Autor

### 5.2.3 Vyhodnocení výstupních parametrů

Celkové výsledky			
Celková ujetá vzdálenost během oběhu	Lcelkem oběh	180,00	km
Celková doba provozu jednotky během oběhu	Tcelkem oběh	4:25	hh:mm
Celková doba provozu jednotky během oběhu (bez nočních odstavů)	Tcelkem oběh, bez odstavů	4:25	hh:mm
Oběhová rychlost	Vcelkem oběh	40,75	km/h
Oběhová rychlost (bez nočních odstavů)	Vcelkem oběh, bez odstavů	40,75	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	EL, celkem oběh	540,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	ET, celkem oběh	126,67	kWh
Spotřeba energie celkem z akumulátoru	Ecelkem, oběh	666,67	kWh
Výsledný gradient spotřeby	eL, výsledný	3,70	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení	eL, bez dobíjení	3,98	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení (bez nočních odstavů)	eL, bez dobíjení a odstavů	3,98	kWh/km
Obnovená energie	Eobnova, celkem	876,67	kWh
Rozdíl konce a začátku	Erozdíl	210,00	kWh
Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci	Eobnova, bilance	666,67	kWh
Možnost doby nabíjení	Tcelkem nabíjení	1:15	hh:mm
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	Epro nabíjení aku z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	1 095,83	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	Epro jízdu pod trakčním vedením, celkem ( $\eta$ )	0,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	Epro vedlejší spotřebu z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	50,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	1 145,83	kWh

Obrázek 24 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 2

Zdroj: Autor



Souhrnná tabulka hodnot					
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST A	6:40	350,00	0,00	112,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	7:05	560,00	279,17	112,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST B	7:45	413,33	279,17	112,00	40,00
Čas odjezdu ze ŽST B	7:55	406,67	279,17	112,00	40,00
Čas příjezdu do ŽST C	8:40	226,67	279,17	112,00	90,00
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	9:05	560,00	712,50	112,00	90,00
Čas příjezdu do ŽST B	9:50	380,00	712,50	112,00	40,00
Čas odjezdu ze ŽST B	10:00	373,33	712,50	112,00	40,00
Čas příjezdu do ŽST A	10:40	226,67	712,50	112,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	11:05	560,00	1145,83	112,00	0,00
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE

Obrázek 25 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 2

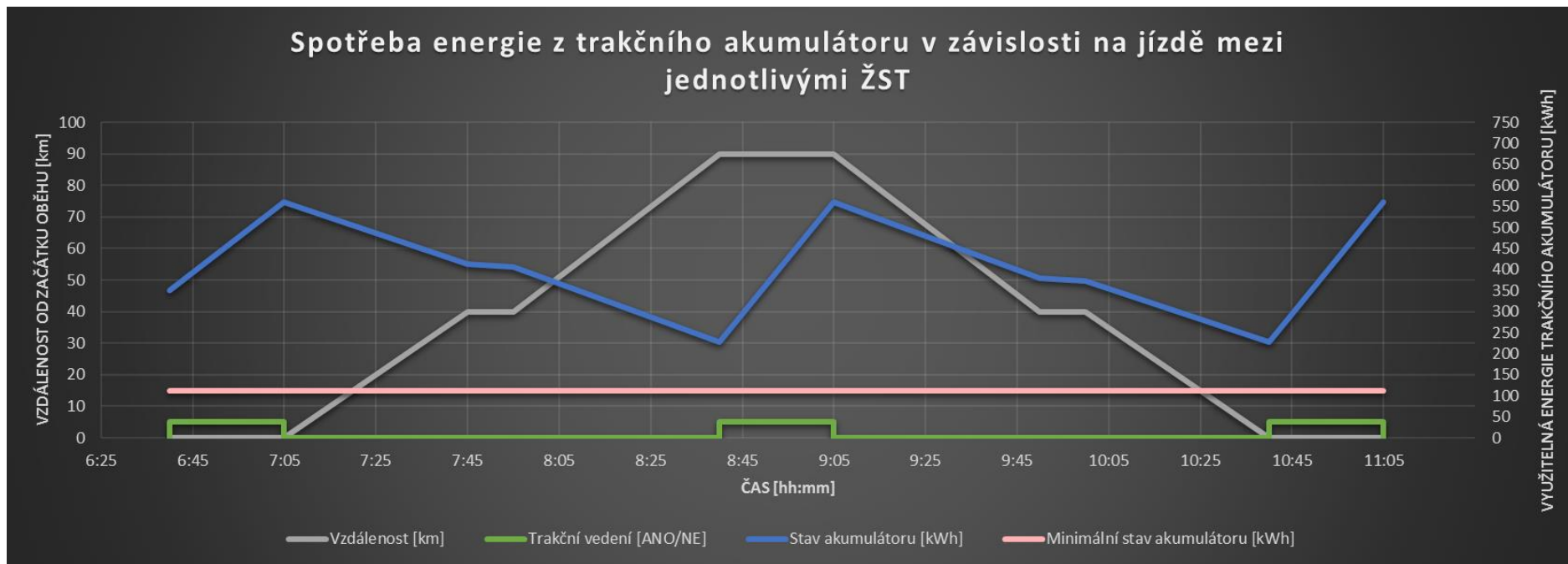
Zdroj: Autor

Doba oběhu trvala 4 hod. a 25 min. (není odstav, hodnoty totožné u doby pro odstav i bez odstavů). Za zmíněnou dobu ujela jednotka vzdálenost 180,00 km při oběhové rychlosti 40,75 km/h. V rámci modelace oběhu je zahrnut i druhý pobyt v žst. A (25 min.). Pro případ, že tato doba pobytu nebude brána v potaz, je následná hodnota doby oběhu 4 hod. a oběhová rychlost 45,00 km/h (celkem ujetá vzdálenost během oběhu se nemění). Z trakčního akumulátoru byla spotřebována energie o hodnotě 666,67 kWh. Na jeden kilometr oběhu (včetně druhého pobytu v žst. A) jednotka spotřebovala 3,70 kWh (gradient spotřeby). V případě nezahrnutí nabíjení, dosahuje gradient hodnoty vyšší a to 3,98 kWh/km (oběh bez odstavů, hodnoty pro oba gradienty totožné). V trakčním akumulátoru bylo obměněno celkem 876,67 kWh, během možné doby dobíjení činící 1 hod. a 15 min. Z trakčního vedení bylo nejen pro obnovu energie v akumulátoru, ale i provozní pohony odebráno 1 145,83 kWh, z toho největší podíl tvořila energie pro nabíjení. Zmíněná veličina dosahuje hodnoty 1 095,83 kWh. Zmíněné hodnoty vycházející z tabulky modelu (viz Obrázek 24).

Na základě této simulace je patrné, že trať s danými parametry a zvolená jednotka BEMU umožňuje nasazení do pravidelného provozu. Z tabulky uvádějící jednotlivé hodnoty v jednotlivých úsecích (viz Obrázek 25) vyplývá, že vozidlo je schopno během doby pobytu (25 min.) v obratových stanicích obnovit energii v trakčním akumulátoru (560,00 kWh). Při příjezdu do žst. A i C vozidlo disponovalo trakční energií 226,67 kWh v trakčním akumulátoru.

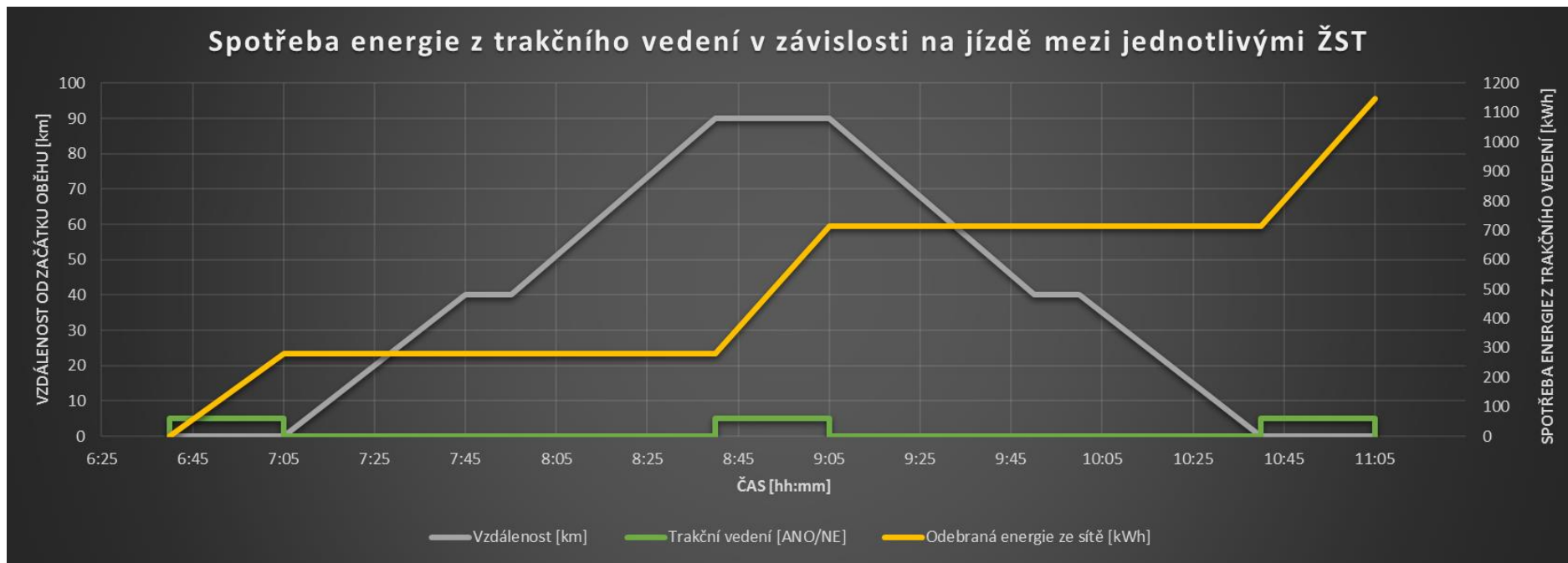
Mezi další znázorněné hodnoty v uvedené tabulce (viz Obrázek 25) patří spotřeba energie ze sítě. Nárůst spotřeby nastává vždy v místě obratových stanic, respektive v případě nabíjení trakčního akumulátoru. Během prvního pobytu v žst. A činila odebraná energie ze sítě 279,17 kWh. Při pobytu v žst. C došlo k nárůstu o 433,33 kWh. Tento nárůst byl odůvodněn, oproti předchozímu nárůstu, menší energií v trakčním akumulátoru. Ke stejné spotřebě došlo i během následné doby pobytu v žst. A, kde v čase odjezdu jednotky ze zmíněné žst. činila výsledná spotřeba energie z trakčního vedení 1 145,83 kWh.

V tabulce (viz Obrázek 25) je uvedena hodnota minimální energie trakčního akumulátoru. I přes to, že se vozidlo v některých úsecích nenachází, je zmíněná hodnota zde uvedena. Na závěr je uvedena vzdálenost od výchozího bodu, kterým je v dané situaci žst. A. Výchozí bod je znázorněn v následujících grafech (viz Graf 6 a Graf 7) nulovou hodnotou šedivé křivky.



Graf 6 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2

Zdroj: Autor



Graf 7 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2

Zdroj: Autor

Výstupy dané simulace jsou graficky znázorněné spotřeby energie z trakčního akumulátoru a z trakčního vedení pro nabíjení a provoz jednotky.

První grafické znázornění představuje spotřebu energie z trakčního akumulátoru (viz Graf 6). Vodorovná hlavní osa znázorňuje čas, kdy v dané době došlo k průběhu oběhu jednotky BEMU. Hodnoty na hlavní svislé ose určují vzdálenost od výchozího bodu do koncové stanice a zpět. Výchozí bod v této simulaci tvoří opět žst. A, kde vzdálenost je 0,00 km. Po uplynutí doby pobytu (25 min.) dochází k nárůstu šedivé křivky na hodnotu 40,00 km. Zde se křivka v čase nemění a je konstantní. To znázorňuje pobyt v žst. B. Následuje opět nárůst křivky v čase na hodnotu 90,00 km. Zmíněná křivka představuje jízdu jednotky BEMU mezi žst. B a C. Následuje lineární křivka v čase. Jedná se o pobyt v žst. C. V druhé části grafu je průběh vzdálenosti v čase zrcadlově otočený (klesá směrem k výchozímu bodu). Růžovou barvou je v grafu znázorněna minimální kapacita trakčního akumulátoru. Dle zadání je tato hodnota 112,00 kWh (viz Tabulka 4). Z grafu je patrné, že energie v trakčním akumulátoru během oběhu pod tuto hodnotu neklesne. Pro názornost jsou v grafu vyznačeny úseky s trakčním vedením (zelená barva). V případě úseku s liniovou elektrizací dosahuje hodnoty „5“, v opačné situaci hodnoty „0“. Mezi hlavní grafický výstup patří stav energie trakčního akumulátoru a průběh změn během jízdy. V grafu je tento průběh znázorněn modrou barvou (vedlejší svislá osa). Při přistavení jednotky pro nástup cestujících disponoval akumulátor energií 350,00 kWh. Následuje nárůst modré křivky v čase na hodnotu 560,00 kWh. Tento nárůst představuje nabíjení akumulátoru v žst. A. Po uplynutí doby pobytu (25 min.) modrá křivka klesá, znázorňuje pohyb jednotky směrem do žst. C po úsecích bez liniové elektrizace. Na křivce je patrný úsek, kdy pokles úbytku energie trakčního akumulátoru je pozvolnější. Zde se jednotka nacházela v žst. B, tudíž z trakčního akumulátoru byla odebírána energie pouze pro pomocné pohony. V čase 8:40 je patrný začátek nárůstu energie v trakčním akumulátoru z hodnoty 226,67 kWh na 560,00 kWh. V tento časový údaj přijelo vozidlo do žst. C a započala obnova energie v trakčním akumulátoru na disponibilní energii. Následuje totožný průběh modré křivky při zpáteční cestě ze žst. C do žst. A.

