

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza spotřeby trakční energie kontejnerového vlaku

Karel Schejbal

Bakalářská práce

2020

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Karel Schejbal**  
Osobní číslo: **D17114**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy: Technologie a řízení dopravních systémů**  
Téma práce: **Analýza spotřeby trakční energie kontejnerového vlaku**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

### Zásady pro vypracování

Úvod

1. Rozbor aktuálního systému plateb za trakční energii v podmínkách SŽDC, s.o.
2. Výběr a charakteristika traťového úseku pro realizaci simulačních výpočtů jízdy vlaku
3. Výpočtový model pro realizaci simulačních výpočtů včetně rozboru vstupních dat
4. Výpočty jízdních dob a spotřeby trakční energie vybraného vlaku
5. Rozbor provozních dat vypovídajících o spotřebě trakční energie
6. Zhodnocení získaných výsledků

Závěr

Rozsah pracovní zprávy: 30-40  
Rozsah grafických prací: 3-4  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

MICHÁLEK T., ZELENKA J.: Trakční mechanika kur. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.  
FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY: ČSD V7. Trakční výpočty. Praha: NADAS, 1982. (Znění předpisu ve smyslu změny č. 1 z roku 1992.)  
MICHÁLEK T., ŠLAPÁK J.: Vliv elektrifikace trati Klatovy-Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie. In: Vědeckotechnický sborník ČD č. 42/2016. Praha: GR ČD, 2016. 17 s. ISSN 1214-9047.  
MICHÁLEK T., ŠIMRAL P.: Návrh úpravy metodiky výpočtu vozidlového odporu kontejnerových vlaků. In: Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: XXIII. konference s mezinárodní účastí, Sborník příspěvků, s. 283-290. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017. ISBN 978-80-7560-085-1.  
SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY: Prohlášení o dráze celostátní a regionální platné pro přípravu jízdního řádu 2020 a pro jízdní řád 2020, účinné od 14. 12. 2018, ve znění změny č. 1 účinné od 1. 4. 2019 a změny č. 2 účinné od 1. 12. 2019

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

Datum zadání diplomové práce: 6. února 2020  
Termín odevzdání diplomové práce: 22. května 2020

L.S.

---

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

---

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

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 v úplném znění, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 3. 2020

Karel Schejbal

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D. za jeho vstřícný a profesionální přístup při zpracovávání této práce.

## **ANOTACE**

Tato práce se zaměří na postup výpočtu plateb za trakční elektrickou energii v podmínkách Správy železnic, s. o. Dále jsou zde rozebrány faktory, které ovlivňují spotřebu trakční elektrické energie vlaku. V další části je popsáno numerické řešení pohybu vlaku a návrh simulačního modelu pro možnost výpočtového posouzení spotřeby trakční energie vlaku. Výsledky jsou porovnány s reálně zaznamenanými daty.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Spotřeba energie, vlak, jízdní odpory, platba za elektrickou energii, numerické řešení pohybové rovnice vlaku.

## **TITLE**

Analysis of the container train traction energy consumption.

## **ANNOTATION**

This task is focused on the process of traction electric energy payment on the Czech railways. Then, there are analyzed factors, which influence traction electric energy consumption. In next part, the numeric integration of train movement and simulation model for calculation of traction electric energy consumption are described. Results are compared with real locomotive data.

## **KEYWORDS**

Energy consumption, train, running resistance payment for electric energy, numeric integration of equation of train movement.

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM ZKRATEK .....	11
ÚVOD.....	12
1 PLATBY ZA TRAKČNÍ ENERGII V PODMÍNKÁCH SPRÁVY ŽELEZNIC, S. O...13	
1.1 Smlouva o provozování drážní dopravy .....	13
1.2 Smlouva o dodávkách trakční elektrické energie.....	13
1.2.1 Zjištění ceny za trakční elektrickou energii a nákup elektrické energie od dodavatele .....	14
1.2.2 Rozúčtování trakční elektrické energie dopravcům (hybridní model) .....	14
2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SPOTŘEBU TRAKČNÍ ENERGIE .....	19
2.1 Součinitel rotačních hmot .....	19
2.2 Jízdní odpory.....	20
2.2.1 Vozidlové odpory .....	20
2.2.2 Traťové odpory .....	23
2.3 Technologické faktory ovlivňující spotřebu trakční elektrické energie.....	25
2.3.1 Lokální omezení traťové rychlosti.....	25
2.3.2 Rekuperace.....	29
2.3.3 Obecná technologická doporučení pro úsporu trakční elektrické energie .....	29
3 VÝBĚR TRAŤOVÉHO ÚSEKU PRO REALIZACI VÝPOČTŮ .....	30
4 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO VYŠETŘOVÁNÍ JÍZDY VLAKU.....	34
4.1 Pohybová rovnice vlaku.....	34
4.2 Princip numerického řešení pohybové rovnice vlaku .....	35
4.3 Návrh simulačního modelu pro numerické řešení pohybu vlaku.....	37
5 ROZBOR PROVOZNÍCH ZÁZNAMŮ .....	40
5.1 TELOC .....	40
5.2 GPS .....	40
5.3 EMS.....	41
5.4 Zjištěná vstupní data pro výpočet .....	42
6 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH VÝPOČTŮ A JEJICH ZHODNOCENÍ.....	45
6.1 Výpočetní varianta 1. ....	45
6.2 Výpočetní varianta 2. ....	46
6.3 Výpočetní varianta 3. ....	48
6.4 Výpočetní varianta 4. ....	50

6.5	Spotřeba stanovená pomocí paušálních sazeb.....	52
6.6	Zhodnocení výsledků .....	52
	ZÁVĚR .....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	58



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b> - Závislost měrné kinetické energie vlaku na rychlosti pro různé hodnoty součinitele rotačních hmot .....	20
<b>Obrázek 2</b> - Závislost měrného výkonu potřebného k překonání vozidlového odporu vlaku na rychlosti při jízdě tunelem a otevřenou krajinou .....	24
<b>Obrázek 3</b> - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na sklonu 0 ‰ .....	27
<b>Obrázek 4</b> - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na sklonu 5 ‰ .....	27
<b>Obrázek 5</b> - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na spádu -5 ‰ .....	28
<b>Obrázek 6</b> - Průběh redukovaného sklonu tratě .....	30
<b>Obrázek 7</b> - Přibližný výškový profil tratě .....	31
<b>Obrázek 8</b> - Mapa IV. tranzitního železničního koridoru.....	32
<b>Obrázek 9</b> - Rychlostní profil vyšetřovaného traťového úseku.....	32
<b>Obrázek 10</b> - Část schématické mapy s trasou Summerau – Praha-Uhřetěves .....	33
<b>Obrázek 11</b> - Porovnání vypočítané a zaznamenané nadmořské výšky pomocí GPS .....	41
<b>Obrázek 12</b> - Závislost vozidlového odporu vlaku kategorie T4 na rychlosti .....	44
<b>Obrázek 13</b> - Uvažovaná trakční charakteristika lokomotivy řady 386 .....	44
<b>Obrázek 14</b> - Dráhový tachogram (Varianta 1.) .....	45
<b>Obrázek 15</b> - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 1.) ...	46
<b>Obrázek 16</b> - Dráhový tachogram (Varianta 2.) .....	47
<b>Obrázek 17</b> - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 2.) ...	47
<b>Obrázek 18</b> - Dráhový tachogram (Varianta 3.) .....	48
<b>Obrázek 19</b> - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 3.) ...	49
<b>Obrázek 20</b> - Dráhový tachogram (Varianta 4.) a průběh tlaku v hlavním brzdovém potrubí	50
<b>Obrázek 21</b> - Porovnání nasimulovaného a reálného růstu spotřeby (rekuperace) energie s výškovým profilem tratě .....	51
<b>Obrázek 22</b> - Relativní přesnost výpočtů jízdních dob .....	53
<b>Obrázek 23</b> - Relativní přesnost výpočtů spotřeb trakční elektrické energie .....	53
<b>Obrázek 24</b> - Relativní přesnost výpočtů rekuperace elektrické energie .....	54
<b>Obrázek 25</b> - Relativní přesnost výpočtů rozdílů spotřebované a rekuperované energie .....	54
<b>Obrázek 26</b> - Podíl reálné rekuperované energie vzhledem k vypočítaným rekuperovaným energiím .....	55
<b>Obrázek 27</b> - Podíl rekuperované a spotřebované elektrické energie .....	56

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b> - Tabulka znázorňující paušální sazby pro stanovení měrné spotřeby pro jednotlivé druhy vlaků na síti Správy železnic, s. o. pro střídavou napájecí soustavu .....	17
<b>Tabulka 2</b> - Tabulka znázorňující paušální sazby pro stanovení měrné spotřeby pro jednotlivé druhy vlaků na síti Správy železnic, s. o. pro stejnosměrnou napájecí soustavu....	17
<b>Tabulka 3</b> - Tabulka znázorňující koeficienty technologické spotřeby pro jednotlivé kategorie vlaků.....	17
<b>Tabulka 4</b> - Tabulka shrnující výsledky zavádění pomalých jízd .....	28
<b>Tabulka 5</b> - Část simulačního modelu pro numerické řešení pohybu vlaku v MS Excel. ....	37
<b>Tabulka 6</b> - část záznamu EMS .....	41
<b>Tabulka 7</b> - Vybrané parametry jednotlivých vozů .....	43
<b>Tabulka 8</b> - Shrnutí výsledků .....	52

## **SEZNAM ZKRATEK**

AC	Střídavá trakční soustava
ČSD	Československé státní dráhy
DC	Stejnoseměrná trakční soustava
EMS	System měření spotřeby trakční elektrické energie
ISOŘ	Informační systém operativního řízení
GPS	Global positioning system
GVD	Grafikon vlakové dopravy
KAPO	Informační systém pro výpočet cen za použití dráhy
VÚŽ	Výzkumný ústav železniční

## ÚVOD

V současné době je v podmínkách české železnice zaváděn tzv. hybridní model vyúčtování, umožňující placení spotřeby trakční energie na základě skutečně odebrané elektrické energie, namísto doposud používaného systému paušálních plateb. V této práci bude popsán způsob plateb za odebranou trakční elektrickou energii v podmínkách Správy železnic, s. o. vyplývající ze smlouvy o dodávkách trakční energie. Dále se práce zaměří na rozbor faktorů, které ovlivňují spotřebu trakční energie. Jedná se především o problematiku traťových a vozidlových odporů, které musí hnací vozidlo při jízdě vlaku překonávat působením tažné síly. Spotřeba energie totiž souvisí s prací, kterou vykoná tažná síla na dané dráze. Poté zde bude popsáno numerické řešení pohybové rovnice vlaku.

**Cílem práce je seznámit se s principem plateb za odebranou trakční elektrickou energii a jednotlivými faktory, které konečný výpočet ceny ovlivňují. Dále popsat veličiny vyjadřující síly působící na vlak, které zásadně ovlivňují spotřebu energie vlaku. Budou diskutována konkrétní opatření k technologickým faktorům, které zapříčiňují vyšší spotřebu energie vlaku. Dále bude navržen simulační model v MS Excel, který vhodně poslouží k numerickému řešení pohybové rovnice vlaku. Pro potřeby této práce bude zvolen konkrétní traťový úsek a konkrétní vlak. Informace o daném traťovém úseku a vlaku budou sloužit pro potřeby modelování jízdy vlaku. Získané výsledky budou porovnány s reálně zaznamenanými lokomotivními daty.**

# **1 PLATBY ZA TRAKČNÍ ENERGII V PODMÍNKÁCH SPRÁVY ŽELEZNIC, S. O.**

Tato část práce se zabývá systémem plateb za trakční elektrickou energii, vyplývajícím ze Smlouvy o dodávkách trakční elektrické energie. Uvedené informace v této kapitole jsou převzaty ze zdroje: (1).

## **1.1 Smlouva o provozování drážní dopravy**

Provozovatel dráhy (Správa železnic, s. o.) uzavírá s dopravci smlouvy o provozování drážní dopravy, které upravují zejména záležitosti související s přidělováním kapacity dráhy a provozováním drážní dopravy. Správa železnic má na základě zákona o dráhách (č. 266/1994 Sb.) poskytovat dopravcům prostřednictvím zařízení služeb tzv. základní služby, které bezprostředně souvisejí s provozováním drážní dopravy, a dále pak služby doplňkové a služby pomocné. Mezi doplňkové služby ve smyslu zákona o dráhách patří také dodávky trakční elektrické energie. Zákon o dráhách v tomto zohledňuje aktuální požadavky evropské legislativy, zejména směrnice 2012/34/EU.

## **1.2 Smlouva o dodávkách trakční elektrické energie**

Od 1. 1. 2019 je Správa železnic poskytovatelem tzv. doplňkové služby dodávek trakční elektrické energie pro potřeby dopravců, kteří využívají závislou trakci, a to na všech elektrizovaných dráhách provozovaných Správou železnic. Dopravce musí mít před uzavřením písemné Smlouvy o dodávkách trakční elektrické energie se Správou železnic uzavřenou písemnou Smlouvu o provozování drážní dopravy.

Předmětem Smlouvy o dodávkách trakční elektrické energie jsou záležitosti související se závazkem Správy železnic poskytnout dopravci doplňkovou službu dodávek trakční elektrické energie a se závazkem dopravce hradit Správě železnic za tuto službu cenu dle této smlouvy. Správa železnic poskytuje doplňkovou službu dodávek trakční elektrické energie tak, aby její poskytnutí bylo umožněno všem dopravcům za stejných podmínek vylučujících zvýhodnění kteréhokoliv z nich.

Správa železnic nakoupí ve prospěch dopravce pro každý rok účinnosti smlouvy trakční elektrickou energii v předpokládaném objemu, který bude odpovídat objemu spotřeby trakční elektrické energie dopravcem vypočítaným podle stavu jeho spotřeby v předchozím roce, a zajistí dodávání trakční elektrické energie na sběrač elektrického hnacího vozidla dopravce.

### **1.2.1 Zjištění ceny za trakční elektrickou energii a nákup elektrické energie od dodavatele**

Správa železnic bude pro každý rok účinnosti Smlouvy o dodávkách trakční elektrické energie následující po roce 2019 formou elektronické aukce na komoditní burze soutěžit cenový index dodavatele trakční elektrické energie vyjádřený v korunách českých. Nákup trakční elektrické energie bude probíhat tak, že příslušný dodavatel trakční elektrické energie poskytne Správě železnic službu postupného nákupu podle cenového vzorce se sčítacím nebo násobným indexem. Celkový předpokládaný objem trakční elektrické energie nakoupený Správou železnic ve prospěch dopravce bude pro každý rok účinnosti smlouvy následující po roce 2019 odpovídat objemu spotřeby trakční elektrické energie dopravcem v předchozím roce. Správa železnic se v souvislosti s nakupováním trakční elektrické energie ve prospěch dopravce zavazuje vynakládat veškeré úsilí, které po něm lze rozumně požadovat k tomu, aby trakční elektrická energie byla na komoditní burze nakoupena způsobem co nejvýhodnějším pro obě smluvní strany. Výpočet násobného a sčítacího indexu je uveden ve zdroji: (1).