Další grafický výstup (viz Graf 7) reprezentuje spotřebu energie z trakčního vedení pro obnovu energie v trakčním akumulátoru a provoz pomocných pohonů při pobytu v žst. (vedlejší svislá osa). Jednotlivé změny nárůstu spotřeby nastávají v časových intervalech, kdy se jednotka BEMU nacházela v žst. A nebo C. V ostatních částech je křivka v čase lineární (odběr energie z trakčního akumulátoru). V grafu jsou zároveň znázorněny vzdálenosti od žst. A a přítomnost trakčního vedení v jednotlivých úsecích (viz předchozí odstavec). Změny spotřeby energie a vzdálenost od žst. A se mění v čase, který je znázorněn na hlavní vodorovné ose.

#### 5.2.4 Závěr modelové situace a návrh řešení

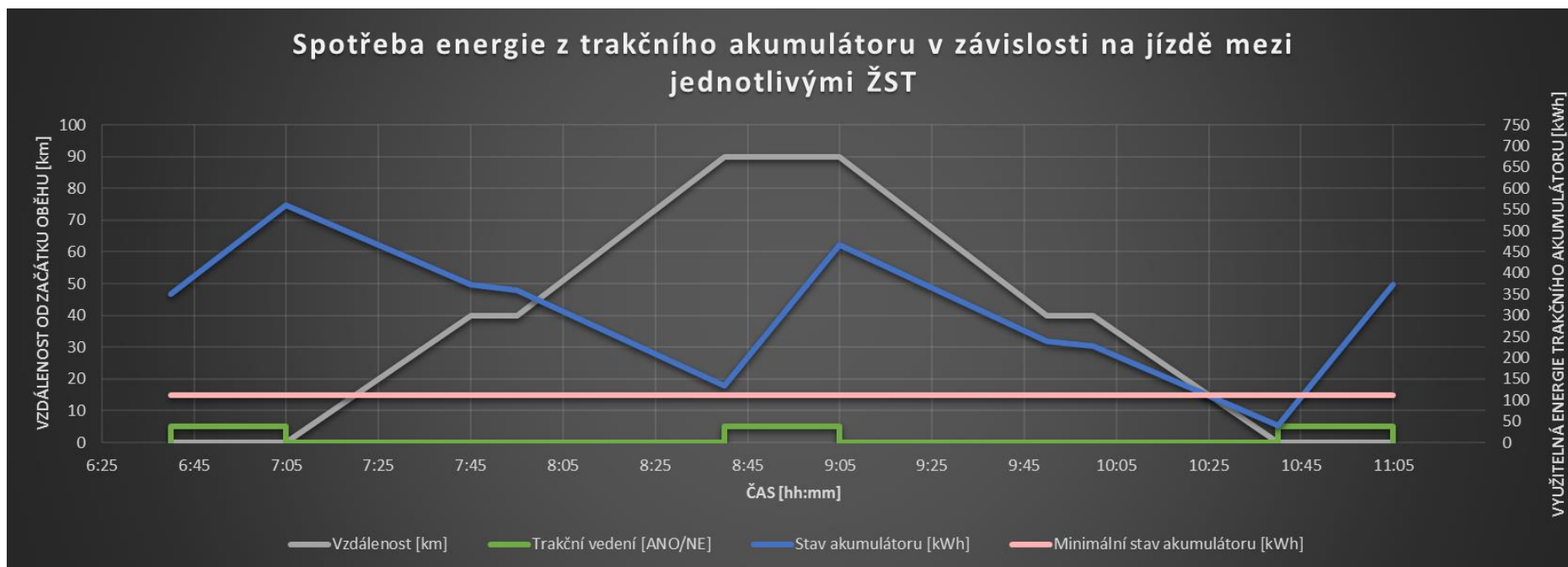
Z jednotlivých výstupů v předchozí kapitole (viz kapitola 5.2.4) vyplývá, že nasazení jednotek BEMU na zvolené fiktivní trati do pravidelného provozu je vhodné. Je ale zapotřebí brát v potaz prověření jednotek při vzniku nepravidelností nebo změnu koeficientu gradientu trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení a příkonu vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení. Zmíněné změny koeficientů byly pro názornost prověřeny.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této modelové situace (viz kapitola 5.2.2), gradient trakční spotřeby a příkon vedlejší spotřeby byl zvolen jako střední roční. Pro následné prověření byly využity extrémní hodnoty. Ty byly nastaveny na základě koeficientů (viz kapitola 4.2.2.2 a 4.2.2.3) uvedené v tabulce se vstupními parametry (viz Tabulka 4). Pro gradient trakční spotřeby byl zvolen koeficient 0,90 a pro příkon vedlejší spotřeby 0,50. Výsledné hodnoty využitě pro prověřovací simulaci dosahovaly hodnot 3,33 kWh pro gradient a 80,00 kWh pro příkon vedlejší spotřeby. Výsledný výstup je znázorněn na následujícím grafu (viz Graf 8).

Z následujícího grafického výstupu (viz Graf 8) je patrné, že například v zimních měsících (zvýšená spotřeba energie pro vytápění jednotky) by jednotka nemohla být nasazena v pravidelném provozu. Během pobytu v žst. C by nedošlo k plné obnově energie v trakčním akumulátoru a při příjezdu do žst. A by nastal pokles energie v akumulátoru pod stanovenou minimální hodnotu. Stejně, jako v žst. C by nebyla plně obnovena energie v trakčním akumulátoru. To má za následek, že v následujících obězích by jednotka nedisponovala dostatečnou energií. Jedním z možných řešení je prodloužení doby pobytu v žst. A a C, konkrétně o 7 min. (výsledná doba pobytu 32 min.). Za zmíněný časový údaj by došlo k úplnému nabití trakčního akumulátoru. Je zde ale zapotřebí zmínit, že nedošlo k prověření například doby pobytu mezi žst. z důvodu nepravidelnosti. Jednalo by se o další prověření, kdy v modelu uživatel musí prodloužit jízdní dobu.

Nasazení jednotky s vyšší kapacitou akumulátoru není možné. Z dosavadních uvedených jednotek na železničním trhu (viz Tabulka 2) je jednotka Siemens Mireo Plus B osazena trakčním akumulátorem o největší kapacitě energie.

Další možností pro zajištění možnosti obnovy energie v akumulátoru je vybudování trakčního vedení v žst. B a částečné nabíjení během doby pobytu (10 min.). Při extrémních hodnotách gradientu trakční spotřeby a příkonu vedlejších spotřeby by jednotka při příjezdu do žst. B (limitní příkon pro nabíjení 1 000 kW) disponovala 373,33 kWh energie, po uplynutí doby pobytu 506,67 kWh. V tomto případě by ale bylo zapotřebí porovnat ekonomický aspekt spočívající v nasazení jednotek BEMU a vybudování nabíjecí stanice v žst. B s výstavbou trakčního vedení (7 milionů Kč/km) v celém úseku mezi žst. A a C.



Graf 8 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2 při změně gradientu trakční spotřeby a příkonu vedlejší spotřeby

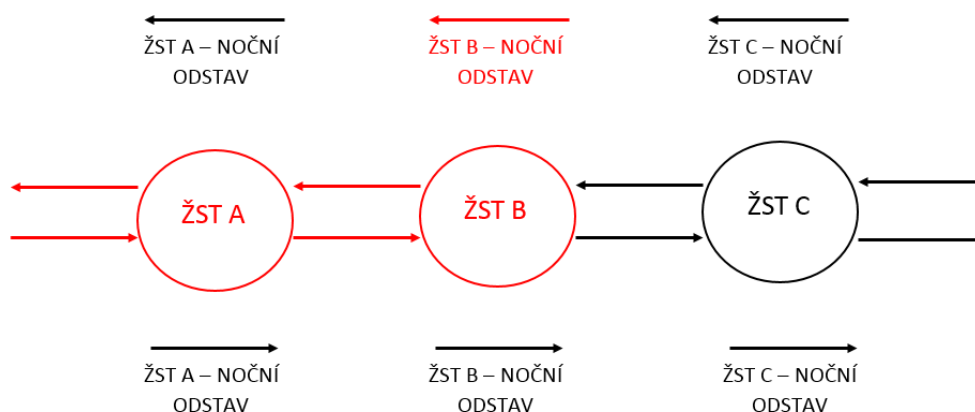
Zdroj: Autor

## 5.3 Modelová situace číslo 3

### 5.3.1 Popis situace

Modelová situace představuje stav, kdy se trakční vedení nachází na širé trati do žst. A a ve zmíněné stanici.

Výchozím bodem v této simulaci je širá trať směřující do žst. A. Následně jednotka BEMU pokračuje ze žst. A do žst. B, kde bude probíhat noční odstav. V ranních hodinách se vozidlo vrací nazpět přes žst. A a pokračuje dále po širé trati. Pro zpřehlednění zadání jsou části využitých úseků fiktivní trati na následujícím obrázku zvýrazněny červenou barvou (viz Obrázek 26).



Obrázek 26 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro modelovou situaci číslo 3

Zdroj: Autor

### 5.3.2 Vstupní parametry

Model představuje dvě možnosti nabíjení, konkrétně se jedná o dynamické (během pohybu BEMU jednotky, viz kapitola 3.2) a statické (kdy se BEMU jednotka nepohybuje, viz kapitola 3.2). Širá trať disponuje limitním příkonem 600,00 kW, žst. A následně 1 000,00 kW.

Úsek mezi žst. A a B dosahuje délky 25,00 km. Úsek širé trati je v délce 30,00 km. Simulace začíná ve 21:00, kdy vozidlo přijíždí na začátek širé trati. Po 40 min. drážní vozidlo přijíždí do žst. A, kde dochází k době pobytu v délce 10 min. Následně pokračuje směrem do žst. B. Cestovní doba dosahuje hodnoty 35 min. V žst. B probíhá již zmíněný odstav. Po příjezdu jednotka BEMU odebírá po dobu 10 min. energii pro provoz pomocných pohonů, respektive vozidlo se nachází v aktivním stavu (viz kapitola 4.2.1.2). Následně dochází k přechodu do úsporného režimu jednotky, ve kterém jednotka setrvává po dobu 5 hod. a 20 min. Před odjezdem vozidla ze žst. B je jednotka uvedena do aktivního stavu, ten trvá 20 min. Následně jednotka pokračuje na základě stejných časových údajů, jako při pohybu do žst. B (příjezd od žst. A v 4:50, odjezd v 5:00).



Trakční akumulátor disponuje v rámci dané simulace jmenovitou energií 700,00 kWh. Na železničním trhu se nachází prozatím jedna jednotka BEMU, která disponuje tímto akumulátorem. Je jím Siemens Mireo Plus B (viz Tabulka 2). Jako při ostatních simulacích, byla zohledněna životnost akumulátoru. Disponibilní energie činí 560,00 kWh (80 % kapacity akumulátoru, viz kapitola 4.2.2.1). Počáteční stav energie v trakčním akumulátoru je stanoven pro hodnotu 350,00 kWh. Minimální energie se rovná 20 % kapacity disponibilní energie, tedy 112,00 kWh. Gradient trakční spotřeby a příkon pro vedlejší spotřebu jsou uvažovány, jako střední roční (viz kapitoly 4.2.2.2 a 4.2.2.3). Účinnost na vstupu do akumulátoru při nabíjení, respektive účinnost na sběrači, dosahuje 0,80.

Shrnutí uvedených veličin a jejich hodnot je v následující tabulce (viz Tabulka 5).

Tabulka 5 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 3

Veličina [značka]	Hodnota	Jednotky
Trakční vedení [-]	Širá trať – žst. A žst. A	-
Noční odstav [-]	žst. B	-
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. A [-]	1 000,00	kW
Vzdálenost mezi širou tratí a žst. A [-]	30,00	km
Vzdálenost mezi žst. A a žst. B [-]	25,00	km
Začátek oběhu [-]	21:00	hh:mm
Cestovní doba mezi širou tratí a žst. A [-]	0:40	hh:mm
Doba pobytu v žst. A [-]	0:10	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. A a žst. B [-]	0:35	hh:mm
Doba udržování aktivního stavu vozidla po příjezdu do žst. B [-]	0:10	hh:mm
Doba pobytu v žst. B (noční odstav) [-]	5:20	hh:mm
Doba udržování aktivního stavu vozidla před odjezdem ze žst. B [-]	0:20	hh:mm
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{jmen}$ ]	700,00	kWh
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{disp}$ ]	560,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{poč}$ ]	350,00	kWh
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{min}$ ]	112,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $e_L$ , výsledný]	3,00	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $P_V$ , výsledný]	40,00	kW
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení při odstavu [ $P_V$ , výsledný pro odstav]	20,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie [ $\eta$ ]	0,80	-

Zdroj: Autor

### 5.3.3 Vyhodnocení výstupních parametrů

Celkové výsledky			
Celková ujetá vzdálenost během oběhu	Lcelkem oběh	110,00	km
Celková doba provozu jednotky během oběhu	Tcelkem oběh	8:40	hh:mm
Celková doba provozu jednotky během oběhu (bez nočních odstavů)	Tcelkem oběh, bez odstavů	3:20	hh:mm
Oběhová rychlost	Vcelkem oběh	12,69	km/h
Oběhová rychlost (bez nočních odstavů)	Vcelkem oběh, bez odstavů	33,00	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	EL, celkem oběh	150,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	ET, celkem oběh	173,33	kWh
Spotřeba energie celkem z akumulátoru	Ecelkem, oběh	323,33	kWh
Výsledný gradient spotřeby	eL, výsledný	2,94	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení	eL, bez dobíjení	7,73	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení (bez nočních odstavů)	eL, bez dobíjení a odstavů	4,21	kWh/km
Obnovená energie	Eobnova, celkem	533,33	kWh
Rozdíl konce a začátku	Erozdíl	210,00	kWh
Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci	Eobnova, bilance	323,33	kWh
Možnost doby nabíjení	Tcelkem nabíjení	1:40	hh:mm
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	Epro nabíjení aku z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	666,67	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	Epro jízdu pod trakčním vedením, celkem ( $\eta$ )	180,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	Epro vedlejší spotřebu z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	66,67	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	913,33	kWh