### **1.2.2 Rozúčtování trakční elektrické energie dopravcům (hybridní model)**

System rozúčtování trakční elektrické energie mezi dopravce využívající závislou trakci na infrastruktuře Správy železnic je zaveden pomocí tzv. „hybridního modelu“. Tento způsob umožňuje účtovat spotřebovanou trakční elektrickou energii jednotlivým dopravcům, jak za elektrická hnací vozidla (popř. elektrické jednotky) osazené systémem měření spotřeby elektřiny (EMS), tak i pro elektrická hnací vozidla bez EMS.

V případě hnacích vozidel vybavených systémem EMS bude spotřeba trakční elektrické energie stanovena na úrovni jednotlivého vlaku dle příslušných kategorií vlaku dle Smlouvy o provozování drážní dopravy. Správa železnic bude zajišťovat svým jménem a na své náklady dodávku a montáž měřicí skříně včetně programového vybavení řídicí a přenosové jednotky a dodávku anténního systému včetně propojovací kabeláže s měřicí skříní.

Měrnou spotřebou se ve Smlouvě o dodávkách trakční elektrické energie rozumí spotřeba trakční elektrické energie stanovená na sběrači hnacího vozidla na jednotku dopravního výkonu bez technických ztrát v trakční soustavě. Tato měrná spotřeba slouží jako odhad ke stanovení spotřeby trakční energie hnacích vozidel, která nejsou vybavena EMS.

Vstupem do hybridního modelu budou vlaky rozděleny do následujících skupin:

### **a) Vlaky bez funkčního EMS**

V případě, že u všech elektrických hnacích vozidel, podílejících se na realizaci dopravního výkonu, není možné dosáhnout hodnoty naměřené spotřeby trakční elektrické energie, je vlak vyhodnocen jako neměřený a pro tento dopravní výkon se vypočítá spotřeba trakční elektrické energie pomocí měrných spotřeb.

### **b) Vlaky s funkčním EMS**

V případě, že u všech elektrických hnacích vozidel podílejících se na realizaci dopravního výkonu je možné dosáhnout hodnoty naměřené spotřeby trakční elektrické energie, je vlak vyhodnocen jako měřený a spotřeba trakční elektrické energie se zahrnuje do celkové spotřeby elektrického hnacího vozidla za celý měsíc.

### **c) Vlaky s více elektrickými hnacími vozidly a současně kombinací elektrických hnacích vozidel s a bez EMS**

V případě, že pouze u části vlaku je možné dosáhnout hodnoty naměřené spotřeby trakční elektrické energie, je vlak vyhodnocován jako kombinovaný a to tak, že je pro něj vypočítána spotřeba trakční elektrické energie pomocí měrných spotřeb (stejně jako u neměřeného vlaku – bez EMS) a od této hodnoty je odečtena spotřeba trakční elektrické energie na měřených elektrických hnacích vozidlech. Tato odečtená naměřená spotřeba trakční elektrické energie je zahrnuta do celkové spotřeby trakční elektrické energie elektrického hnacího vozidla za celý měsíc.

Hybridní model pracuje s pojmem technologická spotřeba elektrického hnacího vozidla. Vychází se z faktu, že měřené elektrické hnací vozidlo vykazuje spotřebu i „mimo vlak“ v systému ISOŘ/KAPO (čas odjezd, čas dojezd). Koeficientem technologické spotřeby budou zatíženy neměřené vlaky, protože návrh nových měrných spotřeb bude vycházet ze statistického sledování naměřených hodnot spotřeby sledovaných kategorií vlaků v čase odjezd vlaku – dojezd vlaku. Jedná se tedy o průměrnou hodnotu spotřeby hnacích vozidel „mimo vlak“. Hodnoty koeficientů technologické spotřeby jsou uvedeny v tabulce 3.

Rekuperace bude vypořádána pouze za měřená elektrická hnací vozidla. Naměřené množství rekuperované energie bude oceněno jednotkovou cenou trakční elektrické energie [Kč/MWh], kterážto cena bude stejná jako v případě nákupu elektrické energie od příslušného dodavatele. Vyjádření množství rekuperované a takto oceněné trakční elektrické energie bude součástí přílohy faktury pro dopravce.

Služba dodávek bude sledována a vyhodnocována zvlášť pro stejnosměrnou trakční soustavu a zvlášť pro střídavou trakční soustavu. Ve Smlouvě o dodávkách trakční elektrické energie je detailně rozlišován měřený odběr, čímž se rozumí odběr naměřený pomocí EMS, který se bude zvyšovat o koeficient technických ztrát v trakční soustavě. Tento odběr bude sloužit pro výpočet účtované trakční elektrické energie. Stejný princip bude užít i v případě výpočtu odebrané trakční elektrické energie pomocí koeficientů měrných spotřeb v případech předvídaných (hnací vozidla bez EMS), kteréžto odběry budou opět navýšeny o koeficient technických ztrát. Velikost koeficientu technických ztrát v trakční soustavě je určována pro stejnosměrnou trakční soustavu a střídavou trakční soustavu zvlášť. Hodnoty těchto ztrát jsou určeny Správou železnic a následně ověřeny výpočtem na základě měření, přičemž vstupní hodnoty pro funkčnost hybridního modelu jsou 18 % pro stejnosměrnou trakční soustavu a 9 % pro střídavou trakční soustavu. Důvodem jsou vyšší ztráty ve stejnosměrném trakčním vedení. Tyto hodnoty technických ztrát se mohou změnit poté, pokud bude prokázána jejich změna hodnověrným technickým výpočtem a doloženým měřením.

Pro případy předvídané jsou měrné spotřeby pro jednotlivé kategorie vlaků v takových hodnotách, které byly stanoveny na základě analýzy dostupných dat získaných z elektrických hnacích vozidel vybavených EMS.

Měrné spotřeby jsou přepočteny na úroveň sběrače hnacího vozidla. Hodnoty jsou stanoveny s rozlišením typu trakční soustavy, ročního období a kategorie vlaku.

Výpočet konečné měrné (neměřené) spotřeby elektrické energie lze provést pomocí vztahu:

$$MS_k = MS \cdot k_r \cdot k_t \cdot k_z \quad [\text{kWh/tis.hrtkm}] \quad (1)$$

kde:

$MS$  – měrná spotřeba trakční elektrické energie;

$k_r$  – koeficient ročního období;

$k_t$  – koeficient technologické spotřeby;

$k_z$  – koeficient technických ztrát.



**Tabulka 1** - Tabulka znázorňující paušální sazby pro stanovení měrné spotřeby pro jednotlivé druhy vlaků na síti Správy železnic, s. o. pro střídavou napájecí soustavu

<b>Střídavá trakční soustava – AC</b>					
<b>Měrné spotřeby – MS</b>		<b>Koeficient ročního období – <math>k_r</math></b>			
Typ vlaku	Měrná spotřeba [kWh/tis.hrtkm]	Prosinec – Únor	Březen – Květen	Červen – Srpen	Září – Listopad
Ex, R, SC, EC, IC, Sp, Sv	24,5	1,02	1	1	1,02
Os	34,5	1,02	1	1	1,02
Nex, Rn, Pn, Mn	14,75	1	1	1	1
Lv	29	1	1	1	1
<b>Koeficient technických ztrát – <math>k_z = 1,09</math></b>					

Zdroj: (1), upravil autor

**Tabulka 2** - Tabulka znázorňující paušální sazby pro stanovení měrné spotřeby pro jednotlivé druhy vlaků na síti Správy železnic, s. o. pro stejnosměrnou napájecí soustavu

<b>Stejnoseměrná trakční soustava - DC</b>					
<b>Měrné spotřeby - MS</b>		<b>Koeficient ročního období - <math>k_r</math></b>			
Typ vlaku	Měrná spotřeba [kWh/tis.hrtkm]	Prosinec - Únor	Březen - Květen	Červen - Srpen	Září - Listopad
Ex, R, SC, EC, IC, Sp, Sv	23,3	1,03	1	1	1,03
Os	33,5	1,03	1	1	1,03
Nex, Rn, Pn, Mn	13,35	1	1	1	1
Lv	29	1	1	1	1
<b>Koeficient technických ztrát - <math>k_z = 1,18</math></b>					

Zdroj: (1), upravil autor

**Tabulka 3** - Tabulka znázorňující koeficienty technologické spotřeby pro jednotlivé kategorie vlaků

<b>Koeficient technologické spotřeby - <math>k_t</math></b>	
Typ vlaku	Hodnota
Ex, R, SC, EC, IC, Sp, Sv	1,11
Os	1,11
Nex, Rn, Pn, Mn	1,08
Lv	1

Zdroj: (1), upravil autor

Z tabulky 1 a 2 je patrné, že největší měrná spotřeba elektrické energie je uvažována u osobních vlaků. Je to z důvodu toho, že osobní vlaky často zastavují a opětovně se rozjíždějí, čímž vzniká daleko větší spotřeba energie než u jízdy ustálenou rychlostí. Tato problematika rozjezdů bude diskutována níže. Dalším faktem je, že koeficient ročního období je vyšší v zimních měsících, a to kvůli nutnosti vytápět osobní vlaky.

Vzorec pro výpočet konečné (měřené pomocí EMS) spotřeby trakční elektrické energie vypadá následovně:

$$EMS_k = M_s \cdot k_z \cdot k_b \quad [\text{kWh}] \quad (2)$$

kde:

$M_s$  – spotřeba naměřená pomocí EMS;

$k_z$  – koeficient technických ztrát;

$k_b$  – koeficient vyrovnání energetické bilance (průměrná hodnota 5 %).

## 2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SPOTŘEBU TRAKČNÍ ENERGIE

Tato kapitola bude zaměřena na faktory ovlivňující jízdu vlaku, a které mají zásadní vliv na spotřebu trakční elektrické energie.

### 2.1 Součinitel rotačních hmot

Součinitel rotačních hmot zohledňuje kinetickou energii rotačních pohybů některých částí vozidel (dvojkolí, součástí převodovek, rotory trakčních motorů). Jedná se o určité teoretické navýšení hmotnosti vozidla, které postihuje skutečnost, že vlivem rotujících hmot má toto vozidlo vyšší kinetickou energii, než by odpovídalo čistě posuvnému pohybu tělesa o hmotnosti  $m$  (2).

Konkrétní hodnota součinitele rotačních hmot je vždy závislá na parametrech daného vozidla (hmotnost, stav ložení, provedení pohonu). Běžně se však součinitel rotačních hmot pohybuje pro různé kategorie vozidel přibližně v těchto hodnotách (2):

- osobní vozy: 0,03 – 0,05;
- prázdné nákladní vozy: 0,06 – 0,10;
- ložené nákladní vozy: 0,02 – 0,06;
- elektrické a motorové lokomotivy: 0,10 – 0,25;
- elektrické a motorové jednotky: 0,05 – 0,15.

Na obrázku 1 je možné vidět, jaký vliv má hodnota součinitele rotačních hmot na kinetickou energii vlaku v závislosti na rychlosti jízdy. Kinetickou energii vlaku je možné vyjádřit vztahem:

$$E_k = 0,5 \cdot m \cdot (1 + \rho) \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (3)$$

kde:

$m$  – hmotnost vlaku [kg];

$\rho$  – součinitel rotačních hmot [-];

$v$  – rychlost vlaku [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Na obrázku 1 je znázorněna měrná kinetická energie vlaku, vztažená na jednotku hmotnosti vlaku, která může být vyjádřena jako:

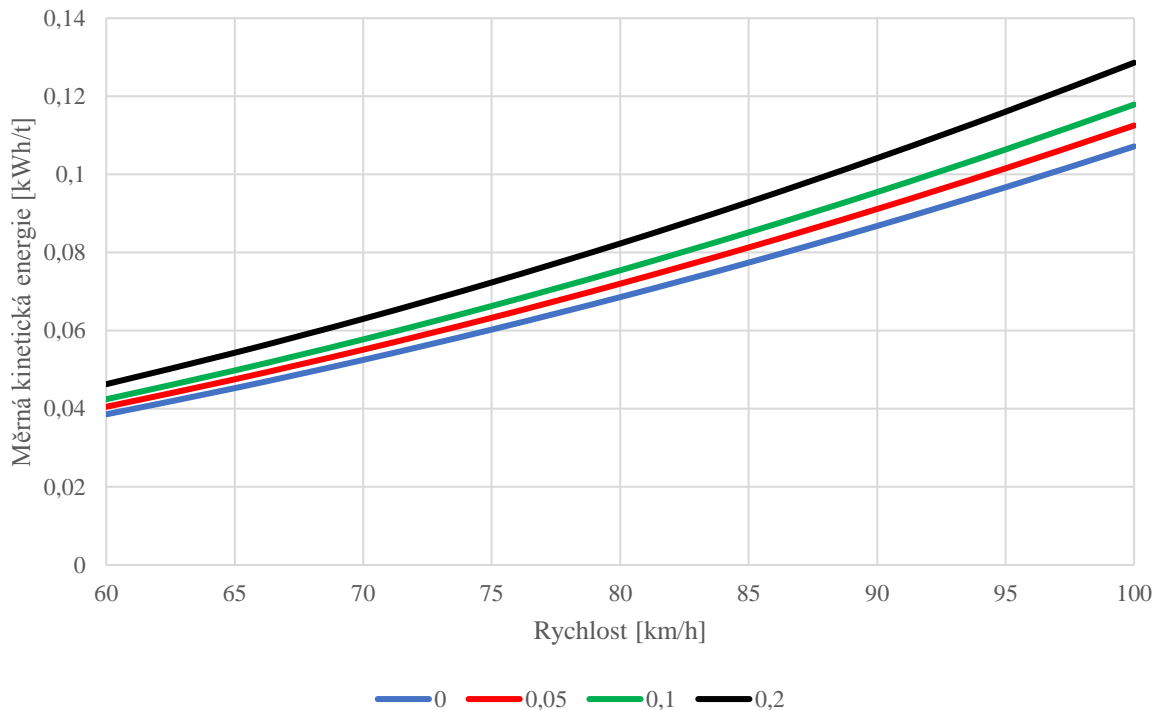
$$\frac{E_k}{M} = \frac{(1+\rho) \cdot v^2}{7200} \quad [\text{kWh/t}] \quad (4)$$

kde:

$M$  – hmotnost vlaku [t];

$\rho$  – součinitel rotačních hmot [-];

$v$  – rychlost vlaku [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].



**Obrázek 1** - Závislost měrné kinetické energie vlaku na rychlosti pro různé hodnoty součinitele rotačních hmot

Zdroj: autor

## 2.2 Jízdní odpory

Jako jízdní odpory označujeme síly, které v obecném případě působí proti pohybu vlaku a nejsou (na rozdíl od brzdě síly) vyvolané záměrně. Tyto síly jsou z důvodu působení proti pohybu vlaku na pravé straně pohybové rovnice vlaku (viz kapitola 4.1), a to se záporným znaménkem. Podle příčiny vzniku jízdních odporů se dělí na vozidlové a traťové (2, 3).

### 2.2.1 Vozidlové odpory

Tyto odpory jsou závislé zejména na konstrukci a technickém stavu kolejového vozidla (vlakové soupravy). Mezi dílčí odpory, které se podílejí na celkovém vozidlovém odporu patří (2):

- Odpor z valení, vznikající v důsledku odvalování kol po kolejnicích. Železniční kolo a kolejnice se vlivem svislých kolových sil mírně deformují, proto se vzájemně nedotýkají v bodě, ale v malé plošce tvaru elipsy o velikosti cca 2 cm<sup>2</sup>.
- Odpor v ložiskách (nápravových). Velikost odporu v ložiskách závisí zejména na typu ložiska, druhu a kvalitě maziva, zatížení a rychlosti jízdy. V současné době se používají zejména ložiska valivá, která mají oproti kluzným ložiskům výrazně nižší odpor.
- Odpor z neklidné jízdy, který vzniká při jízdě po nerovnostech trati.
- Odpor vzduchu, vznikající v důsledku obtékání tělesa při pohybu v určitém látkovém prostředí. Obecně je možné vypočítat velikost odporové síly prostředí pomocí vztahu:

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Kde:

$C_x$  – tvarový součinitel odporu vzduchu, charakterizuje tvar vozidla z hlediska jeho obtékání proudícím vzduchem a v případě jízdy v tunelu je tvarový součinitel násoben hodnotou tunelového faktoru [-];

$\rho$  – měrná hustota prostředí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ], (pro vzduch 1,25  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$S$  – velikost čelní plochy vozidla [ $\text{m}^2$ ];

$v$  – rychlost vozidla vůči prostředí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

- Odpor nedokonale odlehlých brzdových zdrží, který může vznikat u vozidel se špalíkovou brzdou, pokud při odbrzdění nedojde k úplnému odlehnutí zdrží.
- Odpor nabíjecího generátoru, který vykazují starší osobní vozy vybavené nabíjecím generátorem, který od spínací rychlosti pracuje s konstantním výkonem v řádu jednotek kW, dodávaným do baterií vozu.
- Výběhový odpor hnacího vozidla, jehož příčinou jsou ztráty vznikající v soustavě pohonu, které při výběhu vozidla nejsou překonávány tažnou silou, a proto se projevují jako zvýšený vozidlový odpor.

Celkový vozidlový odpor je tedy součtem všech dílčích vozidlových odporů (2, 3). Pro praktické použití se vozidlový odpor vyjadřuje vztahem:

$$O_V = M \cdot g \cdot o_v \quad [\text{N}] \quad (5)$$

kde:

$M$  – hmotnost vlaku [t];

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$o_v$  – měrný vozidlový odpor, který je předpisem ČSD V7 (4) definován pro jednotlivé kategorie vlaků [ $\text{N/kN}$ ].

Výpočet měrných vozidlových odporů pro jednotlivé kategorie vlaků (4):

- čtyřnápravové lokomotivy:  
$$o_{Lok4n} = 2,8 + 0,00085 \cdot V^2;$$
- šestnápravové lokomotivy:  
$$o_{Lok6n} = 2,8 + 0,02 \cdot V + 0,0004 \cdot V^2;$$
- U2 – prázdné dvounápravové nákladní vozy:  
$$o_{U2} = 2 + 0,00125 \cdot V^2;$$
- U4 – prázdné čtyřnápravové nákladní vozy:  
$$o_{U4} = 2 + 0,0008 \cdot V^2;$$
- S – vozy se středním nápravovým zatížením:  
$$o_S = 1,9 + 0,000465 \cdot V^2;$$
- T2 – ložené dvounápravové nákladní vozy:  
$$o_{T2} = 1,7 + 0,0033 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2;$$
- T4 – ložené čtyřnápravové nákladní vozy:  
$$o_{T4} = 1,3 + 0,00033 \cdot V^2;$$
- R – rychlíkové osobní vozy:  
$$o_R = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2;$$
- M2 – lehké dvounápravové osobní vozy:  
$$o_{M2} = 1,5 + 0,0089 \cdot V^2;$$
- M4 – lehké čtyřnápravové osobní vozy:  
$$o_{M4} = 1,8 + 0,01 \cdot V + 0,000476 \cdot V^2.$$

V roce 1991 zjišťoval Výzkumný ústav železniční (dále jen VÚŽ) měrné vozidlové odpory některých typů vozů. Výsledkem byla úprava některých matematických vzorců pro výpočet měrných vozidlových odporů, a tím pádem i změna předpisu ČSD V7 (5):

- R – rychlíkové vozy s kotoučovou brzdou:  
$$o_{Rk} = 1,803 + 0,0005 \cdot V + 0,000233 \cdot V^2;$$
- R – rychlíkové vozy s podvozky Görlitz:  
$$o_{Rg} = 2,7 + 0,00017 \cdot V^2;$$
- S – vozy se středním nápravovým zatížením:

$$o_s = 1,9 + 0,00035 \cdot V^2;$$

- T2 – ložené dvounápravové nákladní vozy:

$$o_{T2} = 1,676 + 0,0003 \cdot V + 0,000288 \cdot V^2;$$

- T4 – ložené čtyřnápravové nákladní vozy:

$$o_{T4} = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2;$$

- U2 – prázdné dvounápravové nákladní vozy:

$$o_{U2} = 2,885 - 0,014 \cdot V + 0,000655 \cdot V^2;$$

- U4 – prázdné čtyřnápravové nákladní vozy:

$$o_{U4} = 2,278 - 0,0004 \cdot V + 0,000437 \cdot V^2.$$

kde:

$V$  – rychlost [km/h].

*„Za poslední desetiletí udělala železniční technika relativně velký pokrok. Dnešní koridorové tratě se vyznačují kvalitní geometrickou polohou koleje, což přispívá ke klidnému chodu vozidel; současné nákladní vozy jsou vybaveny kompaktními ložiskovými jednotkami a nekovovými brzdovými špalíky, což jsou zase faktory snižující vozidlové odpory těchto vozů. Pro výpočet technických norem zátěže se však u nás stále používají metody, které vycházejí z předpisu ČSD V7 z 80. let minulého století a které v některých ohledech ne zcela přesně postihují jednak technické parametry moderních vozidel, ale také samotnou fyzikální podstatu jízdy vlaku“ (6). V publikaci (6) jsou uvedeny návrhy pro úpravu matematických vzorců pro výpočet měrných vozidlových odporů.*

### 2.2.2 Traťové odpory

Tato skupina jízdnicích odporů je ovlivněna především železniční infrastrukturou, tedy traťovými poměry. Mezi traťové odpory patří: zvýšený aerodynamický odpor při jízdě tunelem, odpor ze sklonu koleje, odpor z jízdy obloukem.

#### Zvýšený aerodynamický odpor při jízdě tunelem

Na obrázku 2 je znázorněn vliv jízdy vlaku kategorie T4 tunelem na výkon potřebný k překonání zvýšeného vozidlového (aerodynamického) odporu. Vozidlový odpor kategorie T4 vyjadřuje vztah:

$$O_{T4} = (1,3 + \tau \cdot 0,00015 \cdot V^2) \cdot M \cdot g \quad [\text{N}] \quad (6)$$

kde:

$V$  – rychlost vlaku [km/h];

$M$  – hmotnost vlaku [t];

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ];

$\tau$  – tunelový faktor (pro jízdu otevřenou krajinou je roven 1, pro jízdu tunelem cca 2).

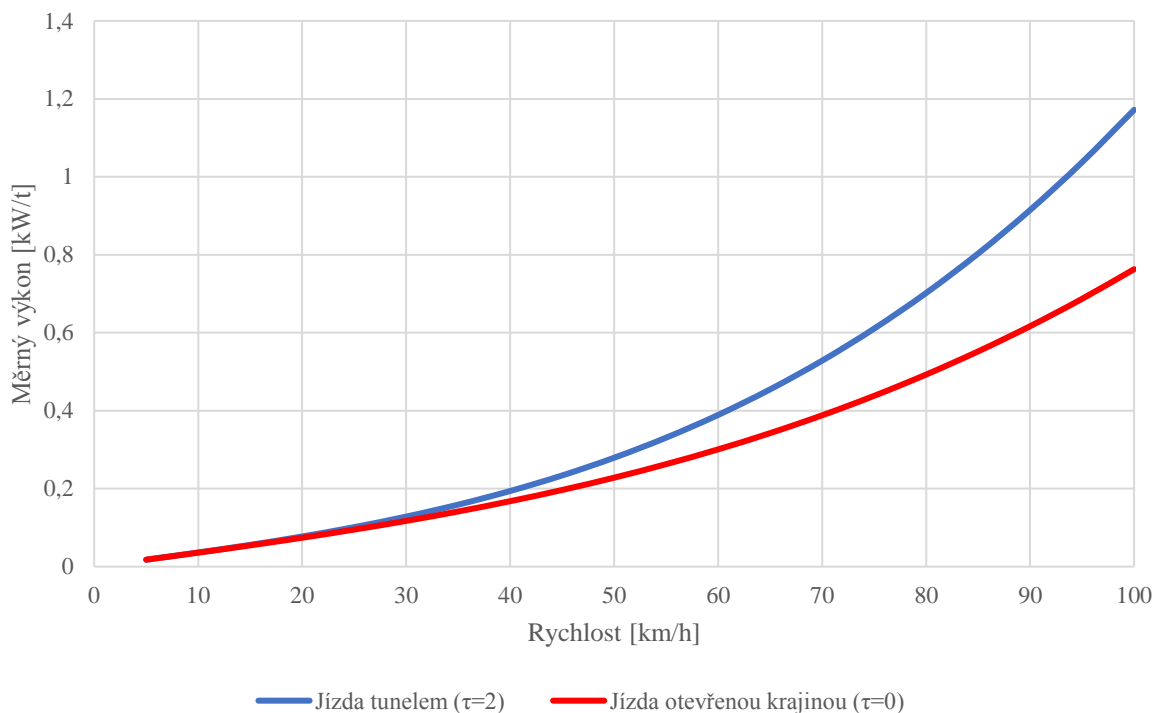
Výkon potřebný k překonání daného vozidlového odporu je možné vyjádřit vztahem:

$$P = O_v \cdot v \quad [\text{W}] \quad (7)$$

kde:

$O_v$  – vozidlový odpor [N];

$v$  – rychlost vlaku [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].



**Obrázek 2** - Závislost měrného výkonu potřebného k překonání vozidlového odporu vlaku na rychlosti při jízdě tunelem a otevřenou krajinou

Zdroj: autor

### Odpor ze sklonu koleje

Vlak při jízdě do stoupání překonává určitou část tíhové síly. Z fyzikálního hlediska se jedná o typický případ tělesa na nakloněné rovině. Sklon koleje se vyjadřuje v [%], což znamená číselné vyjádření změny výšky koleje v [m] vztažené na základnu o délce 1000 m. Při jízdě po spádu tento odpor nabývá záporných hodnot, a tudíž nepůsobí proti pohybu vlaku (jako ostatní odpory), ale ve směru pohybu vlaku (2). Odpor ze sklonu pro vozidlo (vlak) o hmotnosti  $M$  vyjadřuje vztah:



$$O_s = M \cdot g \cdot s \quad [\text{N}] \quad (8)$$

kde:

$M$  – hmotnost vozidla (vlaku) [t];

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$s$  – sklon [‰].

### **Odpor z jízdy obloukem**

Při jízdě obloukem koleje se musí vozidlo při pohybu po kruhové dráze kolem středu oblouku zároveň natáčet. Toto natáčení se při ustálené poloze vozidla vůči koleji děje okolo určitého bodu. Při tomto natáčení vznikají mezi koly a kolejnicemi skluzové (třecí) síly. Největší vliv na velikost tohoto odporu má rychlost jízdy, poloměr oblouku, konstrukce pojezdu vozidla a součinitel tření mezi koly a kolejnicemi (2). Odpor z oblouku pro konkrétní vozidlo o hmotnosti  $M$  lze vyjádřit vztahem:

$$O_R = M \cdot g \cdot o_r \quad [\text{N}] \quad (9)$$

kde:

$M$  – hmotnost vozidla [t];

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$o_r$  – měrný odpor z oblouku [N/kN], určuje se pomocí empirických vztahů.

Jedním ze způsobů výpočtu měrného odporu z oblouku dle ČSN 736360-1:2008 je:

$$o_r = \frac{600}{R} \quad [\text{N/kN}] \quad (10)$$

kde:

$R$  – poloměr oblouku [m].

## **2.3 Technologické faktory ovlivňující spotřebu trakční elektrické energie**

Náklady na trakční elektrickou energii jsou jednou z podstatných částí provozních nákladů dopravce. Určitá část těchto provozních nákladů přitom může být ovlivněna stavem železniční infrastruktury a řízením železničního provozu. Následující technologické faktory tedy mohou být výrazně ovlivněny činností správce železniční infrastruktury (7).

### **2.3.1 Lokální omezení traťové rychlosti**

Jednou z nejrozšířenějších příčin zvýšení spotřeby trakční elektrické energie je lokální omezení traťové rychlosti, zpravidla relativně krátké délky, kdy za koncem tohoto omezení následuje

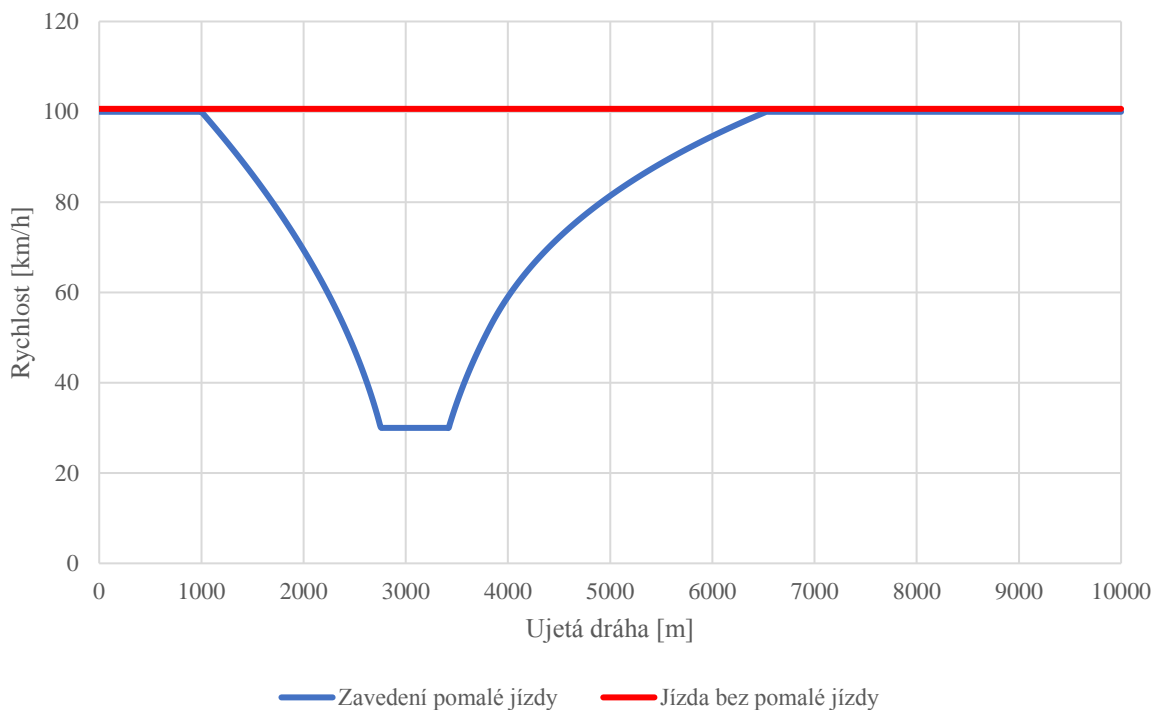
opětovný rozjezd vlaku na traťovou rychlost. Jedná se typicky o případy zavádění pomalých jízd, a to z těchto důvodů (7):

- špatný stav železničního spodku nebo svršku (mosty, výhybky),
- nedostatečné rozhledové poměry nebo nedostatečné zabezpečení železničního přejezdu,
- jiné ohrožení (padání skal na trať apod.),
- nedostatečné zabezpečení vlakové cesty (výměn),
- omezení rychlosti přes výhybky pravidelně projížděné projíždějícími vlaky (spojky, přechody na jinou trať).