Obrázek 27 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 3

Zdroj: Autor

Souhrnná tabulka hodnot							
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Stav akumulátoru - rozložené nabíjení [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Odebraná energie ze sítě - rozložené nabíjení [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	21:00	350,00	350,00	0,00	0,00	112,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST A	21:40	560,00	560,00	379,17	379,17	112,00	30,00
Čas odjezdu ze ŽST A	21:50	560,00	560,00	385,83	385,83	112,00	30,00
Čas příjezdu do ŽST B	22:25	461,67	461,67	385,83	385,83	112,00	55,00
Čas odjezdu ze ŽST B	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST B	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST B	4:15	335,00	335,00	385,83	385,83	112,00	55,00
Čas příjezdu do ŽST A	4:50	236,67	236,67	385,83	385,83	112,00	30,00
Čas odjezdu ze ŽST A	5:00	370,00	314,27	559,17	489,50	112,00	30,00
Čas příjezdu na širou trať	5:40	560,00	560,00	913,33	913,33	112,00	0,00

Obrázek 28 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 3

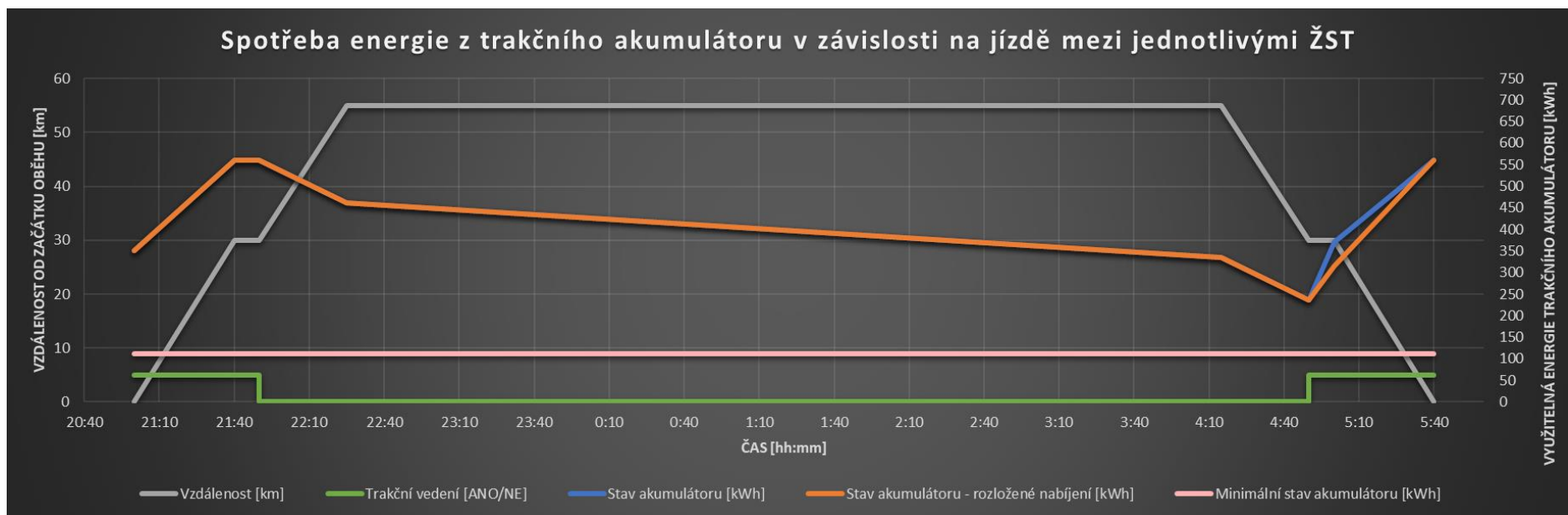
Zdroj: Autor

Celková doba oběhu trvala 8 hod. a 40 min. V případě nezapočítání doby odstavu (5 hod. a 20 min.) dosahuje doba oběhu 3 hod. a 20 min. (zahrnutý přechody mezi aktivním a úsporným stavem jednotky, viz kapitola 4.2.4). Za oba uvedené časové údaje jednotka ujela pouze 110,00 km a oběhová rychlost činila pouze 12,69 km/h při zahrnutí odstavů, bez zahnutí 33,00 km/h. Celková spotřeba energie z trakčního akumulátoru činila 323,33 kWh. Jednotka BEMU spotřebovala v přepočtu na jeden kilometr 2,94 kWh (gradient spotřeby), v případě uvažování bez nabíjení s odstavem 7,73 kWh/km, bez odstavu 4,21 kWh. Během doby nabíjení trakčního akumulátoru bylo obnoveno 533,33 kWh. Akumulátor mohl být nabíjen po dobu 1 hod. a 40 min. Z energetické sítě bylo spotřebováno 913,33 kWh, z toho 666,67 kWh bylo využito pro nabíjení trakčního akumulátoru, 180,00 kWh pro pohon vozidla v místě liniové elektrizace a 66,67 kWh pro vedlejší spotřebu rovněž v místě liniové elektrizace. Zmíněné hodnoty vycházejí z tabulky modelu (viz Obrázek 27).

Z této simulace vyplývá, že na základě stanovených počátečních podmínek, je vozidlo vhodně navrženo pro provoz na fiktivní infrastruktuře s danými vstupními parametry. Z tabulky (viz Obrázek 28), znázorňující jednotlivé hodnoty energie v trakčním akumulátoru je patrné, že během nočního odstavení nedojde k úplnému vybití trakčního akumulátoru. Je ale zapotřebí zdůraznit, že gradienty spotřeby a příkony vedlejších pohonů byly stanoveny jako střední roční. Během doby pobytu v žst. B (včetně aktivního i úsporného stavu) jednotka spotřebovala 126,66 kWh energie z akumulátoru. Při příjezdu do žst. A (ze směru žst. B) disponoval akumulátor energií 236,67 kWh. Zde již započalo statické nabíjení a během pohybu po širé trati došlo k úplnému nabití v podobě dynamického nabíjení.

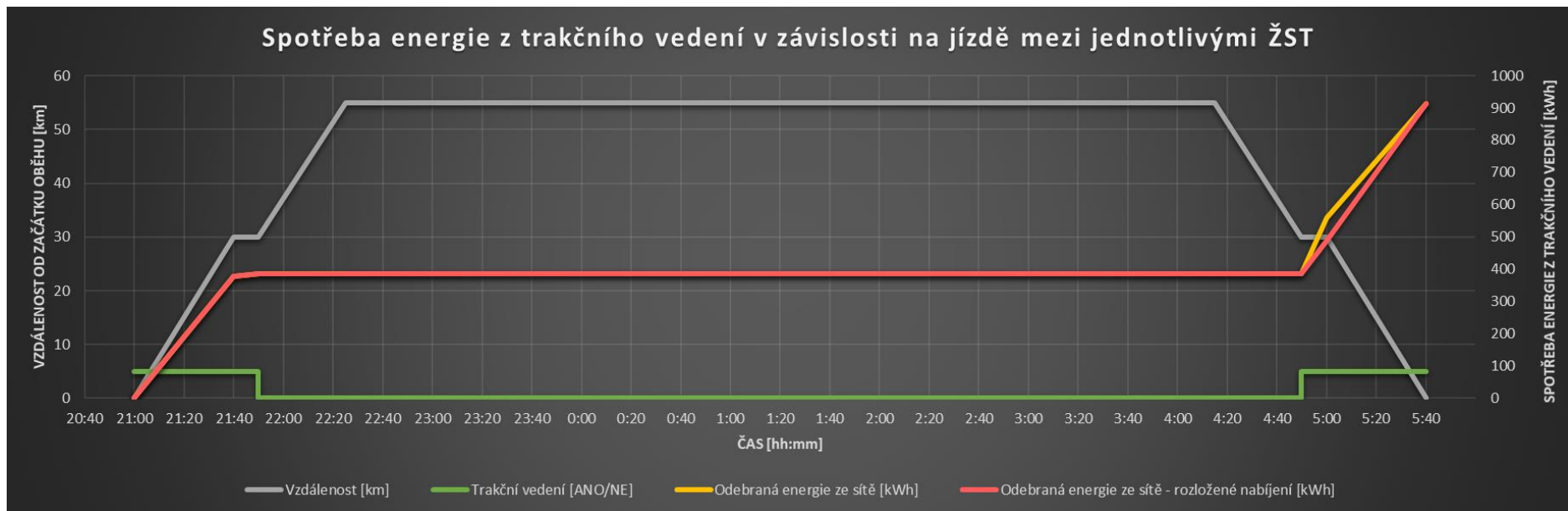
V tabulce (viz Obrázek 28) jsou uvedené kromě standartních hodnot stavu akumulátoru, hodnoty spojeny s rozloženým nabíjením. To znamená, že akumulátor není co nejdříve nabíjen, ale pozvolna (viz kapitola 4.2.3.4). Důsledkem je, že trakční akumulátor není zatěžován velkým příkonem energie. Ve zmíněné tabulce je tento rozdíl zřejmý v úsecích, kdy vozidlo přijede ze žst. B do žst. A. Trakční akumulátor disponoval energií 236,67 kWh. Během standartního nabíjení dosahovala energie v akumulátoru při odjezdu ze žst. A 370,00 kWh, při rozloženém nabíjení 314,27 kWh. Zřejmý je i odběr energie ze sítě, který je v případě rozloženého nabíjení téměř o 70,00 kWh nižší. Důvodem je již zmíněný nižší odběr energie z důvodu nižšího příkonu energie. Na konci úseku širé trati je akumulátor v obou případech obnoven na disponibilní energii 560,00 kWh. Zároveň je v daném bodě odběr ze sítě během normálního nabíjení a rozloženého totožný, tedy 913,33 kWh. Z toho vyplývá, že je spotřeba energie totožná, avšak v případě rozloženého nabíjení nedochází, k již zmíněnému poškození trakčního akumulátoru velkým příkonem.

Tabulka výstupu (viz Obrázek 28) znázorňuje hodnotu minimální energie trakčního akumulátoru. Zmíněná hodnota je uvedena i v úsecích, kde se jednotka BEMU nenachází. Na závěr je uvedena vzdálenost od výchozího bodu, kterým je v dané situaci začátek širé trati. V následujících grafech (viz Graf 9 a Graf 10) je úsek začátku širé tratě znázorněn šedou křivkou, která je v nulové hodnotě.



Graf 9 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3

Zdroj: Autor



Graf 10 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3

Zdroj: Autor



Mezi další výstupy dané simulace patří grafické znázornění spotřeby energie z trakčního akumulátoru a trakčního vedení pro nabíjení akumulátoru a provoz jednotky. V rámci této simulace jsou znázorněny standardní výstupy a výstupy s rozloženým nabíjením akumulátoru.

První zmíněné grafické znázornění (viz Graf 9) představuje stav trakčního akumulátoru během celého oběhu. Hlavní vodorovná osa představuje čas, kdy došlo k oběhu jednotky. Na hlavní svislé ose jsou uvedeny hodnoty určující vzdálenost od výchozího bodu do obrátové stanice a zpět. Průběh je znázorněn šedivou křivkou. Výchozí bodem této simulace je začátek širé tratě (hodnota 0,00 km). Křivka ihned narůstá na hodnotu 30,00 km (pohyb jednotky po širé trati do žst. A). Následuje konstantní část po dobu 10 min. (pobyt v žst. A). Křivka dosahuje hodnoty 55,00 km. Jedná se o žst. B, kde se křivka nemění a je v čase konstantní, jelikož dochází k nočnímu odstavení jednotky BEMU. V druhé části grafu je průběh vzdálenosti v čase zrcadlově otočený (klesá směrem k výchozímu bodu). Růžovou barvou je znázorněna minimální kapacita trakčního akumulátoru. Dle zadání je tato hodnota 112,00 kWh (viz Tabulka 5). Pro názornost jsou v grafu vyznačena místa, kde se nachází trakční vedení (zelená barva). V místě výskytu liniové elektrizace dosahuje hodnoty „5“, v opačné situaci hodnoty „0“. Na začátku a konci oběhu je hodnota rovna „5“ vycházející z trakčního vedení na širé trati. Mezi hlavní výstupy patří průběh stavu energie v trakčním akumulátoru během oběhu. Jedná se o vedlejší svislou osu. Křivky jsou znázorněny modrou a oranžovou barvou. V úsecích, kde akumulátor v obou případech (bez a s rozloženým nabíjením) dosahovaly totožných hodnot, znázorňuje stav křivka oranžové barvy. Na začátku oběhu disponoval trakční akumulátor energií 350,00 kWh. Během jízdy do žst. A pro širé trati probíhalo dynamické nabíjení (viz kapitola 3.2), kdy byl akumulátor nabit na hodnotu 560,00 kWh. Při jízdě do žst. B křivka klesá, jelikož dochází k odběru energie z akumulátoru. K mírnějšímu poklesu dochází během nočního odstavení v žst. B. Jsou i patrně viditelné spotřeby během aktivního stavu jednotky (10 min. po příjezdu a 20 min. před odjezdem) v žst. B. Větší nárůst spotřeby je patrný při pohybu vozidla nazpět do žst. A. Zde je patrné, že modrá křivka nabývá vyšších hodnot než křivka oranžová. To představuje okamžité nabíjení jednotky největším možným příkonem. Během pohybu po širé trati modrá křivka nabývá opět vyšších hodnot, ačkoliv ne tak rychle, jako v předchozím úseku (nižší příkon během dynamického nabíjení). Oranžová křivka pak prokládá body příjezdu do žst. A a konec úseku širé tratě. Nabíjení je tedy pozvolné během dvou zmíněných úseků, což má za následek šetrnější nabíjení trakčního akumulátoru. V obou případech byla energie v trakčním akumulátoru obnovena až na disponibilní energii.

Mezi další grafický výstup patří spotřeba energie z trakčního vedení (vedlejší svislá osa, viz Graf 10). Nastává zde stejný případ, jako u grafu stavu akumulátoru. Tím je míněno, že v uvedeném grafu je patrné rozlišení spotřeby energie během běžného nabíjení

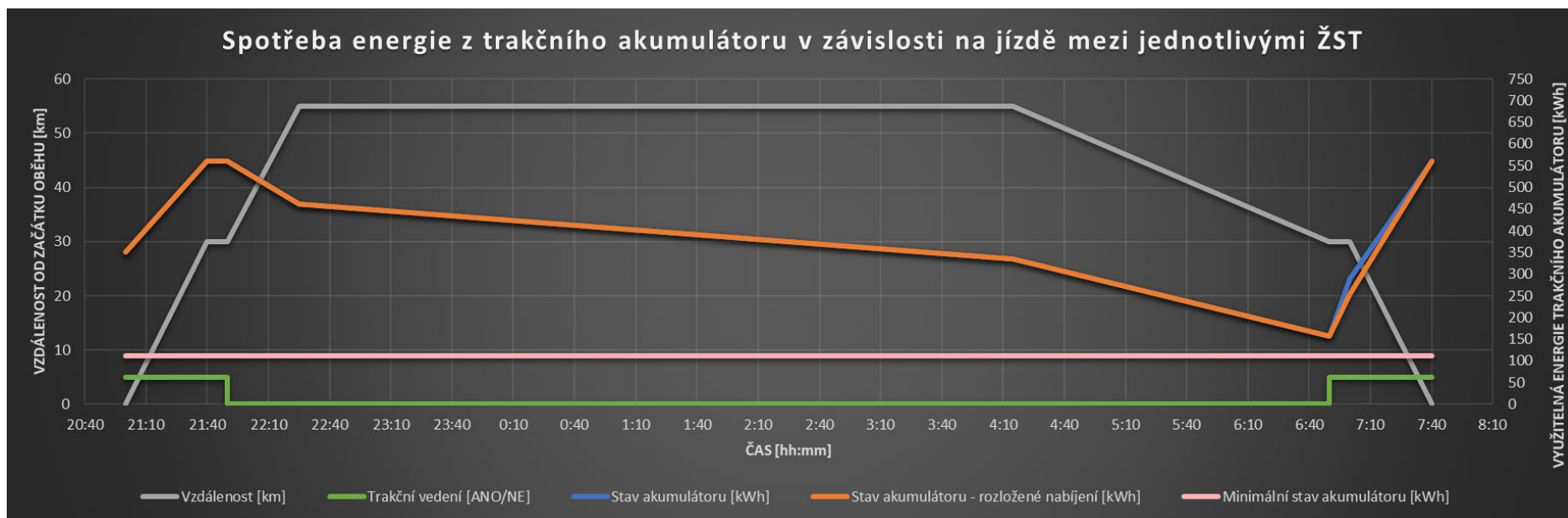
a rozloženého. V místech, kde je odebraná energie ze sítě totožná, křivky se překrývají. K prvnímu nárůstu spotřeby dochází během dynamického nabíjení na širé trati. Patrný je nárůst během pobytu v žst. A (10 min.), kdy je odebíraná energie pro pomocné pohony. Následuje konstantní část v čase, kdy jednotka pro svůj provoz využívá trakční akumulátor. Opětovný nárůst nastává při pobytu v žst. A a následnému pohybu v úseku širé trati. Zde dochází k odlišnému odebrání energie při standardním a rozloženým nabíjením. Při standardním nabíjení je využíván největší možný příkon, jelikož při rozloženém nabíjení je příkon rozložen mezi dva úseky, tedy není odběr tak veliký. Výsledné hodnoty spotřeby se však neliší. V obou případech se jedná o hodnotu 913,33 kWh. V grafu jsou zároveň znázorněny vzdálenosti od žst. A a přítomnost trakčního vedení v jednotlivých úsecích. Popis os je v tomto zmíněném grafu totožný s grafem předešlým (viz předchozí odstavec).

#### **5.3.4 Závěr modelové situace a návrh řešení**

Závěrem této simulace je možné stanovit, že pro zadanou fiktivní trať a situaci je navržené vozidlo vhodné pro pravidelný provoz. Toto tvrzení vychází z tabulek s hodnotami a grafickými výstupy předchozí kapitoly (viz kapitola 5.3.3). Opět, jako v předchozích modelových situacích je zapotřebí zdůraznit, že gradient a příkony pomocných pohonů byly uvažovány jako střední roční. Z toho vyplývá, že v dalších simulacích by mělo dojít k zaměření na extrémní hodnoty nebo i na prodloužení jízdní doby ze žst. B do žst. A, kdy zpoždění vzniklo z důvodu nepravidelnosti.

Jako příklad byla prodloužená cestovní doba mezi žst. B a A z původních 35 min. na 2 hod. a 35 min. Důvodem tohoto prodloužení byla vzniklá nepravidelnost. Ostatní parametry, jako například gradient či příkony pomocných pohonů nebyly změněny a vycházejí ze zadaných hodnot (viz Tabulka 5). Výsledkem této simulace je následující grafický výstup (viz Graf 11) ze kterého je patrné, že v případě prodloužení jízdní doby (spotřeba energie z trakčního akumulátoru ovlivňuje příkon pomocných pohonů) je jednotka BEMU schopna zpětného návratu do žst. A. Zároveň je patrné, že křivka znázorňující energii trakčního akumulátoru klesá rychleji než během odstavu. To je způsobeno, že vozidlo se nachází v aktivním stavu. Příkon pro vedlejší pohon je 40,00 kWh, než 20,00 kWh v úsporné stavu. Při příjezdu do žst. A disponoval trakční akumulátor energií 156,67 kWh. Ve zmíněném grafu jsou zároveň znázorněné dvě křivky spotřeby, a to pro rozložené nabíjení a nerozložené. V případě totožného průběhu hodnot se křivky překrývají, kdy dominantní je oranžová. Rozdíl křivek je tedy patrný až při příjezdu ze žst. B do žst. A a následný pohyb na širé trati.

Jedním z možných návrhů pro zajištění dostatečného množství energie v trakčním akumulátoru je vybudování nabíjecí stanice v žst. B. Tato by ale umožňovala zajistit dostatečný příkon energie pouze pro pomocné pohony. Jednalo by se o zajištění příkonu, který je v rámci modelu označen jako  $P_V$ , *výsledný (pro odstav)*. Uvedená situace by měla za následek, že trakční akumulátor by disponoval při odjezdu ze žst. B energií, která byla rovna hodnotě při příjezdu do zmíněné žst., respektive křivka znázorňující stav energie trakčního akumulátoru by byla v závislosti na čase konstantní.



Graf 11 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3 při prodloužení jízdny doby z důvodu nepravidelnosti

Zdroj: Autor

## 6 MODELOVÁ SITUACE PROVOZNIHO NASAZENÍ JEDNOTEK BEMU V MODELU NA KONKRÉTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATI

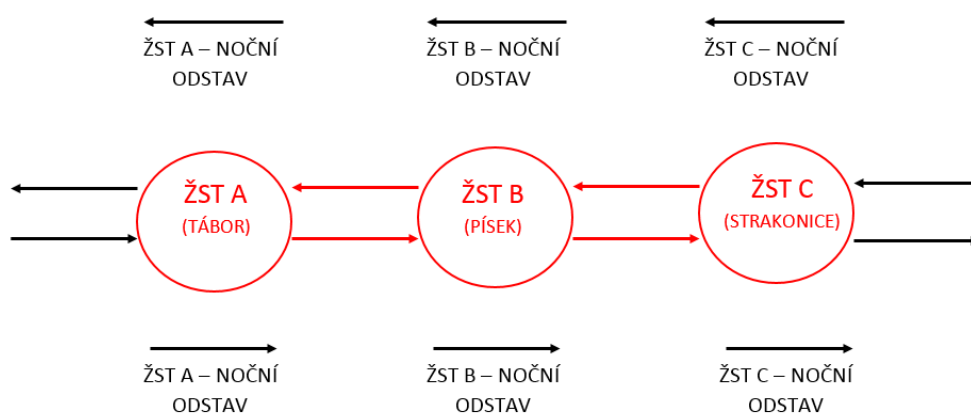
V předchozí kapitole (viz kapitola 4.2.5) byly stanoveny pomocí modelu tři modelové situace prověření provozu jednotky BEMU na fiktivní trati. Cílem modelu je ale využití pro reálné situace, respektive pro prověření nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu. Pro modelovou situaci bylo zvoleno spojení spěšnými vlaky mezi městy Tábor a Strakonice. Jedná se o tratě číslo 190 a 201 dle KJŘ 2022/2023 (dle TTP tratě číslo 702B, 709B, 715A a 715C). Jízdní doby a doby pobytu byly stanoveny na základě KJŘ pro GVD 2022/202 pro zmíněné spěšné vlaky číslo 2082/2062 (změna číslování z 2082 na 2062 v žst. Milevsko) výchozí v žst. Tábor a 2065/2085 (změna číslování z 2065 na 2085 v žst. Milevsko) výchozí v žst. Strakonice. Následující délka doby pobytu v žst. Tábor byla stanovena jako rozdíl odjezdu nadále využitého spěšného vlaku číslo 2086 a příjezdu vlaku číslo 2085. [29] [30]

Na závěr této kapitoly je uvedeno porovnání modelu vytvořeného pro tuto diplomovou práci a aplikace FBS na reálné železniční trati.

### 6.1 Modelová situace pro reálnou železniční trať

#### 6.1.1 Popis situace

Situace vychází z již zmíněného spojení mezi Táborem a Strakonice. Výchozím bodem v modelu je žst. A, která představuje žst. Tábor. Jedná se o stanici s trakčním vedením, respektive s možností nabíjení trakčního akumulátoru. Následuje úsek bez pevného trakčního vedení do žst. B. Tato stanice znázorňuje žst. Písek. Zde je opět možné obnovit energii v trakčním akumulátoru. Následuje další mezistaniční úsek, tentokrát s liniovou elektrizací. Žst. C v modelu představuje reálnou žst. Strakonice. Úseky využité v modelu jsou v následujícím obrázku (viz Obrázek 29) znázorněny červenou barvou.



Obrázek 29 - Grafické znázornění využitých úseků v modelu pro reálnou trať

Zdroj: Autor

### 6.1.2 Vstupní parametry

Trakční vedení se nenachází pouze mezi žst. A a B (Tábor a Písek). V ostatních úsecích je umožněna obnova energie trakčního akumulátoru. Limitní příkon dosahuje v žst. hodnot 1 000,00 kW, v mezistaničním úseku 600,00 kW.

Vzdálenost mezi žst. A a B (Tábor a Písek) je 60,00 km, navazující úsek mezi žst. B a C (Písek a Strakonice) 22,00 km. Oběh jednotky BEMU začíná přistavením jednotky k nástupišti v 6:47 (tento čas lze uvažovat i jako příjezd ze směru žst. B). Doba pobytu v žst. A (Tábor) činí 21 min., tedy v 7:07 vozidlo opouští zmíněnou žst. Cestovní doba mezi žst. A a B (Tábor a Písek) je 1 hod. a 8 min. V 8:15 dochází k pravidelnému příjezdu vozidla do žst. B (Písek), kterou po uplynutí 1 min. (doba pobytu) opouští. Následuje jízda jednotky BEMU mezi žst. B a C (Písek a Strakonice), která trvá 22 min. Příjezd vozidla do žst. C (Strakonice) je v 8:38. Následně dochází k obratu, kdy jednotka setrvá ve zmíněné žst. 37 min., kdy odjezd jednotky nazpět do žst. A (Tábor) nastává v 9:15. Cestovní doba mezi žst. C a B (Strakonice a Tábor) trvá 20 min. Doba pobytu v žst. B (Písek) je totožná, jako v případě jízdy opačným směrem, tedy pouze 1 min. Následná jízda jednotky ze žst. B do žst. A (z Písku do Tábora) trvá 1 hod. a 10 min. Jednotka přijíždí do žst. A (Tábor) v 10:46. Následný odjezd jednotky ve směru do žst. B (Písek) je v 11:07. Z toho vyplývá, že doba pobytu mezi příjezdem a odjezdem je 21 min.

Jednotka BEMU disponuje trakčním akumulátorem s jmenovitou energií 700,00 kWh. Tímto akumulátorem by měla disponovat jednotka Siemens Mireo Plus B, která by měla být uvedena do provozu v prosinci roku 2023 (viz Tabulka 2). Vzhledem k životnosti akumulátoru, kdy postupně klesá jeho kapacita (viz kapitola 4.2.2.1), je disponibilní energie uvažována s hodnotou 560,00 kWh (80 % kapacity akumulátoru). Zároveň je stanovena i minimální kapacita energie trakčního akumulátoru. Konkrétně se jedná o 20 % kapacity disponibilní energie, tedy 112,00 kWh. Počáteční stav trakčního akumulátoru během přistavení jednotky BEMU k nástupišti je rovna hodnotě disponibilní. Pro simulaci jsou uvažovány trakční gradient a příkon pro vedlejší potřebu jako střední roční (viz kapitola 4.2.2.2 a 4.2.2.3). Účinnost na vstupu do akumulátoru při nabíjení, respektive účinnost na sběrači, dosahuje 0,80.

Shrnutí uvedených veličin a jejich hodnot je v následující tabulce (viz Tabulka 6).