Průjezd vlaku místem s lokálním omezením rychlosti (pomalá jízda) lze z pohledu vlakové dynamiky rozdělit do tří úseků (7):

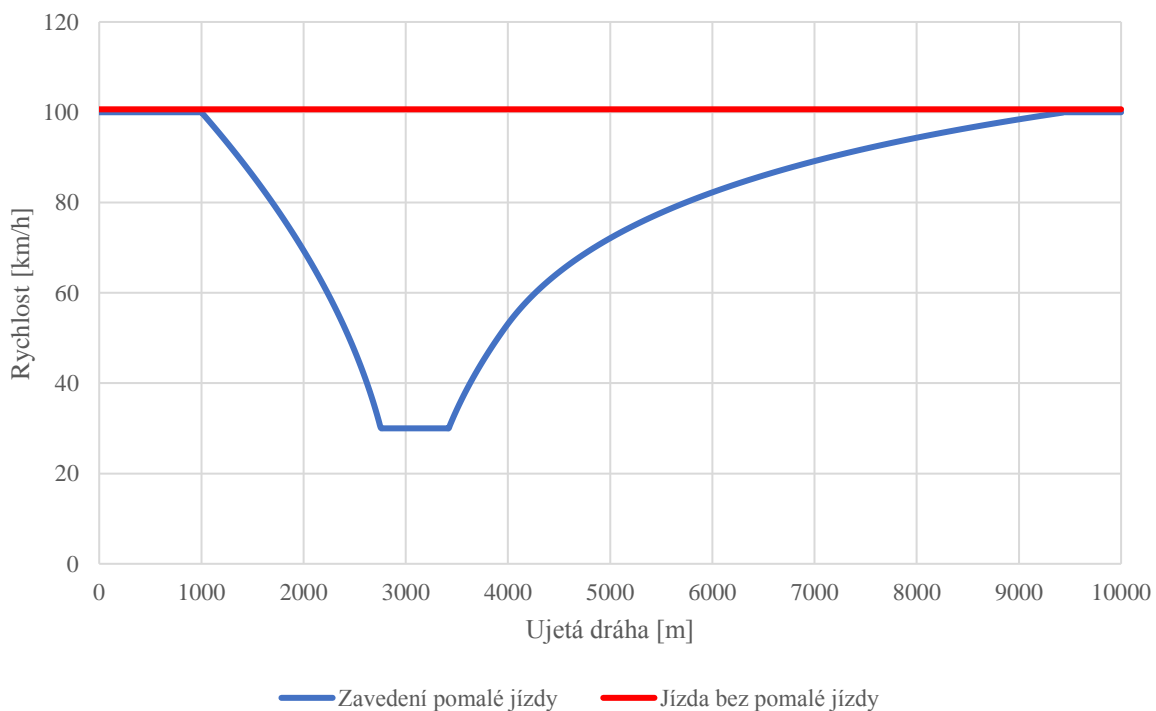
- snížení rychlosti (brzdění, případně i výběh před brzděním),
- vlastní pomalá jízda,
- rozjezd na původní rychlost.

Právě opětovný rozjezd na původní traťovou rychlost je z hlediska energetické spotřeby nejnáročnější. Pokud se pomalá jízda nachází na spádu, pak jsou energetické ztráty zanedbatelné (7). Negativně poznamenaná zůstane samozřejmě jízdní doba. Na obrázcích 3, 4, 5 je možné vidět dráhové tachogramy pro jízdu vlaku kategorie T4 konstantní rychlostí, ve srovnání se zavedením pomalé jízdy rychlostí 30 km/h, pro různé hodnoty sklonu tratě. Hmotnost vlaku je 1400 t a je tažen moderní elektrickou lokomotivou s účinností přeměny elektrické energie na energii mechanickou 85 %. Maximální výkon lokomotivy je uvažován 4 MW a maximální tažná síla 275 kN. Sledovaný úsek je dlouhý 10 km.



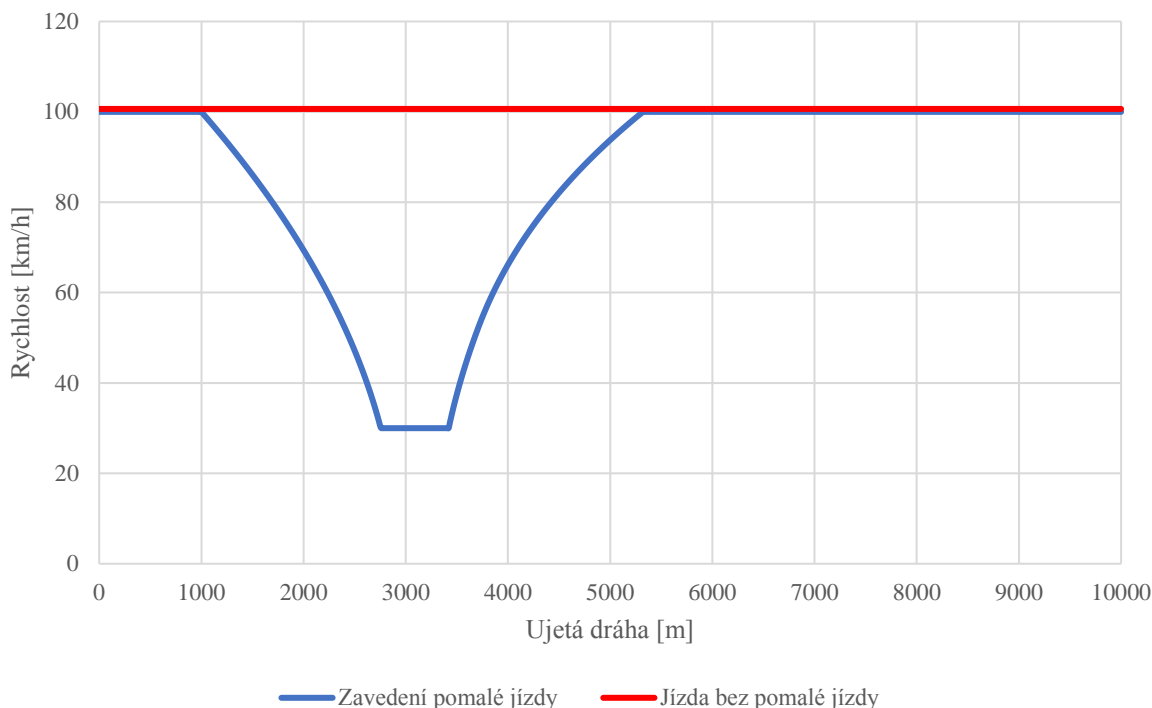
**Obrázek 3** - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na sklonu 0 %

Zdroj: autor



**Obrázek 4** - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na sklonu 5 %

Zdroj: autor



**Obrázek 5** - Dráhový tachogram vlaku kategorie T4 při zavedení pomalé jízdy a bez pomalé jízdy na spádu -5 %

Zdroj: autor

V tabulce 4 jsou shrnuty výsledky výpočtu jízdních dob a spotřeb elektrické energie provedené metodou numerické integrace.

**Tabulka 4** - Tabulka shrnující výsledky zavádění pomalých jízd

Shrnutí výsledků			
Sklon	Sledovaná veličina	Bez pomalé jízdy	Pomalá jízda
0 ‰	Jízdní doba [min]	6	8,3
	Spotřeba energie [kWh]	125,8	257,3
5 ‰	Jízdní doba [min]	6	8,7
	Spotřeba energie [kWh]	350,4	437,3
-5 ‰	Jízdní doba [min]	6	8
	Spotřeba energie [kWh]	-195,1	-4,2

Zdroj: autor

Z tabulky 4 je patrné, že při zavedení pomalé jízdy vzroste spotřeba energie cca o 100 % v případě jízdy vlaku na vodorovné přímé koleji.

Na obrázku 4 je možné vidět, že při sklonu 5 ‰ vlak potřebuje mnohem delší vzdálenost pro opětovný rozjezd na 100 km/h. Jíždě ve stoupání také odpovídá nejvyšší spotřeba trakční energie, tak jak je možné vidět v tabulce 4.

V případě jízdy na spádu je naopak možné vidět, že jeho spotřeba energie je záporná (vlak je tedy nucen brzdit).

U zavedení pomalých jízd je vždy možné sledovat zhruba třetinový nárůst jízdny doby.

### **2.3.2 Rekuperace**

Výrazné úspory trakční elektrické energie umožňuje využití rekuperace při brzdění. Tento aspekt je ale záležitostí především dopravce a to, jestli disponuje hnacími vozidly s možností rekuperace. Také záleží, zda je v daném úseku trati rekuperaci možné provádět. Rekuperace se děje díky elektrodynamické brzdě, která při brzdění vrací elektrickou energii zpět do trakčního vedení, odkud ji mohou odebírat jiná vozidla (2). Z hlediska technologie jízdy je možno rekuperaci rozdělit na rekuperační brzdění spádové a zastavovací (7).

Při spádovém brzdění je udržována konstantní rychlost (traťová) při jízdě vlaku na urychlujícím spádu. Je-li urychlující síla působením spádu větší než vozidlový odpor vlaku, je možno v daném traťovém úseku využít pro rekuperaci část mechanické potenciální energie vlaku.

*„Při měřeních prováděných ČD VÚŽ na trati Praha – Kolín bylo prokázáno, že v průměru 30 % elektrické energie odebrané vlakem z troleje během rozjezdu, příp. udržování konstantní rychlosti bylo při brzdění navraceno do trolejového vedení. Odběr rekuperované energie jinými vozidly byl přitom zjištěn ve více než 90 % případů“ (7).*

### **2.3.3 Obecná technologická doporučení pro úsporu trakční elektrické energie**

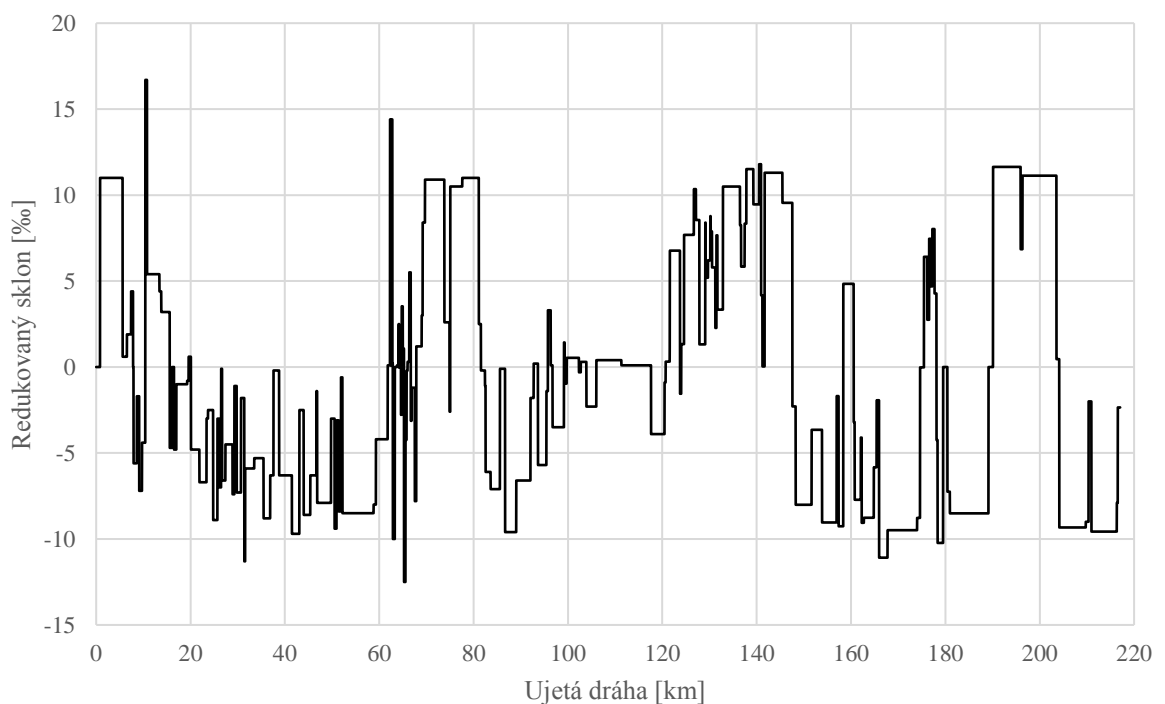
Ke správci železniční infrastruktury by mohla být požadována následující opatření (7):

- odstraňování krátkých lokálních omezení rychlosti, především na velmi frekventovaných tratích s vyšší traťovou rychlostí,
- uvážlivě vyhodnotit prioritu vlaků při křižování,
- při projektování novostaveb a modernizací tratí zohlednit i spotřebu energie při předpokládaném provozu v budoucnosti (např. budování tunelů),
- při sestavě GVD vytvořit dostatečné rezervy v jízdnych dobách,
- při sestavě GVD minimalizovat pravděpodobnost pozdního stavění vlakových cest (respektovat propustnost úseků, traťové a staniční intervaly),
- vytvořit mechanismy pro účinnou kontrolu těchto opatření v provozní praxi.