Tabulka 6 - Vstupní parametry pro modelovou situaci na reálné železniční trati

Veličina [značka]	Hodnota	Jednotky
Trakční vedení [-]	žst. A (Tábor) žst. B (Písek) žst. C (Strakonice) mezistaniční úsek žst. B a C	-
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. A [-]	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. B [-]	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. C [-]	1 000,00	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v mezistaničním úseku [-]	600,00	kW
Vzdálenost mezi žst. A a žst. B [-]	60,00	km
Vzdálenost mezi žst. B a žst. C [-]	22,00	km
Začátek oběhu [-]	6:45	hh:mm
Doba pobytu v žst. A [-] *	0:21	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. A a žst. B [-]	1:08	hh:mm
Doba pobytu v žst. B [-] *	0:01	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. B a žst. C [-]	0:22	hh:mm
Doba pobytu v žst. C [-] *	0:20	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. C a žst. B [-]	0:20	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. B a žst. A [-]	1:10	hh:mm
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{jmen}$ ]	700,00	kWh
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{disp}$ ]	560,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{poč}$ ]	560,00	kWh
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{min}$ ]	112,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $e_L$ , výsledný]	3,00	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $P_V$ , výsledný]	40,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie [ $\eta$ ]	0,80	-

\*doba pobytu totožná pro oba směry

Zdroj: Autor

### 6.1.3 Vyhodnocení výstupních parametrů

Celkové výsledky			
Celková ujetá vzdálenost během oběhu	Lcelkem oběh	164,00	km
Celková doba provozu jednotky během oběhu	Tcelkem oběh	4:21	hh:mm
Celková doba provozu jednotky během oběhu (bez nočních odstavů)	Tcelkem oběh, bez odstavů	4:21	hh:mm
Oběhová rychlost	Vcelkem oběh	37,70	km/h
Oběhová rychlost (bez nočních odstavů)	Vcelkem oběh, bez odstavů	37,70	km/h
Spotřeba energie trakce z akumulátoru	EL, celkem oběh	360,00	kWh
Spotřeba energie vedlejší z akumulátoru	ET, celkem oběh	92,00	kWh
Spotřeba energie celkem z akumulátoru	Ecelkem, oběh	452,00	kWh
Výsledný gradient spotřeby	eL, výsledný	2,76	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení	eL, bez dobíjení	4,06	kWh/km
Vypočtený gradient spotřeby bez vlivu doby nabíjení (bez nočních odstavů)	eL, bez dobíjení a odstavů	4,06	kWh/km
Obnovená energie	Eobnova, celkem	452,00	kWh
Rozdíl konce a začátku	Erozdíl	0,00	kWh
Obnovená energie pro vyrovnanou bilanci	Eobnova, bilance	452,00	kWh
Možnost doby nabíjení	Tcelkem nabíjení	2:03	hh:mm
Spotřeba energie pro nabíjení akumulátorové baterie	Epro nabíjení aku z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	565,00	kWh
Spotřeba energie pro jízdu vozidla pod trakčním vedením	Epro jízdu pod trakčním vedením, celkem ( $\eta$ )	132,00	kWh
Spotřeba energie pro vedlejší spotřebu z trakčního vedení	Epro vedlejší spotřebu z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	82,00	kWh
Celková spotřeba energie z trakčního vedení	Ecelkem z trakčního vedení, celkem ( $\eta$ )	779,00	kWh

Obrázek 30 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci na reálné železniční trati

Zdroj: Autor



Souhrnná tabulka hodnot							
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Stav akumulátoru - rozložené nabíjení [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Odebraná energie ze sítě - rozložené nabíjení [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST A	6:46	560,00	560,00	0,00	0,00	112,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	7:07	560,00	560,00	14,00	14,00	112,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST B	8:15	334,67	334,67	14,00	14,00	112,00	60,00
Čas odjezdu ze ŽST B	8:16	348,00	348,00	31,33	31,33	112,00	60,00
Čas příjezdu do ŽST C	8:38	524,00	524,00	332,00	332,00	112,00	82,00
Čas odjezdu ze ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST C	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas odjezdu ze ŽST C	9:15	560,00	552,04	401,67	391,72	112,00	82,00
Čas příjezdu do ŽST B	9:35	560,00	560,00	481,00	405,05	112,00	60,00
Čas odjezdu ze ŽST B	9:36	560,00	560,00	481,67	405,72	112,00	60,00
Čas příjezdu do ŽST A	10:46	333,33	333,33	481,67	405,72	112,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	11:07	560,00	560,00	779,00	703,05	112,00	0,00
Čas příjezdu na širou trať	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE

Obrázek 31 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovu situaci na reálné železniční trati

Zdroj: Autor

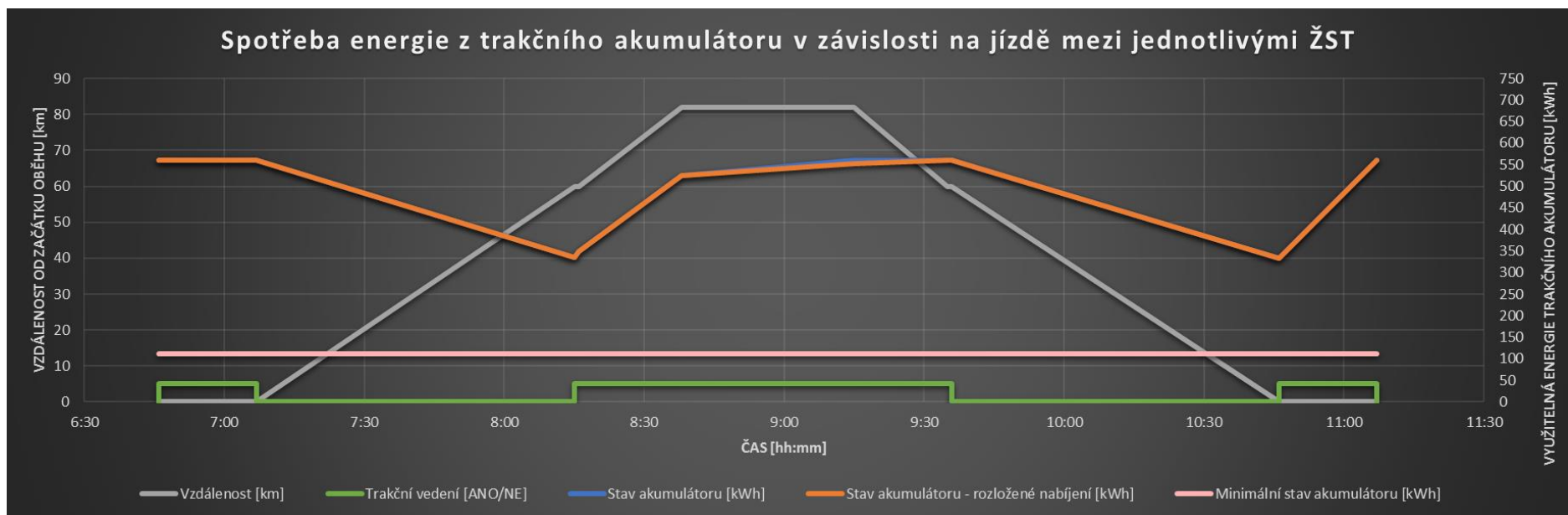
Celková doba oběhu jednotky trvala 4 hod. a 21 min. (vzhledem k tomu, že neprobíhal žádný odstav, jsou hodnoty celkové doby oběhu totožné pro odstavy i bez). Jednotka během oběhu ujela celkem 164,00 km s oběhovou rychlostí 37,70 km/h (totožné i pro oběhovou rychlost s odstav). Do doby oběhu je zahrnut i druhý pobyt v žst. A (Tábor). V případě odečtu dané hodnoty (21 min.) dosahuje oběhová doba 4 hod. s oběhovou rychlostí 41,00 km/h (ujetá vzdálenost se nemění). Z trakčního akumulátoru bylo celkem využito 452,00 kWh, kdy pro jízdu jednotky bylo spotřebováno 360,00 kWh energie a pro vedlejší pohony pak 92,00 kWh. Výsledný gradient spotřeby dosahuje hodnoty 2,89 kWh/km. V případě nezahrnutí nabíjení je hodnota gradientu stanovena na 4,06 kWh/km (vzhledem k tomu, že při oběhu nebyl žádný odstav, je hodnota totožná i pro veličiny gradientu s odstav i bez odstavů). Obnovená energie v trakčním akumulátoru je rovna energii spotřebované, tedy 472,58 kWh. Z trakčního vedení bylo celkem odebráno 779,00 kWh, kde 565,00 kWh energie bylo využito pro nabíjení trakčního akumulátoru, 132,00 kWh pro jízdu vozidla a 82,00 kWh pro vedlejší pohony jednotky BEMU. Zmíněné shrnující hodnoty jsou uvedeny v tabulce pro tuto modelovou situaci (viz Obrázek 30).

Na základě shrnutých hodnot v předešlém odstavci lze jednoznačně určit, že navržená jednotka BEMU (s uvedenými vstupními parametry, viz Tabulka 6) je vhodná pro nasazení do pravidelného provozu na navrženou reálnou trať. Dané tvrzení vychází i z tabulky (viz Obrázek 31), kde jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé úseky (jednotka disponuje dostatečným množstvím energie akumulátoru). V 6:46 bylo vozidlo přistaveno k nástupišti v žst. A (Tábor). Trakční akumulátor disponoval energií 560,00 kWh, respektive byl plně nabitý. Při příjezdu do žst. B (Písek) byla energie trakčního akumulátoru 334,67 kWh. Pro úsek mezi žst. A a B (Tábor a Písek) jednotka spotřebovala 225,33 kWh. V tabulce jsou dva uvedené příklady nabíjení. První uvedené hodnoty stavu akumulátoru jsou pro okamžité nabíjení. Druhé pak pro rozložené nabíjení (viz kapitola 4.2.3.4). Patrný rozdíl nastává při odjezdu ze žst. C (Strakonice) v 9:15, kdy při okamžitém nabíjení byl akumulátor již plně nabit, v případě rozkladu disponoval 549,77 kWh. Následně během jízdy do žst. B (Písek) došlo k plné obnově energie trakčního akumulátoru, tedy na hodnotu 560,00 kWh. Při příjezdu vozidla nazpět do žst. A (Tábor) disponovala jednotka energií v trakčním akumulátoru 333,33 kWh. Během pobytu ve zmíněné žst. došlo k plné obnově energie akumulátoru.

Rozklad nabíjení by mohl být umožněn od příjezdu do žst B (Písek) ze žst. A (Tábor), následného obratu v žst. C (Strakonice) a až do zpětného návratu do žst. B (Písek). Model však zatím umožňuje rozklad nabíjení pouze mezi dva úseky, a to konkrétně žst. a navazující mezistaniční úsek. Vzhledem k tomu, že v žst. B (Písek) je doba pobytu pouze 1 min., není možné dostatečně rozložit energii pro nabíjení mezi zmíněnou žst. a navazující úsek.

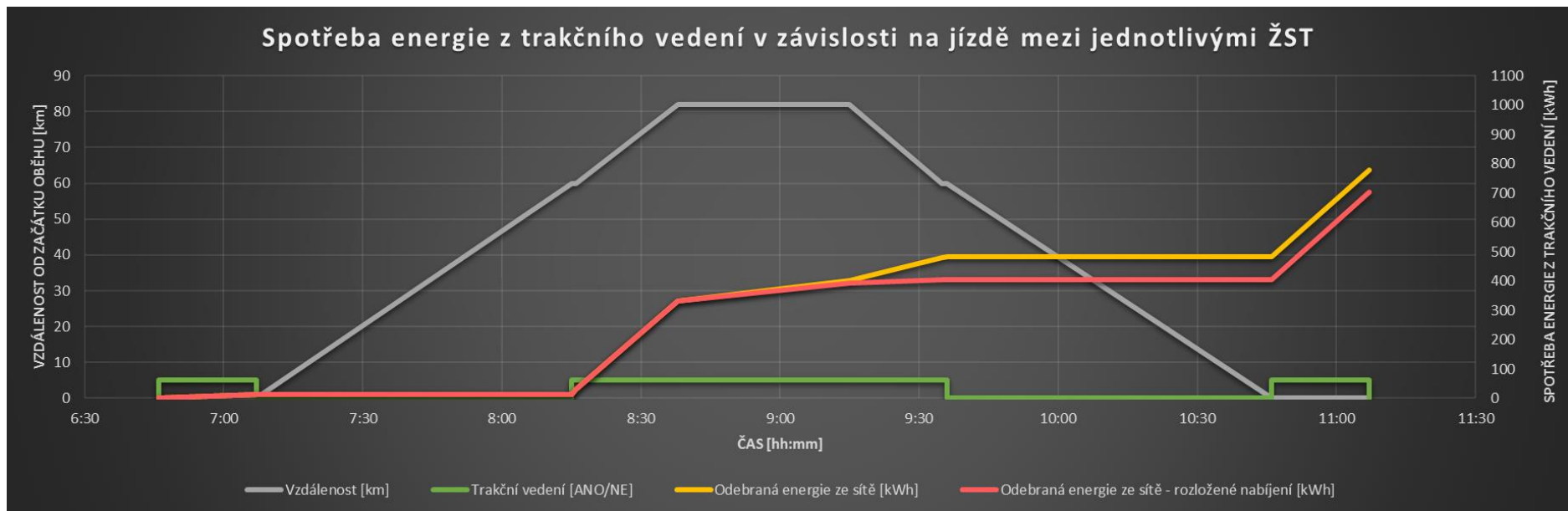
Mezi další uvedené hodnoty v tabulce (viz Obrázek 31) patří spotřeba energie z trakčního vedení. K prvnímu nárůstu došlo při odjezdu ze žst. A (Tábor), kdy během pobytu byla odebírána energie pro pomocné pohony. Další postupný nárůst je znatelný po příjezdu do žst. B (Písek), kdy zvýšení odběru je dáno odběrem energie z trakčního vedení pro obnovu energie v trakčním akumulátoru. Až do příjezdu do žst. C (Strakonice) dosahuje odběr energie stejných hodnot. Rozdíl nastává při odjezdu z poslední zmíněné žst. v 9:15. Okamžité nabíjení dosahuje vyšší hodnoty než nabíjení rozložené. To je způsobeno především tím, že akumulátor měl být nabit co nejrychleji, tudíž bylo zapotřebí přivést větší množství energie z trakčního vedení. V opačném případě během rozkladu docházelo k postupnému odběru energie. To způsobilo nižší hodnotu spotřeby energie. Po příjezdu do žst. A (Tábor) byl rozdíl spotřeby energie o 75,95 kWh.

V tabulce (viz Obrázek 31) jsou následně uvedeny hodnoty minimální energie trakčního akumulátoru. Ta je uvedena u všech úseků i přesto, že se jednotka BEMU v některých z nich nenachází. Na závěr je uvedena vzdálenost od výchozího bodu, kterým je v dané situaci žst. A (Tábor). V grafech (viz Graf 12 a Graf 13) je průběh pohybu vozidla od zmíněné žst. znázorněn šedivou křivkou, kdy nulová hodnota stanovuje pobyt jednotky v žst. A (Tábor).



Graf 12 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati

Zdroj: Autor



Graf 13 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati

Zdroj: Autor

Kromě tabulek s výslednými hodnotami anebo hodnotami v jednotlivých úsecích patří mezi výstupní parametry grafické znázornění spotřeb energie z trakčního akumulátoru a trakčního vedení.

První graf (viz Graf 12) znázorňuje spotřebu energie z trakčního akumulátoru. Vodorovná osa představuje čas, kdy probíhal oběh jednotky. Na hlavní svislé ose je uvedena vzdálenost od výchozího bodu. Průběh pohybu jednotky BEMU od výchozího bodu (žst. A) je znázorněn šedivou křivkou. Křivka v čase narůstá na hodnotu 60,00 km, kde dochází k jejímu ustálení a po dobu 1 min. je v čase konstantní, jedná se o pobyt v žst. B (Písek). Následně dochází k opětovnému nárůstu křivky až na hodnotu 82,00 km, to je vzdálenost žst. C (Strakonice) od žst. A (Tábor). Na této hodnotě je křivka v čase konstantní, respektive jedná se o pobyt (37 min.) vozidla v žst. C (Strakonice). V druhé části grafu je průběh vzdálenosti v čase zrcadlově otočený. Jedná se tedy o zpáteční jízdu jednotky BEMU do žst. A (Tábor). Přímka růžové barvy znázorňuje minimální hranici energie v akumulátoru (112,00 kWh). Pro přehlednost jsou v grafu znázorněna místa s liniovou elektrizací a bez ní. Křivka má barvu zelenou a v případě výskytu trakčního vedení dosahuje hodnoty „5“, v opačné situaci hodnoty „0“. Hlavním výstupem znázorněným na vedlejší svislé ose je spotřeba energie z trakčního akumulátoru. Křivky jsou znázorněny modrou a oranžovou barvou. V úsecích, kde akumulátor v obou případech (bez a s rozloženým nabíjením) dosahoval totožných hodnot, znázorňuje stav křivka oranžové barvy. Při začátku oběhu disponovalo vozidlo plně nabitým trakčním akumulátorem, tedy 560,00 kWh. Během pobytu v žst. A (Tábor) je křivka v čase konstantní, k začátku poklesu dochází až v 7:07, kdy vozidlo opustilo zmíněnou žst. V daném úseku mezi žst. A a B (Tábor a Písek) dochází k poklesu křivky, protože vozidlo v daném úseku využívá energii z trakčního akumulátoru. K nárůstu křivky dochází ihned při příjezdu do žst. B (Písek) v 8:15. Mezi příjezdem do žst. C (Strakonice) a zpětnému příjezdu do žst. B (Písek) je patrný rozklad nabíjení, kdy křivka modré barvy rychleji docílí hodnoty disponibilní energie trakčního akumulátoru (560,00 kWh). Oranžová křivka tyto dva zmíněné body lineárně propojí. Jak již bylo zmíněno, v praxi by došlo k proložení bodů oranžovou křivkou mezi úseky žst. B (ze směru žst. A) a žst. B (ze směru žst. C). V uvedeném grafu (viz Graf 12) jsou dále znatelné poklesy křivky při zpáteční jízdě mezi žst. B (Písek) a žst. A (Tábor), kde následně dochází k nabíjení akumulátoru, a tedy k růstu křivky na hodnotu 560,00 kWh.

Druhý grafický výstup (viz Graf 13) představuje spotřebu energie z trakčního vedení pro obnovu energie v trakčním akumulátoru, spotřebu energie pro jízdu vozidla a pomocné pohony. Zároveň je zde znázorněna spotřeba energie během standardního výpočtu a rozloženého nabíjení. V místech, kde je odebraná energie ze sítě totožná, se křivky překrývají. První drobný nárůst je během pobytu v žst. A (Tábor), kdy je odebírána energie pro provoz pomocných pohonů. Následuje konstantní úsek (vozidlo využívá energii

z akumulátoru) až do příjezdu do žst. B (Písek) v 8:15, kdy dochází k nabíjení trakčního akumulátoru. Od odjezdu ze žst. C (Strakonice) v 9:15 jsou spotřeby rozdílné. Zatímco okamžité nabíjení dosahuje hodnoty 401,67 kWh, rozložené nabíjení pouze 391,72 kWh. Tento rozdíl je způsoben především tím, že během okamžitého nabíjení odebírá vůz po krátký čas větší množství energie než v opačném případě, kdy po delší čas odebírá menší množství energie. Opětovný větší nárůst obou křivek je během pobytu v žst. A (Tábor) od 10:46 do 11:07, kdy dochází k obnově energie v trakčním akumulátoru.

#### **6.1.4 Závěr modelové situace a návrh řešení**

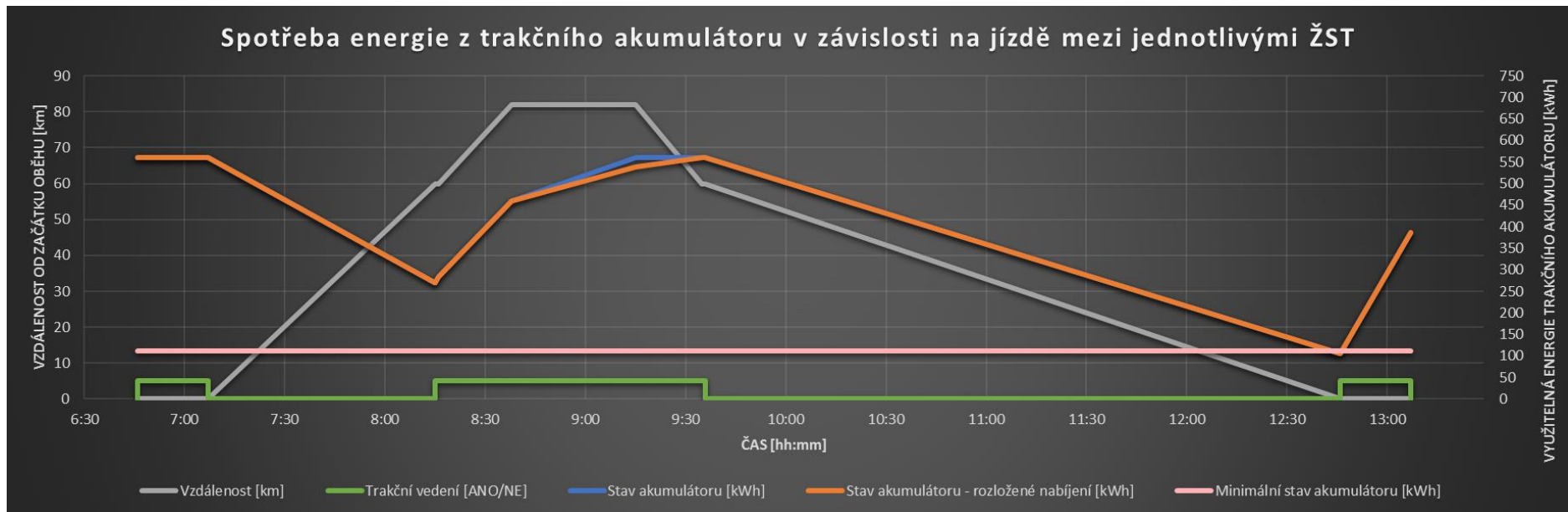
Z hodnot uvedených v předchozí kapitole (viz kapitola 6.1.3) vyplývá, že jednotka BEMU s uvedenými parametry je vhodná pro nasazení do pravidelného provozu mezi Tábořem a Strakonice. Je ale zapotřebí zdůraznit, že modelová situace proběhla pro vlaky spěšné a za podmínky, kdy gradient a příkony pomocných pohonů byly uvažovány jako střední roční. Na základě tohoto tvrzení následuje v dalším kroku prověření extrémních hodnot nebo prodloužení jízdní doby.

Pro názornost byl vytvořen následující grafický výstup (viz Graf 14) s následujícími pozměněnými vstupními hodnotami. Pro gradient trakční spotřeby byl zvolen koeficient 0,90 a pro příkon vedlejší spotřeby 0,50. Tyto koeficienty byly zvoleny pro dosažení extrémních hodnot, které mohou nastat například během zimního období (viz kapitola 4.2.2.2 a 4.2.2.3). Výsledné hodnoty využitě pro prověřovací simulaci dosahovaly hodnot 3,33 kWh pro gradient a 80,00 kWh pro příkon vedlejší spotřeby. Zároveň došlo k prodloužení (například vznik nepravidelnosti) jízdní doby mezi žst. B (Písek) a žst. A (Tábor) z původní 1 hod. a 10 min. na 3 hod. a 10 min.

Z následujícího grafického výstupu (viz Graf 14) je patrné, že například v zimních měsících (zvýšená spotřeba energie pro vytápění jednotky) je jednotka schopna i při zdržení na trati vzniklé nepravidelností (vozidlo během stání v mezistaničním úseku bylo i nadále temperováno) je schopno zpětnému návratu do žst. A (Tábor) Jediný problém spočívá v tom, že energie v trakčním akumulátoru klesne pod minimální energii v trakčním akumulátoru a vozidlo by disponovalo pouze 106,67 kWh. V tomto případě by nedošlo k žádnému poškození akumulátoru, pouze by došlo ke snížení jeho energie (jedná se o nepravidelnost, nikoliv pravidelnou situaci). Druhým problémem je, že vozidlo by během standardního pobytu (21 min.) obnovilo akumulátor pouze na 386,67 kWh. Při následujícím oběhu (za podmínek extrémních hodnot pro gradient trakce, příkonu vedlejších pohonů a cestovní doby 1 hod. a 8 min.) by daná kapacita byla dostačující pro dojezd do žst. B (Písek). Trakční akumulátor by ve zmíněné žst. disponoval pouze 96,00 kWh, tedy pod hodnotou minimální kapacity. Jak již bylo řečeno, nedošlo by při poklesu pod danou hladinu k poškození akumulátoru, pouze by došlo k většímu vybití akumulátoru. Při pravidelném provozu ale pod minimální hladinu

energie v akumulátoru klesnout nesmí (viz kapitola 4.2.2.1). Při pobytu v žst. B (Písek) a následné jízdě do žst. C (Strakonice) by energie v akumulátoru byla obnovena až na disponibilní hodnotu. V případě potřeby plné obnovy energie v trakčním akumulátoru v žst. A (Tábor) by doba pobytu musela být prodloužena na 34 min.





Graf 14 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati při změně počátečních podmínek

Zdroj: Autor

## 6.2 Porovnání modelu a aplikace FBS

Grafické výstupy modelu, vytvořeného v rámci této práce, vycházejí ze stanovených počátečních podmínek a následných výpočtů. Pro ověření, že výstupy modelu jsou reálné, byla provedena co nejpřesnější simulace v aplikaci FBS. Pro simulaci byl využit pouze úsek mezi Tábořem a Pískem, kde vozidlo pro trakci a příkon vedlejších pohonů využívá energii z trakčního akumulátoru.

### 6.2.1 Aplikace FBS

Aplikace byla vytvořena společností iRFP – Institut pro plánování regionální a dálkové dopravy. Jedná se o inženýrskou kancelář z Drážďan se zaměřením na železniční provoz. Samotná aplikace je výkonným nástrojem pro téměř všechny aspekty konstrukce jízdních řádů, optimalizace oběhů vozidel, plánování zdrojů a následného využití zpracovaných dat. Zpracovatel je podporován aplikací FBS v maximální možné míře od prvotního konceptu až po kompletaci dokumentů jízdních řádů, tj. pomůcek GVD. [28]

### 6.2.2 Vozidlo pro simulaci v aplikaci FBS

Samotná aplikace FBS umožňuje nasimulovat jízdu a energetickou bilanci vozidla s alternativním pohonem po trati, jejíž parametry (směrové a výškové vedení, elektrizace, poloha dopravních a návěstidel, počet traťových kolejí apod.) jsou předem zadané. Pro účely simulace bylo vývojáři v aplikaci vytvořeno pět vzorových fiktivních vozidel s alternativním pohonem (čtyři BEMU jednotky a jedna jednotka HEMU), které mají různé trakční a výkonnostní charakteristiky. U vzorových vozidel je poskytována možnost v rámci aplikace FBS částečně upravovat a přizpůsobovat podmínky adheze, výkonu, odběru pomocných pohonů, traťových odporů či stavu a kapacity akumulátoru. Jak již bylo zmíněno, pro srovnání simulací bylo ze čtyř uvedených jednotek BEMU zvoleno právě to vozidlo, které je nejvíce podobné tomu, které je využito v modelu, kde za vzorové vozidlo byla považována jednotka Siemens Mireo Plus B. [19]

V následující tabulce (viz Tabulka 7) jsou uvedeny nejdůležitější parametry pro porovnání reálné jednotky a jednotky v aplikaci FBS. V případě, že některé parametry nelze dohledat, je dané pole označeno symbolem „?“.

V obou případech se jedná o dvoučlankové jednotky s totožným uspořádáním náprav. Maximální rychlost obou vozidel je v místě liniové elektrizace 160 km/h. U jednotky z FBS není uvedena maximální rychlost, kdy vozidlo pro svůj pohyb odebírá energii z trakčního akumulátoru. V případě porovnání výkonů dosahuje reálná jednotka vyšší hodnoty o 535 kW. Kapacita trakčního akumulátoru se liší o 93 kWh. V případě stanovení disponibilní energie (80 % z kapacity akumulátoru), disponuje reálná jednotka akumulátorem o kapacitě 560 kWh,

jednotka z FBS 486 kWh. Jednotka z aplikace FBS je o 10,060 m kratší než jednotka reálná. Z toho vyplývá i nižší obsaditelnost vozidla, která je pouhých 88 míst. [3] [16] [28]

Tabulka 7 - Porovnání parametrů reálné jednotky BEMU a jednotky BEMU v FBS

Parametr	Hodnota parametru	
	Reálná jednotka BEMU	Fiktivní jednotka BEMU v FBS
Obchodní název jednotky (typ)/název jednotky v FBS	Siemens Mireo Plus B	X.Muster BEMU246-1
Uspořádání náprav	Bo'2'Bo'	Bo'2'Bo'
Rozchod	1 435 mm	? mm
Max. rychlost (trolej/akumulátor)	160 km/h / 140 km/h	160 km/h / ? km/h
Elektrické napájení	15 kV 16,7 Hz AC	?
Výkon	1 700 kW	1 165 kW
Kapacita akumulátoru (umístění v jednotce)	700 kWh (umístění pod podlahou)	607 kWh
Rozjezdové zrychlení	do 1,1 m/s <sup>2</sup>	? m/s <sup>2</sup>
Předpokládaný dojezd na akumulátor	80–120 km	? km
Délka přes nárazníky	46,560 m	36,500 m
Výška nástupní hrany	610 mm	? mm
Obsaditelnost	120 míst	88 míst
Zátěž na nápravu	< 20 t	? t

Zdroj: [3] [16] [28]