### 3 VÝBĚR TRAŤOVÉHO ÚSEKU PRO REALIZACI VÝPOČTŮ

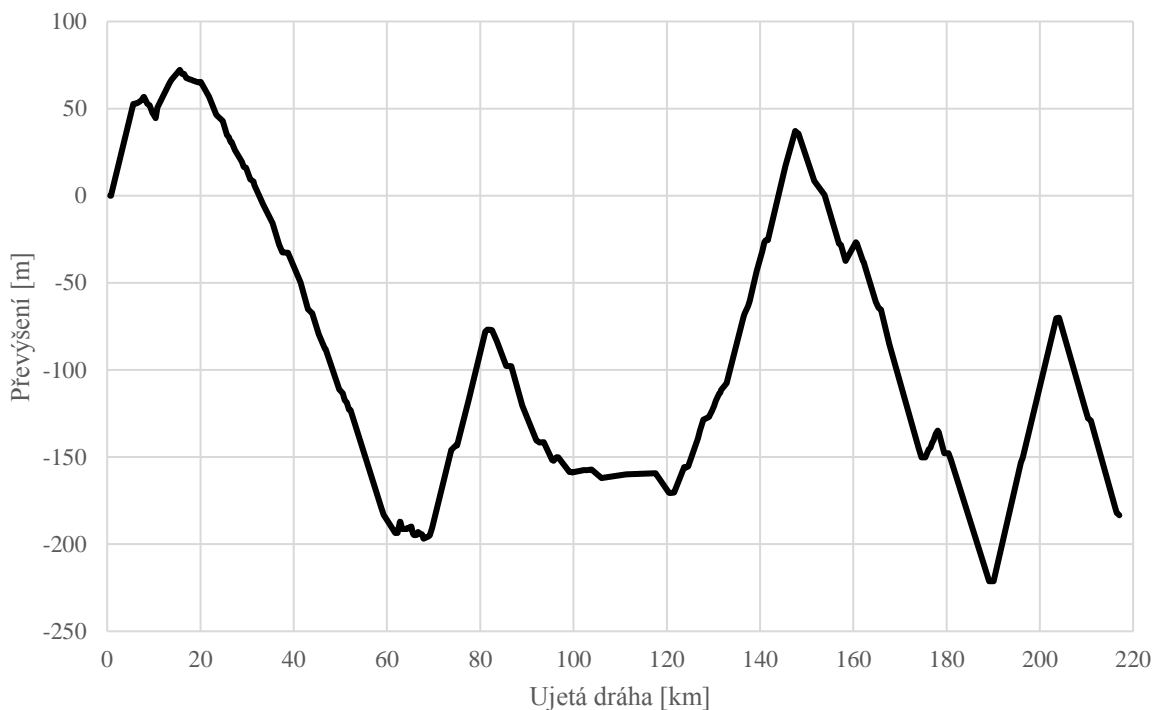
Volba traťového úseku byla ovlivněna dostupností dat vypovídajících o měřené spotřebě elektrické energie. Pro tyto účely byla využita trať Summerau – Praha-Uhřetěves, která je pojížděna kontejnerovými vlaky dopravce METRANS Rail, který pro potřeby řešení práce poskytl příslušná provozní data. Vyšetřovaný traťový úsek má délku zhruba 217 km. Při analýze dostupných dat z hnacího vozidla se vycházelo ze souřadnic místa odjezdu ve stanici Summerau, po zastavení ve stanici Praha-Uhřetěves. Přibližně 178 km trasy je pokryto střídavou napájecí soustavou (Summerau – Benešov u Prahy). Ze stanice Summerau až po českou státní hranici je trať napájena střídavým napětím 15 kV 16,7 Hz. Úsek z rakouské státní hranice až zhruba po Benešov u Prahy je napájen střídavým napětím 25 kV 50 Hz. Zbytek traťového úseku (Benešov u Prahy – Praha-Uhřetěves) je pokryto stejnosměrnou napájecí soustavou s napětím 3 kV.

Na obrázku 6 je vyobrazen průběh redukovaného sklonu, který byl následně využit pro vykreslení přibližného výškového profilu daného traťového úseku. Výškový profil tratě je možné vidět na obrázku 7.



Obrázek 6 - Průběh redukovaného sklonu tratě

Zdroj: autor



**Obrázek 7** - Přibližný výškový profil tratě

Zdroj: autor

Z obrázků 6 a 7 je patrné, že se jedná o sklonově náročnou trať. V km 15,5 daného traťového úseku se nachází nejvyšší vrchol tratě. Poté následuje cca 41,5 km dlouhé klesání s rozhodným spádem -11,3 ‰. Zhruba od km 120,5 začíná nejdélší úsek nacházející se ve stoupání, který je 27 km dlouhý. Cca od km 190,5 vyšetřovaného traťového úseku se nachází stoupání dlouhé přibližně 13,6 km, na kterém převažuje sklon větší než 11 ‰.

Traťový úsek mezi Summerau a Českými Budějovicemi je jednokolejný. Z Českých Budějovic do Prahy je trať již dvoukolejná (s výjimkou úseku Nemanice – Dobřejojvice, Chotýčany – Ševětín, a Sodoměřice – Olbramovice-Votice). Na vybraném traťovém úseku leží dle číslování Správy železnice tyto tratě (8):

- 220 (Praha – České Budějovice),
- 221 (Praha – Benešov u Prahy),
- 196 (České Budějovice – Summerau).

Vybraný traťový úsek je součástí IV. tranzitního železničního koridoru. Na obrázku 8 je vyobrazena trasa IV. tranzitního železničního koridoru. Dovolená traťová třída zatížení je D3 a D4, tedy 22,5 t na nápravu (9). Od roku 2005 na trati probíhají rozsáhlé rekonstrukce, např. snaha zvýšení traťové rychlosti na 160 km/h, modernizace zabezpečovacího zařízení

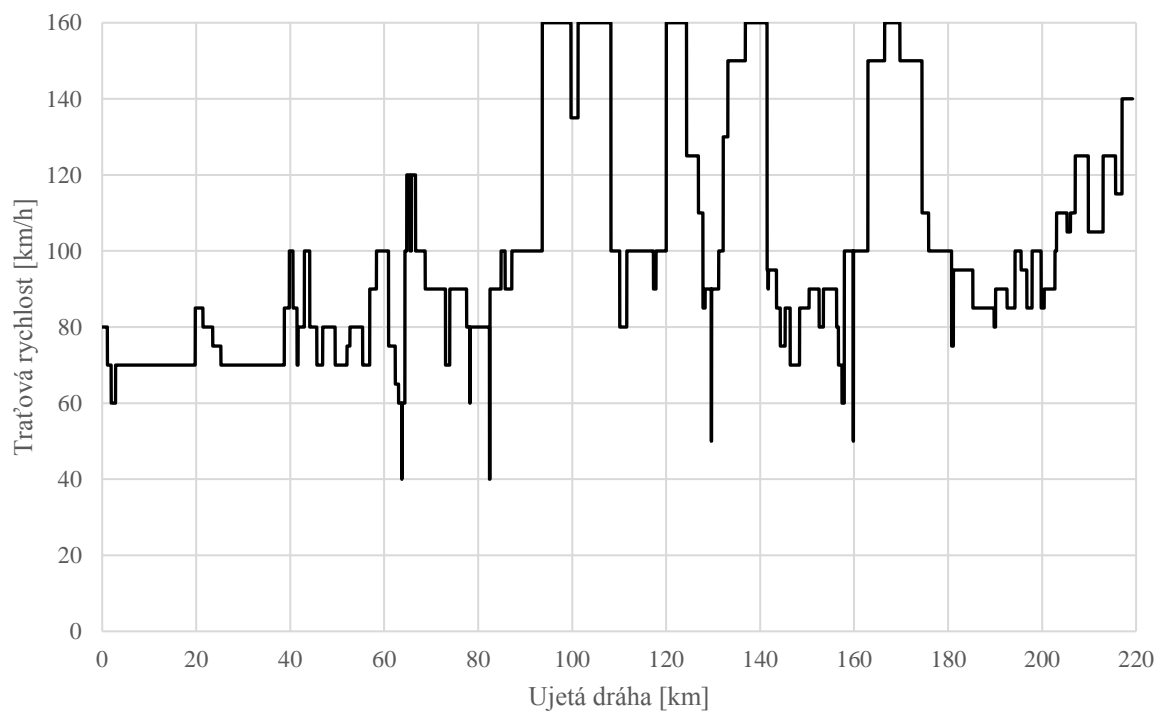
a podobně. Pro potřeby modelování jízdy vlaku byl ovšem zvolen nákladní vlak, jehož maximální stanovená rychlost je 100 km/h.



Obrázek 8 - Mapa IV. tranzitního železničního koridoru

Zdroj: (10)

Na obrázku 9 je vyobrazen rychlostní profil traťového úseku Summerau – Praha-Uhřetěves.



Obrázek 9 - Rychlostní profil vyšetřovaného traťového úseku

Zdroj: autor



Mezi stanicemi Tábor a Benešov u Prahy se v současné době nachází úsek dlouhý cca 42 km, kde není možné provádět rekuperaci. Tento úsek je znázorněn červeně na obrázku 10.



Obrázek 10 - Část schématické mapy s trasou Summerau – Praha-Uhřetěves

Zdroj: (11)

## 4 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO VYŠETŘOVÁNÍ JÍZDY VLAKU

Pro výpočty jízdních dob a spotřeby energie (resp. simulaci jízdy) vybraného vlaku ve vyšetřovaném traťovém úseku byl vytvořen výpočtový model, který je založen na numerickém řešení pohybové rovnice vlaku.

### 4.1 Pohybová rovnice vlaku

Vyšetřování jízdy vlaku je prováděno za mnoha zjednodušujících předpokladů, jejichž cílem je získat co nejjednodušší matematický popis problému, který ale zároveň poskytne dostatečně přesné výsledky. Při modelování jízdy vlaku se používají následující zjednodušující předpoklady (2, 3):

- pohyb vlaku je uvažován jako pohyb hmotného bodu s jedním stupněm volnosti podél jízdní dráhy, čímž se jeho matematický popis zjednodušuje na jedinou diferenciální rovnici druhého řádu – tzv. pohybovou rovnici vlaku,
- při pohybu vozidel na ně působí jen vnější síly ve směru jízdy (tažné a brzdné síly, jízdní odpory, tíhové síly),
- síly působící na vozidla jsou obvykle určeny ze statických charakteristik.

Pokud je vlak nahrazen jedním hmotným bodem, nelze řešením pohybové rovnice vlaku zjišťovat síly působící mezi jednotlivými tělesy tvořícími vlak, jako např. síly ve spřáhlech. Pohybová rovnice je tedy matematickým popisem pohybu hmotného bodu s jedním stupněm volnosti podél jízdní dráhy (2).

S využitím Newtonova způsobu sestavování pohybových rovnic je možné přímočarý pohyb hmotného bodu popsat rovnicí (2):

$$m \cdot \ddot{x} = \sum F_x \quad (11)$$

kde:

$m$  – hmotnost [kg];

$\ddot{x}$  – zrychlení ve směru osy  $x$  [ $m \cdot s^{-2}$ ];

$\sum F_x$  – součet všech sil působících ve směru osy  $x$  [N].

Pokud bychom rovnicí (11) rozepsali pro model vlaku a současně i zohlednili součinitel rotačních hmot, bude mít pohybová rovnice vlaku následující tvar (2, 3):

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B - O_v - O_t \quad (12)$$

kde:

$m_{vl}$  – celková hmotnost všech vozidel řazených ve vlaku [kg];

$\rho_{vl}$  – hodnota součinitele rotačních hmot vlaku [-];

$\ddot{x}$  – okamžitá hodnota zrychlení vlaku ve směru jízdy [ $m \cdot s^{-2}$ ];

$F_{ok}$  – celková tažná síla na obvodu kol [N];

$B$  – celková brzdná síla na obvodu kol [N];

$O_v$  – celkový vozidlový odpor všech vozidel řazených ve vlaku [N];

$O_t$  – celkový traťový odpor všech vozidel řazených ve vlaku [N].

## 4.2 Princip numerického řešení pohybové rovnice vlaku

Proměnlivost sil, působících během jízdy na vlak vede k tomu, že pohyb vlaku lze obecně popsat jako nerovnoměrně zrychlený. Východisko numerického řešení spočívá v tom, že z pohybové rovnice vlaku (12) lze stanovit zrychlení v každém místě na trati (2):

$$\ddot{x} = \frac{F_{ok} - B - O_v - O_t}{m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl})} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (13)$$

Princip, který se při numerickém řešení uplatňuje, je rozdělení dráhy na dílčí úseky dané délkou  $\Delta x$  při řešení dráhového tachogramu. V těchto jednotlivých dílčích úsecích se uvažuje konstantní hodnota zrychlení. Díky tomu je možné nerovnoměrně zrychlený pohyb převést na souslednost navzájem navazujících rovnoměrně zrychlených pohybů. Postup výpočtů při řešení pohybu vlaku v závislosti na ujeté dráze lze shrnout do následujících bodů (2):

- vyšetřovanou trať celkové délky lze rozdělit na  $n$  dílčích úseků délky  $\Delta x$ ,
- pro každý dílčí úsek lze stanovit s využitím vzorce (13) střední hodnotu zrychlení  $\ddot{x}_i$ ,
- ve vzorci (13) figuruje tažná síla na obvodu kol ( $F_{ok}$ ), jejíž maximální hodnotu při určité rychlosti lze po překročení tzv. kritické rychlosti stanovit pomocí vzorce:

$$F_{ok} = \frac{P}{v} \quad [kN] \quad (14)$$

kde:

$P$  – jmenovitý výkon hnacího vozidla [kW];

$v$  – rychlost vlaku [ $m \cdot s^{-1}$ ].

- pokud je rychlost vlaku menší než zmíněná kritická rychlost, tažná síla je rovna maximální tažné síle, kterou je hnací vozidlo schopno vyvinout,
- v případě jízdy konstantní rychlostí je tažná síla rovna pouze součtu traťového a vozidlového odporu:

$$F_{ok} = O_t + O_v \quad [\text{kN}] \quad (15)$$

kde:

$O_t$  – traťový odpor [kN],

$O_v$  – vozidlový odpor [kN].

- brzdění je uvažováno s konstantním brzdným zpomalením dle předpisu ČSD V7 - 0,2 m·s<sup>-2</sup>; přičemž brzdná síla je odvozena z pohybové rovnice vlaku vztahem:

$$B = -m_{red} \cdot \ddot{x} - O_v - O_t \quad [\text{kN}] \quad (16)$$

kde:

$m_{red}$  – redukováná hmotnost vlaku ( $m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl})$ );

- díky znalosti počáteční rychlosti  $v_i$  na začátku  $i$ -tého dílčího úseku, a díky znalosti konstantního zrychlení v dílčích úsecích lze vypočítat rychlost  $v_{i+1}$  na konci  $i$ -tého úseku, která je zároveň počáteční rychlostí v úseku následujícím:

$$v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2 \cdot \ddot{x}_i \cdot \Delta x} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (17)$$

- jízdní doba v  $i$ -tém dílčím úseku, za předpokladu konstantního (nenulového) zrychlení se vypočítá:

$$\Delta t_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{\ddot{x}_i} \quad [\text{s}] \quad (18)$$

- jízdní doba v  $i$ -tém dílčím úseku, za předpokladu nulového zrychlení se vypočítá:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta x}{v_i} \quad [\text{s}] \quad (19)$$

- výsledná jízdní doba v celém traťovém úseku je součtem dílčích jízdních dob:

$$t_c = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad [\text{s}] \quad (20)$$

Společně s výpočtem jízdní doby je možné provést i odhad spotřeby energie daného vlaku na daném traťovém úseku. Spotřeba trakční energie souvisí s mechanickou prací  $W$ , kterou koná tažná síla  $F_{ok}$  na obvodu kol hnacích vozidel na dané dráze  $x$ . Přírůstek spotřeby trakční práce v každém  $i$ -tém dílčím úseku (s využitím znalosti tažné síly na obvodu kol v každém  $i$ -tém dílčím úseku) se vypočítá (2):

$$\Delta W_{tr,i} = F_{ok,i} \cdot \Delta x \quad [\text{J}] \quad (21)$$

Celková spotřeba trakční elektrické energie ve vyšetřovaném úseku je vyjádřena:

$$E_{tr} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta W_{tr,i} \quad [\text{kWh}] \quad (22)$$

kde:

$\eta$  – účinnost hnacího vozidla (poměr výkonu a příkonu).