### 6.2.3 Simulace v modelu a aplikaci FBS

Pro simulace byly zvoleny spěšné vlaky na trati číslo 201 dle KJŘ 2022/2023 (dle TTP tratě číslo 702B). Jedná se o úsek mezi žst. Tábor a žst. Písek. Důvodem volby tohoto úseku bylo to, že se v daném úseku nenachází liniová elektrizace, a tudíž vozidlo pro jízdu a příkony vedlejších pohonů využívá energii z trakčního akumulátoru. Jízdní doby a doby pobytu byly stanoveny pro spěšný vlak 2086/2066 (přečíslování v žst. Milevsko) na základě KJŘ pro GVD 2022/2023. V následující tabulce (viz Tabulka 8) jsou uvedeny vstupní parametry pro simulaci. V případě, že daný parametr nelze stanovit, je dané pole označeno symbolem „?“. Označení žst. v modelu vychází ze schématu pro model na reálné železniční trati (viz Obrázek 29). [29] [30]

Tabulka 8 - Vstupní parametry pro modelovou situaci v modelu a FBS na reálné železniční trati

Veličina [značka]	Hodnota		Jednotky
	Model	FBS	
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. A (Tábor) [-]	1 000,00	?	kW
Limitní příkon pro nabíjení akumulátorové baterie v žst. B (Písek) [-]	1 000,00	?	kW
Vzdálenost mezi žst. A a žst. B [-]	60,00	59,78	km
Začátek oběhu [-]	11:06	?	hh:mm
Doba pobytu v žst. A [-]	0:01	?	hh:mm
Cestovní doba mezi žst. A a žst. B [-]	1:04	1:04	hh:mm
Jmenovitá energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{jmen}$ ]	700,00	607,00	kWh
Využitelná energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{disp}$ ]	560,00	460,00	kWh
Počáteční stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{poč}$ ]	560,00	460,00	kWh
Minimální stav energie trakční akumulátorové baterie [ $E_{min}$ ]	112,00	92,00	kWh
Gradient trakční spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $e_L$ , výsledný]	3,00	?	kWh/km
Příkon vedlejší spotřeby z akumulátoru/trakčního vedení [ $P_V$ , výsledný]	80,00	80,00	kW
Účinnost energetického řetězce v rozsahu přívodu elektrické energie [ $\eta$ ]	0,80	?	-
Síla protivětru [ $V_V$ ]	?	10	km/h
Koeficient adheze jízdy [ $\mu_{OA}$ ]	?	0,33	-
Síla protivětru [ $\mu_{OB}$ ]	?	0,18	-
Režim brzdy a brzd. %	?	P 80 %	-

Zdroj: Autor

Souhrnná tabulka hodnot					
	Čas [hh:mm]	Stav akumulátoru [kWh]	Odebraná energie ze sítě [kWh]	Minimální stav akumulátoru [kWh]	Vzdálenost [km]
Čas odjezdu ze širé tratě	NEJEDE	NEJEDE	NEJEDE	112,00	NEJEDE
Čas příjezdu do ŽST A	11:06	560,00	0,00	112,00	0,00
Čas odjezdu ze ŽST A	11:07	560,00	1,33	112,00	0,00
Čas příjezdu do ŽST B	12:11	294,67	1,33	112,00	60,00

Obrázek 32 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci v modelu

Zdroj: Autor

●●●	Pos (km)	Σt (min)	E ◊ ÷ (k...)	E ◊ ⊗ (k...)	E ◊ ÷ (k...)	E ◊ ⊗ (k...)	E ⊙ (kWh)
●BOZE	16,885	13,750	43,42	34,83	0,00	0,00	416,58
●SEPE	23,316	20,947	52,06	29,98	0,00	0,00	406,09
●MILE	26,686	24,916	58,12	31,01	0,00	0,00	396,51
●BRNC	32,394	31,573	76,28	44,51	0,00	0,00	367,10
●PISM	55,855	54,258	116,33	52,23	0,00	0,00	309,08
●PISJ	58,228	57,331	119,77	48,12	0,00	0,00	306,37
●PISK	59,779	59,547	123,06	47,13	0,00	0,00	302,33

Obrázek 33 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci v FBS

Význam sloupců zleva:

- bod na trati (zkratka dopravní)
- staničení
- celkový čas jízdy
- odevzdaná energie na dvojkolí (kumulovaná, bez rekuperace) [kWh]
- odevzdaná energie na dvojkolí (kumulovaná, s rekuperací) [kWh]
- spotřeba energie z trakční napájecí soustavy (kumulovaná, bez rekuperace, na sběrači) [kWh]
- spotřeba energie z trakční napájecí soustavy (kumulovaná, s rekuperací) [kWh]
- stav baterie – uložená energie v zásobníku (se stanovenou poč. hodnotou) [kWh]

Zdroj: Autor

## 6.2.4 Závěr simulací

Závěrem porovnání modelu vytvořeného pro tuto práci a aplikace FBS je komparace výsledků jednotlivých simulací. Souhrn hodnot je v následující tabulce (viz Tabulka 9). Celková vzdálenost, kterou jednotky BEMU ujely, byla 60,00 km. Jednotka z modelu využívala energii z trakčního akumulátoru po celou vzdálenost, jednotka z FBS pouze na vzdálenost 59,78 km. Aplikace FBS uvažuje s přítomností trakčního vedení v žst. Tábor a Písek. To znamená, že pokud se vozidlo pohybuje po žst. Tábor až na zhlaví, kde dochází k odbočení trati číslo 201 od trati číslo 220 (čísla tratí dle KJŘ 2022/2023; dle TTP tratě číslo 702B a 704), využívá pro gradient trakce a příkon vedlejších pohonů energii z trakčního vedení. Model uvažuje ihned při odjezdu s odběrem z trakčního akumulátoru. To je důvodem, proč se liší

časové hodnoty. V dalším řádku tabulky je uvedena celková spotřebovaná energie z trakčního akumulátoru. Je patrné, že výsledek spotřeby energie je v modelu vyšší než v případě simulace v FBS. Hodnoty spotřeby se od sebe liší o 81,86 kWh (nárůst spotřeby energie v modelu oproti FBS o 44,59 %). Pro srovnání jsou ve zmíněné tabulce přepočteny spotřeby energie z akumulátoru na 1 km a 1 hod. V případě vzdálenosti je rozdíl mezi hodnotami 1,38 kWh (hodnota v modelu vyšší o 44,95 % než v aplikaci FBS) a v případě doby jízdy 62,15 kWh (spotřeba v modelu vyšší o 33,27 % než v aplikaci FBS).

Tabulka 9 - Porovnání hodnot pro simulaci v modelu a FBS

Parametr	Hodnota parametru		Jednotky
	Model	FBS	
Celková ujetá vzdálenost	60,00	60,00	km
Celková ujetá vzdálenost při využití energie z trakčního akumulátoru	60,00	59,78	km
Celková doba jízdy	1:04	1:04	hh:mm
Celková doba jízdy při využití energie z trakčního akumulátoru	1:04	0:59	hh:mm
Spotřebovaná energie z trakčního akumulátoru	265,53	183,67	kWh
Spotřeba energie z trakčního akumulátoru v přepočtu na 1 km	4,45	3,07	kWh/km
Spotřeba energie z trakčního akumulátoru v přepočtu na 1 hod. jízdy	248,93	186,78	kWh/hod

Zdroj: Autor

Z uvedených hodnot v tabulce vyplývá, že model stanovuje výsledné hodnoty přísněji než aplikace FBS. Tuto skutečnost lze považovat za výhodu, jelikož v případě přísnějšího posuzování možnosti nasazení jednotek BEMU do pravidelného provozu je uvažováno s větší rezervou v případě vzniku nepravidelností. Samotná aplikace FBS stanovuje spotřebu energie na základě zpomalení či zrychlení jednotky, výškových a směrových poměrů tratě. Oproti tomu model autora této diplomové práce stanovuje své výpočty pouze na základě vzdálenosti dvou úseků a doby jízdy nebo doby pobytu. Příkon pro vedlejší pohony je v modelu a FBS totožný. V modelu je dále uveden gradient trakce. Není přesně známo, jakým způsobem aplikace FBS hodnotu daného gradientu trakce pro své výpočty určuje (není možné zjistit ze studentské verze aplikace).

## 7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prověření provozu jednotek BEMU (battery electric multiple unit) na linkách osobní regionální železniční dopravy. Pro možnost ověření provozu jednotek byl v rámci této práce vytvořen soubor v programu Microsoft Excel. Soubor je v této práci nazýván jako „model“ a umožňuje jeho uživateli variabilní nastavení pro různé situace, ať už se jedná o pravidelný provoz nebo provoz během vzniku nepravidelností.

V první řadě byla provedena na základě dostupných dat analýza ohledně spotřebování energie v dopravě, především v dopravě železniční a s tím spojena produkce škodlivých látek do ovzduší. Následně byly porovnány poměry spotřeby energie a přepravního výkonu mezi fosilními palivy, biopalivy a elektřinou, které jsou hlavními zdroji energie pro pohyb železničních vozidel. Při srovnání spotřeby energie využitě pro pohyb dopravních prostředků bylo v roce 2019 v České republice spotřebováno z celkového množství pouze 2,2 % elektrické energie. Při tak malé spotřebě se však elektrická vozba podílela 22,0 % na přepravním výkonu. Dále pak byla porovnána účinnosti vozby trakce parní, nezávislé a závislé. Nejvyšší hodnoty účinnosti dosahují vozidla s trakčním elektromotorem a odběrem energie z trakčního vedení oproti vozidlům, která jako primární zdroj energie využívají fosilní paliva. Právě během spalování fosilních paliv dochází k produkci oxidu uhličitého a dalších škodlivých exhalacích, které jsou v daném množství nežádoucí. Náhradou železničních vozidel se spalovacími motory by měla být vozidla s alternativními pohony. Na území České republiky by se mělo především jednat o vozidla s trakčními akumulátory. Důvodem, proč nyní není možno využívat vozidla HEMU (hydrogen electric multiple unit) je, že Česká republika prozatím nedisponuje dostatečným množstvím výroby a produkcí vodíku.

V následujících odstavcích této práce byl určen princip provozu jednotek BEMU. Zhodnocena byla možnost nabíjení akumulátoru, kdy nejvhodnějším bodem je elektrizovaná železniční stanice (nabíjení statické) anebo mezistaniční úsek (nabíjení dynamické) se střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz. Před nasazením jednotek do pravidelného provozu je zapotřebí provést analýzu, zda je výhodnější provoz a nákup jednotek BEMU (o 30 až 50 % dražší než jednotka EMU, electric multiple unit) anebo výstavba trakčního vedení (zhruba 7 mil. Kč za kilometr jednokolejné trati) a následný provoz jednotek EMU. Z poslední žst., kde mohou být vozidla nabíjena, je ve většině případů garantován dojezd na vzdálenost 40 až 60 km (pro jednu cestu), v případě možnosti nabíjení v obrátové stanici se dojezd prodlužuje na dvojnásobek. Rovněž jsou v této práci uvedena vozidla s akumulátorem dostupná na železničním trhu. Kromě dvou prototypů vyrobených v roce 2019, není prozatím žádné vozidlo v pravidelném provozu. První nasazení těchto jednotek do pravidelného provozu je v plánu na dvou místech v Německu na konci roku 2023.

Hlavním cílem této práce byla již zmíněná možnost prověření provozu jednotek BEMU na jakékoliv železniční trati. Za tímto účelem byl vytvořen zmíněný soubor v programu Microsoft Excel (nazýván v této práci jako „model“). Princip výpočtů je založen na takzvané dvousložkové metodě. Ta spočívá ve sčítání energie pro trakci, respektive energie potřebné pro pohyb vozidla a pro příkon pomocných pohonů. Pomocné pohony zahrnují zejména vytápění/klimatizace, kompresory, osvětlení. Uživatel modelu má k dispozici úseky širé tratě, mezistaniční úseky a tři žst. Model je však uzpůsoben pro následné rozšíření dalších úseků. Uživatel má na začátku zmíněného modelu možnost nastavit přítomnost trakčního vedení, limitní příkony pro obnovu energie v trakčním akumulátoru, možnosti nočních odstavů, kdy vozidlo v úsporném režimu spotřebovává méně energie pro příkon pomocných pohonů, a následně cestovní doby v mezistaničních úsecích a doby pobytů v žst. (železničních stanicích). Kromě nastavení infrastrukturních parametrů uživatel nastaví základní informace o vozidle. Dále probíhají výpočty, jejichž definiční vztahy jsou uvedeny v této práci. Výstupem je tabulka se souhrnnými výsledky stavu energie v jednotlivých úsecích a spotřeby energie z trakčního vedení. Zároveň model uvažuje s rozkladem nabíjení. Tento princip je založen na postupném nabíjení trakčního akumulátoru nižším příkonem než maximálním. Obnova energie v akumulátoru je tak rozložena do celého úseku (žst. a následující mezistaniční úsek), kdy se jednotka BEMU bude nacházet v místě liniové elektrizace. Na závěr byly stanoveny návrhy rozvoje modelu.

Cílem modelu není stanovení přesné hodnoty spotřeby energie. Přesnější stanovení hodnot by mohlo nastat při zpřesnění modelu. Aktuální spotřeba se nyní může lišit při zrychlení či zpomalení vozidla anebo různých směrových a výškových parametrech trati. Orientační hodnota ale například může stanovit, jak velká spotřeba energie může nastat během uvážnutí vozidla v mezistaničním úseku spojeném s nepravidelností a tím i následným prověřením dojezdu do místa s možností nabíjení. Pro ověření funkčnosti modelu jsou v této práci uvedeny tři modelové situace, kde jsou ukázány veškeré možnosti nastavení. Vždy je uveden popis dané situace, výsledky a návrhové řešení dané situace.

V modelu byla kromě situacích na fiktivní trati prověřena i konkrétní trať na české železniční síti. Jedná se o trať číslo 201 (dle tabulek tratových poměrů 702B) v úseku mezi žst. Tábor a žst. Písek. Závěrem dané simulace je, že v případě využití vozidla se zadanými parametry je daná trať vhodná pro využití jednotek BEMU v pravidelném provozu. Prověření bylo provedeno nejen v režimu pravidelného provozu, ale i v případě vzniku nepravidelnosti za extrémních podmínek. Kromě prověření spotřeby energie z trakčního akumulátoru v modelu byla prověřena spotřeba energie i v aplikaci FBS. Rozdíl spotřeby energie popsaném v této diplomové práci a v aplikaci FBS se liší o 81,86 kWh s tím, že model z této práce ukázal větší spotřebu energie. Výsledný rozdíl mohl být způsoben přesnějším výpočtem



v FBS, kde byly uvažovány směrové a výškové parametry tratě a zrychlení nebo zpomalení vozidla.