Pro numerické řešení pohybové rovnice vlaku vhodně poslouží tabulkový procesor MS Excel. Vzhledem k předpokladu konstantního zrychlení v dílčích krocích je potřeba vhodně zvolit délku tohoto dílčího kroku  $\Delta x$ . Ta ovlivňuje hlavně přesnost numerického řešení. Při řešení výpočtů v závislosti na ujeté dráze je výhodné u vlakových souprav složených ze stejných typů vozů zvolit délku úseku stejnou, jako je délka každého vozu. Tento postup navíc umožňuje zohlednit i délku vlaku při výpočtech tím, že lze počítat traťový odpor pro každé vozidlo zvlášť (vyznačují se vlastní hmotností a nachází se na konkrétním místě na trati s určitým sklonem) (2).

### 4.3 Návrh simulačního modelu pro numerické řešení pohybu vlaku

V tabulce 5 je možné vidět část simulačního modelu pro numerické řešení pohybové rovnice vlaku v MS Excel.

**Tabulka 5** - Část simulačního modelu pro numerické řešení pohybu vlaku v MS Excel.

Km	S [%o]	Tr.rych.	El.pr	Tr. R.k	Tr-O-celk	VozO [N]	V[km/h]	a [ms <sup>-1</sup> ]	Fok [kN]	FBok [kN]	Frek. [kN]	$\Delta t$ [s]	$\Sigma t$ [s]	W [kJ]	W_rek [kJ]
0,65	0	80	1	80	0	21998,93	0	0,14193	275	0	0	0	0	7150	0
0,676	0	80	1	80	0	22241,71	9,7799076	0,14179	275	0	0	19,16	19,16	7150	0
0,702	0	80	1	80	0	22484,26	13,827559	0,14165	275	0	0	7,937	27,1	7150	0
0,728	0	80	1	80	0	22726,58	16,93117	0,14152	275	0	0	6,092	33,19	7150	0
0,754	0	80	1	80	0	22968,66	19,545742	0,14138	275	0	0	5,137	38,33	7150	0
0,78	0	80	1	80	0	23210,51	21,847563	0,14125	275	0	0	4,527	42,85	7150	0
0,806	0	80	1	80	0	23452,13	23,927067	0,14111	275	0	0	4,094	46,95	7150	0
0,832	11	80	1	80	9064,44	23693,52	25,837991	0,13589	275	0	0	3,906	50,85	7150	0
0,858	11	80	1	80	17260,2	23925,98	27,553238	0,13116	275	0	0	3,633	54,48	7150	0
0,884	11	80	1	80	23909,62	24150,35	29,113121	0,12731	275	0	0	3,404	57,89	7150	0
0,91	11	80	1	80	29378,5	24368,13	30,551073	0,12412	275	0	0	3,218	61,11	7150	0
0,936	11	80	1	80	35388,01	24580,45	31,890633	0,12063	275	0	0	3,085	64,19	7150	0
0,962	11	80	1	80	47612,05	24786,79	33,140682	0,11365	275	0	0	3,055	67,25	7150	0
0,988	11	80	1	80	59849,04	24981,21	34,276782	0,10668	275	0	0	2,958	70,2	7150	0
1,014	11	80	1	80	64515,07	25163,7	35,309929	0,10396	275	0	0	2,761	72,97	7150	0

Zdroj: autor

#### Veličiny vstupující do výpočtů a jejich význam:

- Ve sloupci *Km* je trať rozdělena na zmiňované dílčí úseky o délce  $\Delta x$ . V tomto případě je integrační krok zvolen po 26 metrech, což přibližně odpovídá délce jednoho vozu v tomto konkrétním příkladě.
- Ve sloupci *S* je uvedena hodnota náhradního sklonu v každém dílčím úseku.

- Ve sloupci *Tr.rych.* je stanovena traťová rychlost pro každý dílčí úsek.
- Sloupec *El.pr.* udává, jestli je možné v daném úseku odebírat trakční elektrickou energii. V případě že ano, je zde hodnota 1, v případě že není možné odebírat proud, je zde hodnota 0. Odebírat proud není možné v úsecích, kde vlak jede se staženým sběračem, tudíž výběhem (změna napájecí soustavy, neutrální pole atd).
- Ve Sloupci *Tr.r.k.* je uvedena traťová rychlost po zohlednění délky vlaku (např. vlak může zrychlovat až v momentě, kdy poslední vůz mine rychlostník). Také je zde maximální rychlost omezena hodnotou 100 km/h, což je maximální dovolená rychlost nákladního vlaku.
- Sloupec *Tr-O-celk* udává celkový traťový odpor vztažený na hnací vozidlo. Je součtem traťových odporů jednotlivých vozidel, které jsou pro přehlednost v tabulce skryty. Pro výpočet traťového odporu jednotlivých vozidel je využito vztahu (8), přičemž je uvažována příslušná hodnota náhradního sklonu v každém dílčím úseku  $\Delta x$ .
- Ve sloupci *VozO* je uveden vozidlový odpor soupravy, který je stanoven dle vztahu (5). Kategorie měrného vozidlového odporu byla zvolena T4, tedy ložené čtyřnápravové nákladní vozy.
- Sloupec *V* udává rychlost vlaku na začátku každého dílčího úseku  $\Delta x$ . V případě zrychlování nebo zpomalování vlaku je využit vzorec (17).
- Sloupec *a* udává zrychlení v daném úseku  $\Delta x$ , vypočtené s využitím vzorce (13), nebo s konstantním brzdícím zpomalením  $-0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .
- Ve sloupci *Fok* je uvedena uvažovaná tažná síla na obvodu kol v každém dílčím úseku  $\Delta x$ , buďto s využitím vzorce (14) nebo (15).
- Sloupec *FBoK* udává brzdnou sílu dle vzorce (16) v každém úseku  $\Delta x$ , zpomaluje-li zrovna vlak.
- V případě, že vlak brzdí, anebo je nucen udržovat konstantní rychlost na spádu, je ve sloupci *Frek* uvedena síla elektrodynamické brzdy, kterou je možno použít k rekuperaci.
- Ve sloupci  $\Delta t$  je uveden čas dle vzorce (18) nebo (19), za který vlak daný dílčí úsek  $\Delta x$  projede.
- Dále ve sloupci  $\sum t$  je součet jednotlivých dílčích časů, a tedy celkový čas od začátku výpočtu.
- Ve sloupci *W* je uveden přírůstek práce s využitím vzorce (21) v každém dílčím úseku  $\Delta x$ . Tyto hodnoty v konečném součtu poslouží ke stanovení spotřeby trakční elektrické energie.

- Sloupec  $W_{rek}$  udává přírůstek práce taktéž s využitím vzorce (21), kterou vykoná elektrodynamická brzda, v případě že je použita. Tyto hodnoty v konečném součtu poslouží ke stanovení teoreticky ušetřené (rekuperované) energie.

### **Základní postup výpočtů**

Výpočet je založen na základě znalosti traťového a vozidlového odporu v každém dílčím úseku. Z nich je pak dle vzorce (15) odvozená potřebná tažná síla k překonání těchto odporů v případě jízdy konstantní rychlostí. V případě zrychleného pohybu po překročení tzv. kritické rychlosti je tažná síla stanovena pomocí vzorce (14). Na základě znalosti sil působících na vlak je dále stanoveno zrychlení dle vzorce (13). Ze zrychlení a z rychlosti v předchozím dílčím úseku je stanovena rychlost dle vztahu (17). Z rychlosti a zrychlení je pak možné určit přírůstek času podle vzorce (18) nebo (19). Z tažné síly se potom určí přírůstek trakční práce s využitím vztahu (21). V případě brzdění je brzdná síla počítána dle vzorce (16), ze které je pak s využitím vzorce (21) stanovena práce elektrodynamické brzdy. Součet přírůstků času je potom celková jízdní doba dle vzorce (20). Součet přírůstků trakční práce dle vzorce (22) poslouží ke stanovení odhadované spotřeby elektrické energie.

## **5 ROZBOR PROVOZNÍCH ZÁZNAMŮ**

Popis vyšetřovaného traťového úseku včetně jeho parametrů je uveden samostatně v kapitole 3. Na základě dohody s vedoucím práce byl pro výpočet použit vlak Nex 41500 dopravce METRANS Rail, který jel v trase Salzburg – Praha-Uhřetěves dne 1. až 2. února 2019, a ke kterému byla dopravcem pro potřeby řešení této práce poskytnuta příslušná provozní data. Veškeré provedené výpočty byly porovnány se skutečně zaznamenanými daty z lokomotivy. K dispozici byly tři zaznamenávací zařízení a to TELOC, GPS a EMS. Pro srovnání výpočtů byl použit také sešitový jízdní řád (dále jen SJŘ) k vlaku Nex 41500. Navíc byla některá vstupní data k výpočtu převzata z výkazu vozů.

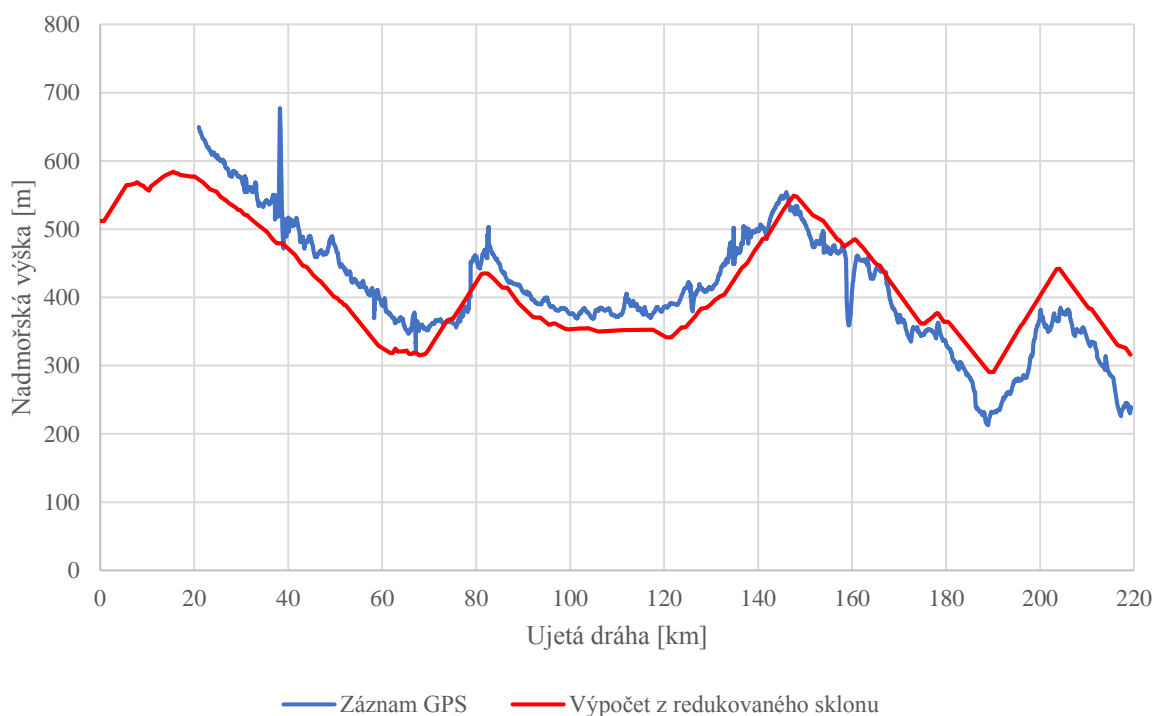
### **5.1 TELOC**

Jedná se o provozní diagnostiku lokomotivy. Tato data se stahují v rámci údržby vozidla. Záznam obsahuje historii provozních stavů vozidla a významných veličin, z čehož byl pro potřeby řešení této práce využit časový záznam rychlosti, tažné síly a tlaku v hlavním brzdovém potrubí. TELOC posloužil především pro stanovení reálné jízdní doby a reálného průběhu rychlosti.

### **5.2 GPS**

Jde o externí zařízení určené primárně pro sledování polohy vozidla, ale obsahuje i poměrně přesný záznam rychlosti. GPS sloužila především pro stanovení reálného místa odjezdu a zastavení, resp. pro lokalizaci vlaku na trati. Záznam obsahuje čas, rychlost lokomotivy, souřadnice (polohu lokomotivy), nadmořskou výšku a ujetou vzdálenost. Zaznamenaná nadmořská výška je ovšem také relativně přibližná. Na obrázku 11 je možné vidět porovnání nadmořské výšky tratě zaznamenané pomocí GPS a vypočtené nadmořské výšky pomocí redukovaného sklonu. Je patrné, že obě křivky znázorňující průběh nadmořské výšky jsou si v zásadě podobné. Záznam nadmořské výšky pomocí GPS začíná až zhruba po km 20, jelikož zařízení GPS mělo mezi stanicemi Summerau a Horní Dvořiště technický výpadek.





**Obrázek 11** - Porovnání vypočítané a zaznamenané nadmořské výšky pomocí GPS

Zdroj: autor

### 5.3 EMS

Tento záznam zachycuje v pětiminutových intervalech spotřebovanou a rekuperovanou elektrickou energii, aktuální rychlost a souřadnice. Obsahuje také kód státu, ve kterém se lokomotiva zrovna nachází.

**Tabulka 6** - část záznamu EMS

Datum	386-015 GPS_LAT	386-015 GPS_LON	386-015 km/h	386-015 kWh+	386-015 kWh-	386-015 kv	386-015 kv	386-015 COUNTRY
Feb 1, 2019 9:30:00 AM	4 833,42	1 426,68	0,03	4,8	0	0	2,7	81
Feb 1, 2019 9:35:00 AM	4 833,42	1 426,68	0,02	4,8	0	0	2,5	81
Feb 1, 2019 9:40:00 AM	4 833,42	1 426,68	0,02	4,6	0	0	2,6	81
Feb 1, 2019 9:45:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	4,7	0	0	2,6	81
Feb 1, 2019 9:50:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	4,7	0	0	2,4	81
Feb 1, 2019 9:55:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	5,2	0	0	2,7	81
Feb 1, 2019 10:00:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	5,1	0	0	2,5	81
Feb 1, 2019 10:05:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	4,9	0	0	2,7	81
Feb 1, 2019 10:10:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	5	0	0	2,7	81
Feb 1, 2019 10:15:00 AM	4 833,41	1 426,68	0,02	6,2	0	0	2,7	81
Feb 1, 2019 10:20:00 AM	4 833,41	1 426,67	0,02	6,1	0	0	2,4	81
Feb 1, 2019 10:25:00 AM	4 833,39	1 426,58	13,71	8,6	0	0	2,4	81
Feb 1, 2019 10:30:00 AM	4 831,49	1 427,23	69,29	9,3	4,2	0	2,6	81
Feb 1, 2019 10:35:00 AM	4 829,71	1 428,79	30,27	0,6	119	0	9,6	81
Feb 1, 2019 10:40:00 AM	4 829,26	1 429,40	50,2	26,6	6,8	0,6	2,2	81
Feb 1, 2019 10:45:00 AM	4 827,19	1 431,80	81,96	2,6	89,1	0	7,9	81
Feb 1, 2019 10:50:00 AM	4 824,18	1 432,61	70,18	9,3	36,3	0	4,4	81

Zdroj: (12)