Nasazením jednotek BEMU do pravidelného provozu lze zvýšit atraktivitu železniční dopravy, a to především zvýšením komfortu a zkrácením cestovních dob. Kromě těchto výhod vozidla dosáhnou i snížení uhlíkaté stopy a lokálních exhalací na železnici, a tím pádem se železnice může stát jedním z nejekologičtějších druhů dopravy.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] POHL, JIŘÍ: *Bezemisní železniční vozidla a infrastrukturní energetické zázemí pro jejich provoz, prezentace pořádaná Drážní společností na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze 12. 12. 2022* [cit. 2023-02-01].
- [2] ŠTURMOVÁ, IVA: *Znečišťování ovzduší z dopravy, prezentace v rámci předmětu Doprava a životní prostředí na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze* [cit. 2023-02-27].
- [3] KREJČÍ, JIŘÍ: *Využití alternativních pohonů v železničním spojení Strakonice – Tábor, bakalářská práce, Fakulta dopravní Českého vysokého učení technického v Praze, 2021* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97197>
- [4] JAVOŘÍK, TOMÁŠ: *Energetická náročnost dopravy, prezentace v rámci předmětu Doprava a životní prostředí na Fakultě dopravní Českého vysokého učení technického v Praze* [cit. 2023-02-01].
- [5] SVAZ DOVOZCŮ AUTOMOBILŮ: *Přehled stavu vozového parku, 2019* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://portal.sda-cia.cz/stat.php?p#rok=2019&mesic=12&kat=vpp&vyb=&upr=&obd=m&jine=false&lang=CZ&str=vpp>
- [6] HYBRID.CZ: *V roce 2019 se v Česku počet aut do zásuvky zvýšil o čtvrtinu, 2020* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/v-roce-2019-se-v-cesku-pocet-aut-do-zasuvky-zvysil-o-ctvrtinu/>
- [7] VĚDA PRO ŽIVOT, ŽIVOT PRO VĚDU: *Biopaliva- jejich výhody a nevýhody, 2015* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5656986/>
- [8] BENEŠ, FILIP: *Vývoj a historie parních lokomotiv na našem území, bakalářská práce, Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni, 2012* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/5440/1/BP-finalni%20verze%202012.pdf>
- [9] ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA ŽELEZNIČNÍ SÍŤE: *Správa železnic, státní organizace, 2022* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznic/zeleznice-cr/zeleznicni-sit-v-cr>
- [10] PETROL MEDIA: *Lokomotiva na CNG poprvé na české trati, 2015* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.petrol.cz/aktuality/lokomotiva-na-cng-poprve-na-ceske-trati-4777>

- [11] AKTUÁLNĚ.CZ: Komentář: Vodíkový vlak ukázal, o kolik je technologie dál než česká infrastruktura, 2022 [online]. [cit. 2023-02-01].  
Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/komentar-vodikovy-vlak-ukazal-o-kolik-je-technologie-dal-nez/r~8d3711d8dc0411ec8980ac1f6b220ee8/>
- [12] DOSTÁL, LUKÁŠ, KREJČÍ, JIŘÍ: Analýza přepravní poptávky, železniční infrastruktury a provozu v Jihočeském kraji, semestrální práce v rámci projektu Moderní trendy v železniční dopravě, Fakulta dopravní Českého vysokého učení technického v Praze, 2020 [online]. [cit. 2023-02-05].  
Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/alt-pohony-jck\\_analyza\\_poptavka-infr-provoz\\_ver2020-10-15.pdf](https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/alt-pohony-jck_analyza_poptavka-infr-provoz_ver2020-10-15.pdf)
- [13] ČD a.s.: Traťové jízdní řády, trať číslo 193 [online]. 2023 [cit. 2023-02-05].  
Dostupné z: <https://www.cd.cz/jizdni-rad/tratove-jizdni-rady/files/cz-k193-221211-01.pdf>
- [14] HABERLAND, VILIAM: Využití alternativních pohonů v železničním spojení Košice – Humenné, bakalářská práce, Fakulta dopravní Českého vysokého učení technického v Praze, 2022 [online]. [cit. 2023-02-06].  
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103869>
- [15] ZDOPRAVY.CZ: Cityjet Desiro ML číslo 200. ÖBB převzaly poslední jednotku od Siemensu pro příměstskou dopravu, 2021 [online]. [cit. 2023-02-06].  
Dostupné z: <https://zdopravy.cz/cityjet-cislo-200-rakouske-spolkove-drahy-prevzaly-posledni-jednotku-od-siemensu-pro-primestskou-dopravu-100225/>
- [16] ZDOPRAVY.CZ: Siemens má další zakázku na dvouzdrojové vlaky. 31 jednotek s bateriemi bude jezdit v Braniborsku a Berlíně, 2021 [online]. [cit. 2023-02-06].  
Dostupné z: <https://zdopravy.cz/siemens-ma-dalsi-zakazku-na-dvouzdrojove-vlaky-31-jednotek-s-bateriemi-bude-jezdit-v-braniborsku-a-berline-96799/>
- [17] ZDOPRAVY.CZ: Škoda finišuje s vývojem prvního českého bateriového vlaku, 2022 [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/skoda-finisuje-s-vyvojem-prvniho-ceskeho-baterioveho-vlaku-128102/>
- [18] ZDOPRAVY.CZ: Stadler získal další zakázku na dvouzdrojové vlaky v Německu, 2022 [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/stadler-ziskal-dalsi-zakazku-na-dvouzdrojove-vlaky-v-nemecku-105211/>
- [19] ZDOPRAVY.CZ: 185 kilometrů na baterie. Stadler dokončil výzkum akutrolejové jednotky, 2021 [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/185-kilometru-na-baterie-stadler-dokoncil-vyzkum-akutrolejove-jednotky-78082/>

- [20] STADLER: *FLIRT AKKU*, 2023 [online]. [cit. 2023-02-27].  
Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/en/flirt-akku/details/>
- [21] ČECH, JAKUB, HABERLAND, VILIAM: *Analýza technických a provozních možností vozidel s alternativními pohony v železniční dopravě, semestrální práce v rámci projektu Moderní trendy v železniční dopravě, Fakulta dopravní Českého vysokého učení technického v Praze*, 2020 [online]. [cit. 2023-02-27].  
Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/alt-pohony-jck\\_analyza%20vozidla2020.pdf](https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/alt-pohony-jck_analyza%20vozidla2020.pdf)
- [22] ALSTOM: *Alstom podepsal první smlouvu na bateriové elektrické regionální vlaky v Německu*, 2022 [online]. [cit. 2023-02-27].  
Dostupné z: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/alstom-signs-first-contract-battery-electric-regional-trains-germany>
- [23] ZDOPRAVY.CZ: *Alstom představil na saské straně Krušných hor novou jednotku na baterie*, 2021 [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/alstom-predstavil-na-saske-strane-krusnych-hor-novou-jednotku-na-baterie-91145/>
- [24] ZDOPRAVY.CZ: *Alstom prodal v Německu první bateriové vlaky, budou jezdit v Podkrušnohoří*, 2020 [online]. [cit. 2023-02-06].  
Dostupné z: <https://zdopravy.cz/alstom-prodal-v-nemecku-prvni-bateriove-vlakou-budou-jezdit-v-podkrusnohori-41707/>
- [25] ZDOPRAVY.CZ: *Doba bateriová. CAF dodá 28 dvouzdrojových jednotek pro španělské dráhy Renfe*, 2022 [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/doba-bateriova-caf-doda-28-dvouzdrojovych-jednotek-pro-spanelske-drahy-renfe-129616/>
- [26] CAF: *VRR Niederrhein-Münsterland Civity Regional BEMU vlaky*, 2023 [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.caf.net/en/soluciones/proyectos/proyecto-detalle.php?p=318>
- [27] WIKIPEDIA: *CAF Civity*, 2023 [online]. [cit. 2023-02-27].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/CAF\\_Civity](https://en.wikipedia.org/wiki/CAF_Civity)
- [28] ČECH, JAKUB, DOSTÁL, LUKÁŠ, HABERLAND, VILIAM, KREJČÍ, JIŘÍ: *Vozidla BEMU v programu FBS Simulace jízdy a spotřeby elektrických vlakových jednotek s akumulátory na lince Tábor – Jihlava*, 2022 [online]. [cit. 2023-04-14].  
Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mt/semestralky/bemu-simulace.pdf>

[29] *SPRÁVA ŽELEZNIC, STÁTNÍ ORGANIZACE: Portál provozování dráhy, Číslování tratí, 2023 [online]. [cit. 2023-04-14].*

*Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/ViewArticle.aspx?oid=594598>*

[30] *ČD a.s.: Traťové jízdní řády, trať číslo 201 [online]. 2023 [cit. 2023-04-14].*

*Dostupné z: <https://www.cd.cz/jizdni-rad/tratove-jizdni-rady/files/cz-k201-221211-01.pdf>*

Ke zhotovení práce včetně grafických příloh byly použity materiály poskytnuté Správou železnic, státní organizace. Grafické přílohy byly vytvořeny v programu Microsoft Excel a aplikaci FBS.

## 9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Účinnost jednotlivých druhů pohonů .....	12
Tabulka 2 - Přehled parametrů uvedených jednotek BEMU.....	27
Tabulka 3 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 1 .....	66
Tabulka 4 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 2 .....	77
Tabulka 5 - Vstupní parametry pro modelovou situaci číslo 3 .....	88
Tabulka 6 - Vstupní parametry pro modelovou situaci na reálné železniční trati .....	101
Tabulka 7 - Porovnání parametrů reálné jednotky BEMU a jednotky BEMU v FBS .....	113
Tabulka 8 - Vstupní parametry pro modelovou situaci v modelu a FBS na reálné železniční trati .....	114
Tabulka 9 - Porovnání hodnot pro simulaci v modelu a FBS.....	116

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici .....	19
Obrázek 2 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor s možností nabíjení v železniční stanici a mezistaničním úseku.....	19
Obrázek 3 - Schéma možnosti využití vozidla typu trolej/akumulátor/trolej s možností nabíjení v železničních stanicích .....	20
Obrázek 4 - Mapa železničních tratí v Jihočeském kraji a část tratí v kraji Plzeňském, Středočeském a Vysočina .....	21
Obrázek 5 - Grafické znázornění možnosti nabíjení trakčního akumulátoru .....	23
Obrázek 6 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro model .....	32
Obrázek 7 - Vzorový obrázek modelu se spočetnými hodnotami pro Úsek A (Žst. A).....	34
Obrázek 8 - Tabulka z modelu pro nastavení přítomnosti trakčního vedení.....	35
Obrázek 9 - Tabulka z modelu pro nastavení odstavu vozidel v nočních hodinách.....	36
Obrázek 10 - Tabulka z modelu pro nastavení limitního příkonu pro nabíjení akumulátoru	36
Obrázek 11 - Tabulka z modelu pro nastavení délek jednotlivých úseků .....	37
Obrázek 12 - Tabulka z modelu pro nastavení cestovních dob a dob pobytů .....	38
Obrázek 13 - Tabulka z modelu znázorňující celkový souhrn hodnot daného oběhu .....	39
Obrázek 14 - Tabulka z modelu znázorňující parametry jednotky BEMU, které lze zadat... 45	
Obrázek 15 - Tabulka z modelu se spočetnými hodnotami pro Úsek B (Žst. B).....	57
Obrázek 16 - Tabulka z modelu se spočetnými hodnotami pro Úsek B – C (Žst. B – Žst. C) .....	58
Obrázek 17 - Tabulka z modelu se spočetnými hodnotami pro rozložené nabíjení pro Úsek B (Žst. B).....	59
Obrázek 18 - Tabulka z modelu se spočetnými hodnotami pro rozložené nabíjení pro Úsek B – C (Žst. B – Žst. C) .....	59
Obrázek 19 - Tabulka z modelu se závěrečnými výsledky pro celý oběh.....	63
Obrázek 20 - Grafické znázornění fiktivní tratě využitě pro modelovou situaci číslo 1 .....	65
Obrázek 21 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 1 .....	67
Obrázek 22 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 1.....	68

Obrázek 23 - Grafické znázornění fiktivní tratě využité pro modelovou situaci číslo 2 .....	75
Obrázek 24 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 2 .....	78
Obrázek 25 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 2.....	79
Obrázek 26 - Grafické znázornění fiktivní tratě využité pro modelovou situaci číslo 3 .....	86
Obrázek 27 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci číslo 3.....	89
Obrázek 28 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci číslo 3.....	90
Obrázek 29 - Grafické znázornění využitých úseků v modelu pro reálnou trať.....	99
Obrázek 30 - Tabulka výstupních hodnot pro modelovou situaci na reálné železniční trati .....	102
Obrázek 31 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci na reálné železniční trati.....	103
Obrázek 32 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci v modelu.....	115
Obrázek 33 - Tabulka výstupních hodnot v jednotlivých úsecích pro modelovou situaci v FBS .....	115



## 11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Struktura spotřeby energie pro dopravu v ČR v roce 2019 .....	11
Graf 2 - Podíl tratí na délce sítě a dopravní výkony v České republice v roce 2019.....	14
Graf 3 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1 .....	70
Graf 4 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1 .....	71
Graf 5 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během následujících oběhů jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 1 .....	74
Graf 6 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2 .....	81
Graf 7 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2 .....	82
Graf 8 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 2 při změně gradientu trakční spotřeby a příkonu vedlejší spotřeby .....	85
Graf 9 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3 .....	93
Graf 10 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3 .....	94
Graf 11 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci číslo 3 při prodloužení jízdní doby z důvodu nepravidelnosti .....	98
Graf 12 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati .....	106
Graf 13 - Výstupní graf spotřeby energie z trakčního vedení během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati .....	107
Graf 14 - Výstupní graf průběhu kapacity trakčního akumulátoru během jízdy jednotky BEMU pro modelovou situaci na reálné železniční trati při změně počátečních podmínek .....	111