## 5.4 Zjištěná vstupní data pro výpočet

Zvolený vlak Nex 41500 byl ve sledovaném konkrétním případě tažen vícesystémovou lokomotivou řady 386 (typ Bombardier TRAXX MS2e) a dle výkazu vozů, který je ve zjednodušené formě možné vidět v tabulce 7, byl sestaven z 22 ložených kontejnerových vozů, z čehož bylo 14 vozů řady Sggnss a 8 vozů řady Sggrss. Záznam z EMS umožnil stanovit reálnou spotřebu a rekuperaci elektrické energie. Při analýze dat bylo zjištěno, že čas v TELOCu je posunut o 54 minut dozadu. Záznam času z GPS i EMS se shodoval, a bylo tedy zjištěno, že vlak odjížděl ze Summerau v 21:28 a do stanice Praha-Uhřetěves dorazil v 2:01. Po odečtení pobytů v jednotlivých dopravních, které bylo relativně snadné vyčíst ze záznamu v TELOCU bylo zjištěno, že skutečná jízdní doba vlaku Nex 41500 činila 220 minut. Dle SJŘ by teoretická jízdní doba činila 219 minut a vlak by během cesty pětkrát zastavil. Z dat EMS bylo vyčteno, že reálná spotřeba trakční elektrické energie vlaku Nex 41500 v daném traťovém úseku byla 4578 kWh. Reálná rekuperovaná elektrická energie činila 871 kWh. Z dat EMS dále bylo analyzováno, že průměrný ztrátový výkon lokomotivy je 103,2 kW. Namísto fixní hodnoty účinnosti přeměny elektrické energie na energii mechanickou byl uvažován tento zjištěný ztrátový výkon. Tato hodnota byla zjištěna z EMS jako záznam spotřeby elektrické energie v případech, kdy vlak stál. Ztrátový výkon představuje např. spotřeba pomocných pohonů (napájení a chlazení trakčních měničů, pohon kompresoru, napájení palubní elektrické sítě, klimatizace/topení stanoviště strojvedoucího, případně se v nějaké době po zastavení může projevit i dochlazování trakčních motorů či brzdového odporáku – tedy pohon ventilátorů). Při analýze dat o rychlosti a brzdění vlaku Nex 41500 v TELOCu bylo zjištěno, že průměrná hodnota zpomalení při brzdění činí  $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Předpis ČSD V7 stanovuje pro brzdění v režimu G střední hodnotu brzdového zpomalení  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Výpočty byly tedy prováděny s hodnotou zpomalení  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

S dostupných provozních záznamů byla vytipována tato důležitá uvažovaná vstupní data o vyšetřované soupravě:

- délka vlaku včetně lokomotivy: 594 m;
- hmotnost soupravy bez lokomotivy: 1641 t;
- hmotnost lokomotivy: 84 t;
- součinitel rotačních hmot soupravy: 0,03;
- součinitel rotačních hmot lokomotivy: 0,1;
- maximální výkon lokomotivy na střídavé napájecí soustavě: 5,6 MW;

- maximální výkon lokomotivy na stejnosměrné napájecí soustavě: 4 MW;
- maximální tažná síla lokomotivy: 275 kN;
- maximální brzdná síla elektrodynamické brzdy: 150 kN;
- doba, po kterou hnací vozidlo není schopno vyvíjet tažnou sílu v případě změny napájecí soustavy: 30 s;
- vozidlový odpor soupravy: kategorie T4.

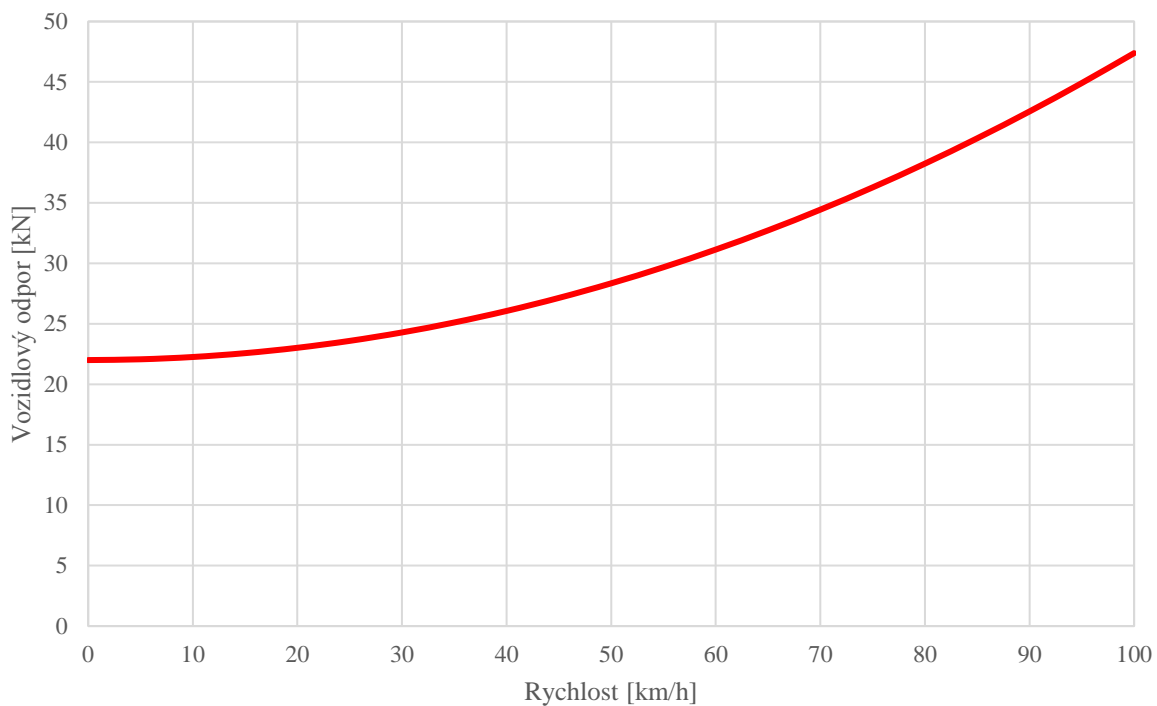
V tabulce 7 jsou shrnuty některé parametry vozů převzaté z výkazu vozů.

**Tabulka 7** - Vybrané parametry jednotlivých vozů

Číslo vozu	Počet náprav	Délka vozu [m]	Režim brzdění	Hmotnost vozu [t]
1	4	26	G	75,95
2	4	26	G	61,62
3	4	26	G	50,68
4	4	26	G	55,69
5	6	26,4	G	113,28
6	6	26,4	P	113,4
7	6	26,4	P	43,24
8	6	26,4	P	74,01
9	6	26,4	P	101,68
10	4	26	P	41,9
11	4	26	P	82,94
12	6	26,4	P	92,53
13	6	26,4	P	97,95
14	4	26	P	60,36
15	4	26	P	62,51
16	4	26	P	77,69
17	4	26	P	60,38
18	4	26	P	60,83
19	6	26,4	P	87,25
20	4	26	P	65,43
21	4	26	P	82,12
22	4	26	P	79,47

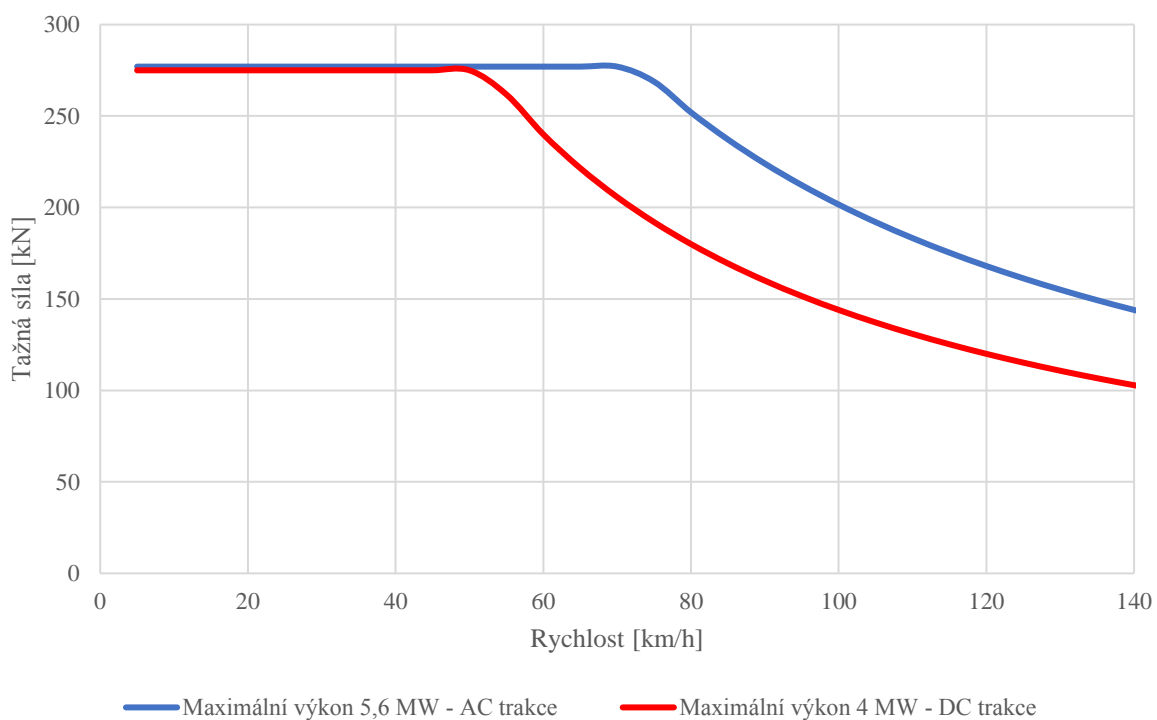
Zdroj: (12), upravil autor

Délka lokomotivy je 18,9 m. Z výkazu vozů je možné vidět, že délka vozů je buď 26 nebo 26,4 m. Integrační krok ve výpočtovém modelu byl zvolen na 26 m, což je pro potřeby modelování jízdy vlaku postačující. Na obrázku 12 je možné vidět závislost vozidlového odporu kategorie T4 na rychlosti vlaku. Dále na obrázku 13 je znázorněna zjednodušená trakční charakteristika lokomotivy řady 386, která byla využita při modelování jízdy vlaku.



**Obrázek 12** - Závislost vozidlového odporu vlaku kategorie T4 na rychlosti

Zdroj: autor



**Obrázek 13** - Uvažovaná trakční charakteristika lokomotivy řady 386

Zdroj: autor

## 6 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH VÝPOČTŮ A JEJICH ZHODNOCENÍ

Výpočet byl proveden v několika variantách, přičemž se jednotlivé varianty více či méně blížily reálně zaznamenaným výsledkům.

### 6.1 Výpočetní varianta 1.

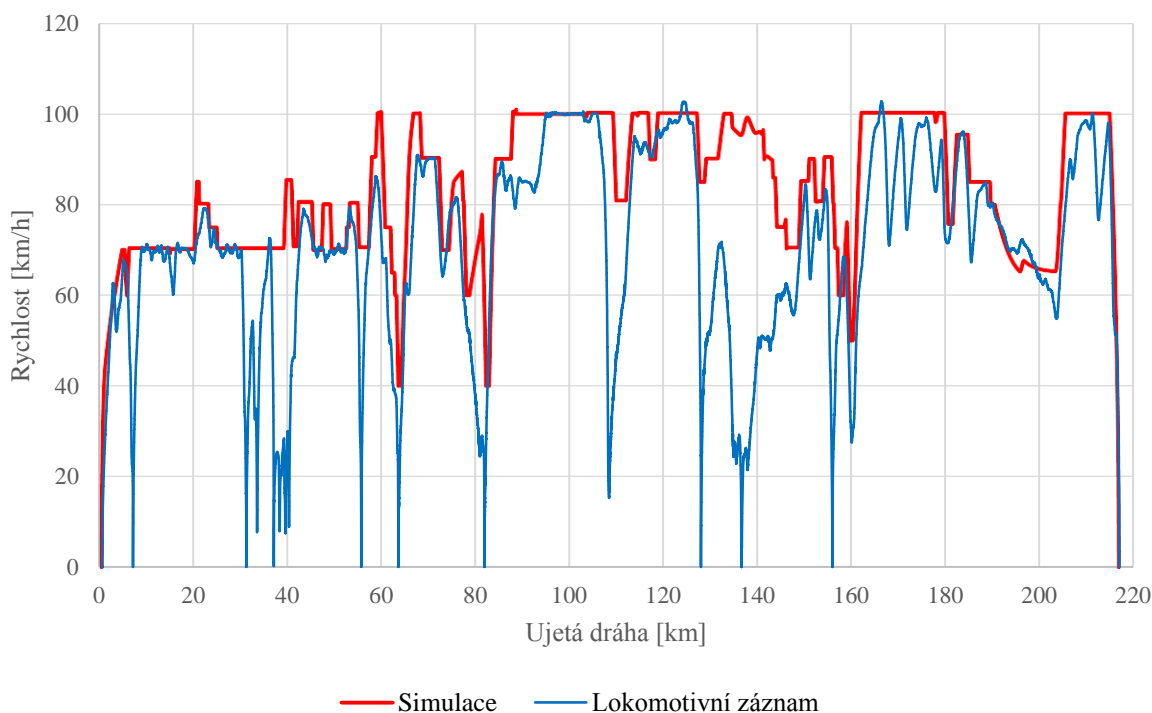
Tato varianta modelování jízdy vlaku je v podstatě teoretická. Je uvažováno, že vlak během své cesty nezastaví a zohledňuje jen traťovou rychlost nebo maximální stanovenou rychlost pro nákladní vlaky, tedy 100 km/h. Z obrázku 14 je patrné, že vlak jel reálně výrazně pomaleji, než bylo namodelováno.

Nasimulovaná jízdní doba: 164,5 min. (Reálná 220 min.)

Nasimulovaná spotřeba trakční elektrické energie: 5082 kWh. (Reálná 4578 kWh.)

Nasimulovaná rekuperovaná elektrická energie: 1670 kWh. (Reálná 871 kWh.)

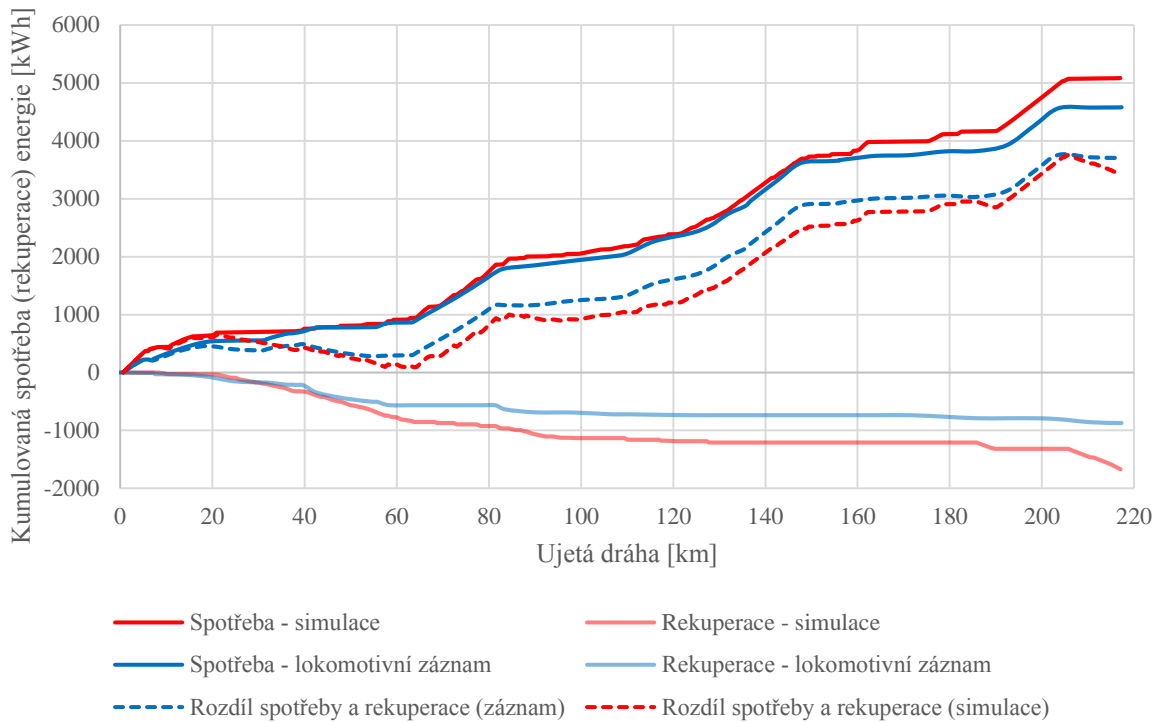
Rekuperovanou energií se rozumí práce, kterou vykoná brzdná síla elektrodynamické brzdy, tedy 150 kN. S tímto je uvažováno ve všech výpočetních variantách.



Obrázek 14 - Dráhový tachogram (Varianta 1.)

Zdroj: autor

Na obrázku 15 je možné vidět růst spotřebované a rekuperované elektrické energie. Porovnána jsou reálná a nasimulovaná data. Přestože se jízdní doba liší téměř o hodinu, simulovaný a reálný růst spotřeby trakční elektrické energie jsou si velice podobné. Zhruba mezi km 140 a 180 je možné pozorovat úsek se zakázanou rekuperací. Nejsou zde tedy žádné přírůstky rekuperované energie. Toto je možné vysledovat ve všech výpočtových variantách.



**Obrázek 15** - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 1.)

Zdroj: autor

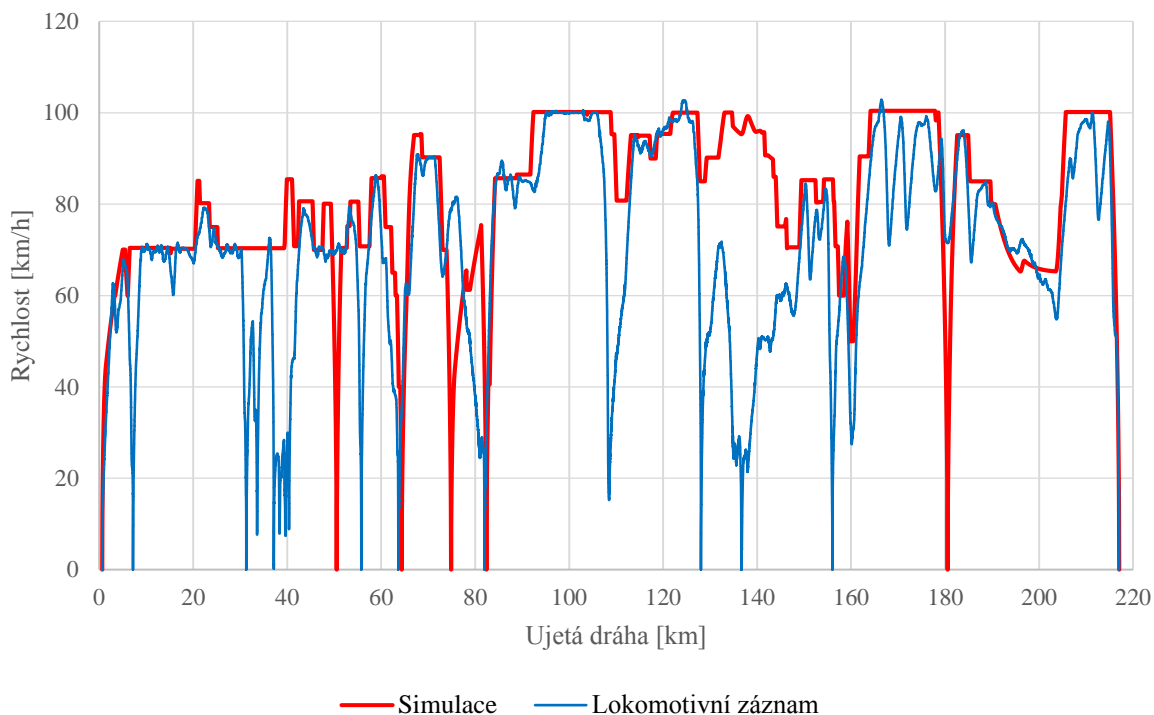
## 6.2 Výpočetní varianta 2.

Tato varianta byla namodelována podle SJŘ k vlaku Nex 41500. Zohledňuje tedy pět naplánovaných zastavení. Z tohoto plyne, že i jízdní doba se zvýšila cca o 13 minut. Reálný a namodelovaný průběh rychlosti je vidět na obrázku 16. Vypočtená jízdní doba se dosti liší od předpokladu uvedeném v SJŘ, za čímž může být konzervativnější uvažování trakčních parametrů lokomotivy při výpočtu pro SJŘ (např. nižší dosažitelná tažná síla), narozdíl od uvažovaných trakčních parametrů při modelování jízdy vlaku.

Nasimulovaná jízdní doba: 177 min. (Reálná 220 min, naplánovaná v SJŘ 219 min.)

Nasimulovaná spotřeba trakční elektrické energie: 5230 kWh. (Reálná 4578 kWh.)

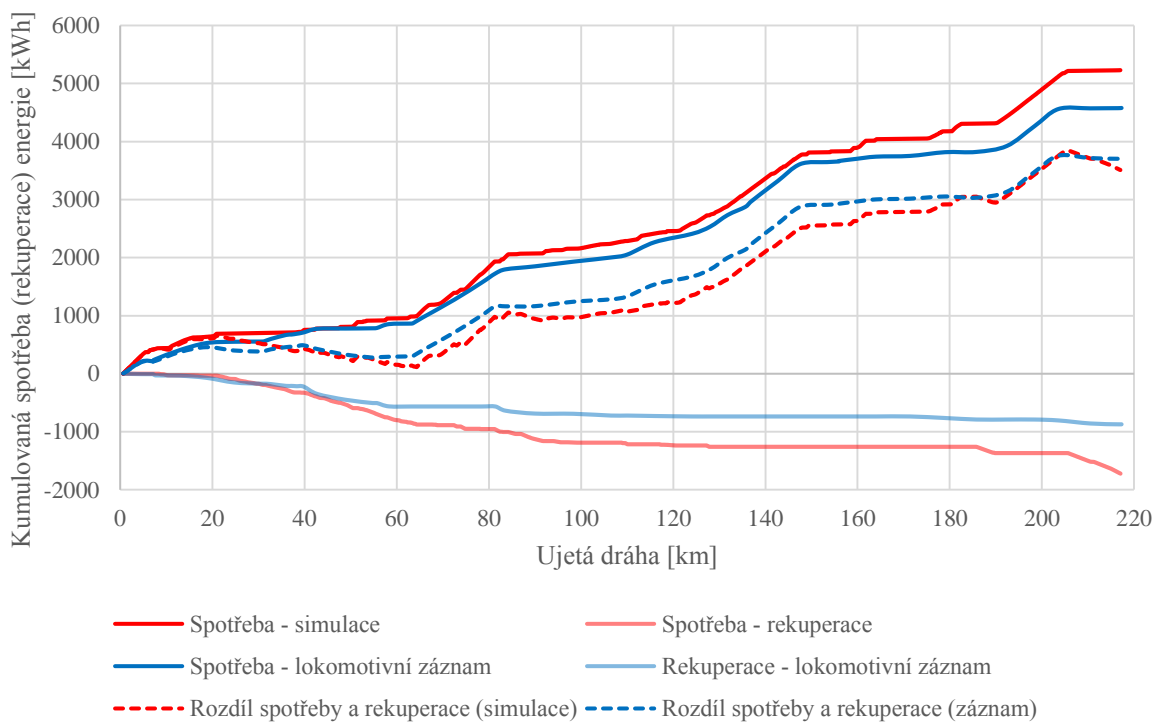
Nasimulovaná rekuperovaná elektrická energie: 1721 kWh. (Reálná 871 kWh.)



Obrázek 16 - Dráhový tachogram (Varianta 2.)

Zdroj: autor

Na obrázku 17 je možné vidět reálný a namodelovaný růst spotřeby a rekuperace energie.



Obrázek 17 - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 2.)

Zdroj: autor

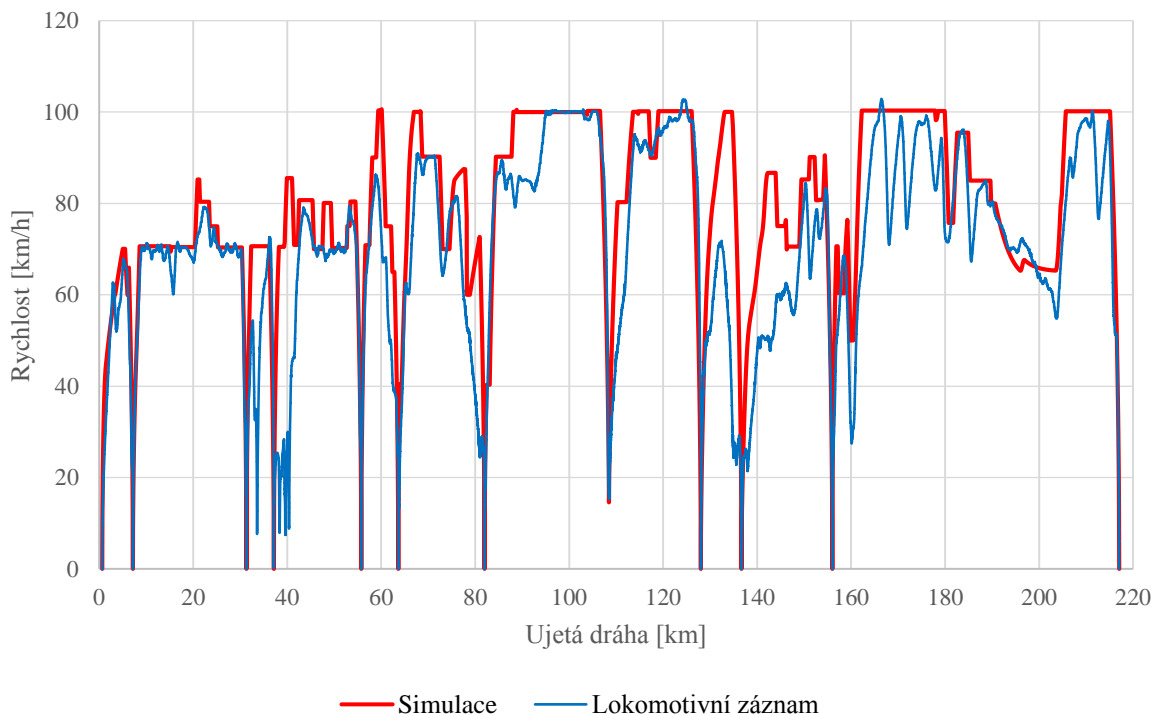
### 6.3 Výpočetní varianta 3.

Tato varianta zohledňuje největší odchylky od původní varianty 1., tedy především místa zastavení. Příliš nezohledňuje reálně dosahované rychlosti (jedná se např. cca o km 33, 40, 90, 130, 150). Na obrázku 18 je vyobrazen dráhový tachogram, ze kterého je patrné, že nasimulovaný dráhový tachogram se mnohem více blíží reálnému dráhovému tachogramu. S tím souvisí opět delší jízdní doba oproti teoretické variantě 1. V důsledku častých zastavení vzrostla spotřeba trakční elektrické energie oproti teoretické výpočetní variantě 1. téměř o 600 kWh.

Nasimulovaná jízdní doba: 187,7 min. (Reálná 220 min.)

Nasimulovaná spotřeba trakční elektrické energie: 5685 kWh. (Reálná 4578 kWh.)

Nasimulovaná rekuperovaná elektrická energie: 1769 kWh. (Reálná 871 kWh.)

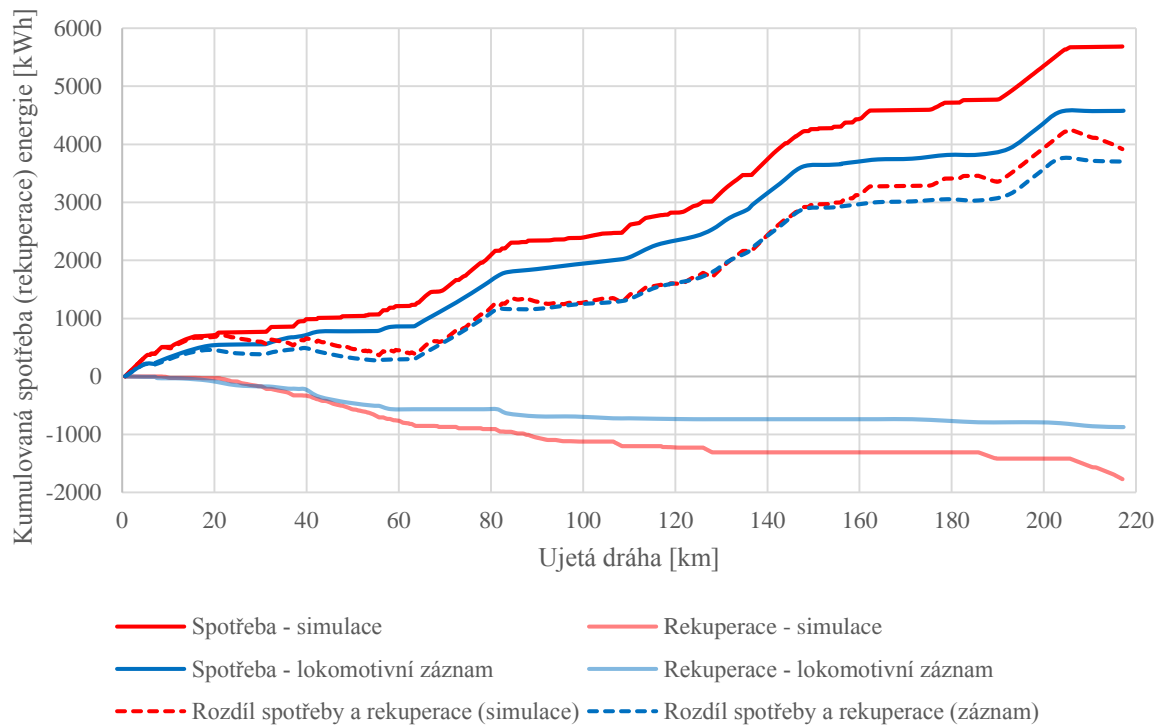


Obrázek 18 - Drahový tachogram (Varianta 3.)

Zdroj: autor



Na obrázku 19 je možné vidět porovnání růstu nasimulované a reálné spotřeby a rekuperace elektrické energie.



**Obrázek 19** - Růst spotřeby a rekuperace energie v závislosti na ujeté dráze (Varianta 3.)

Zdroj: autor

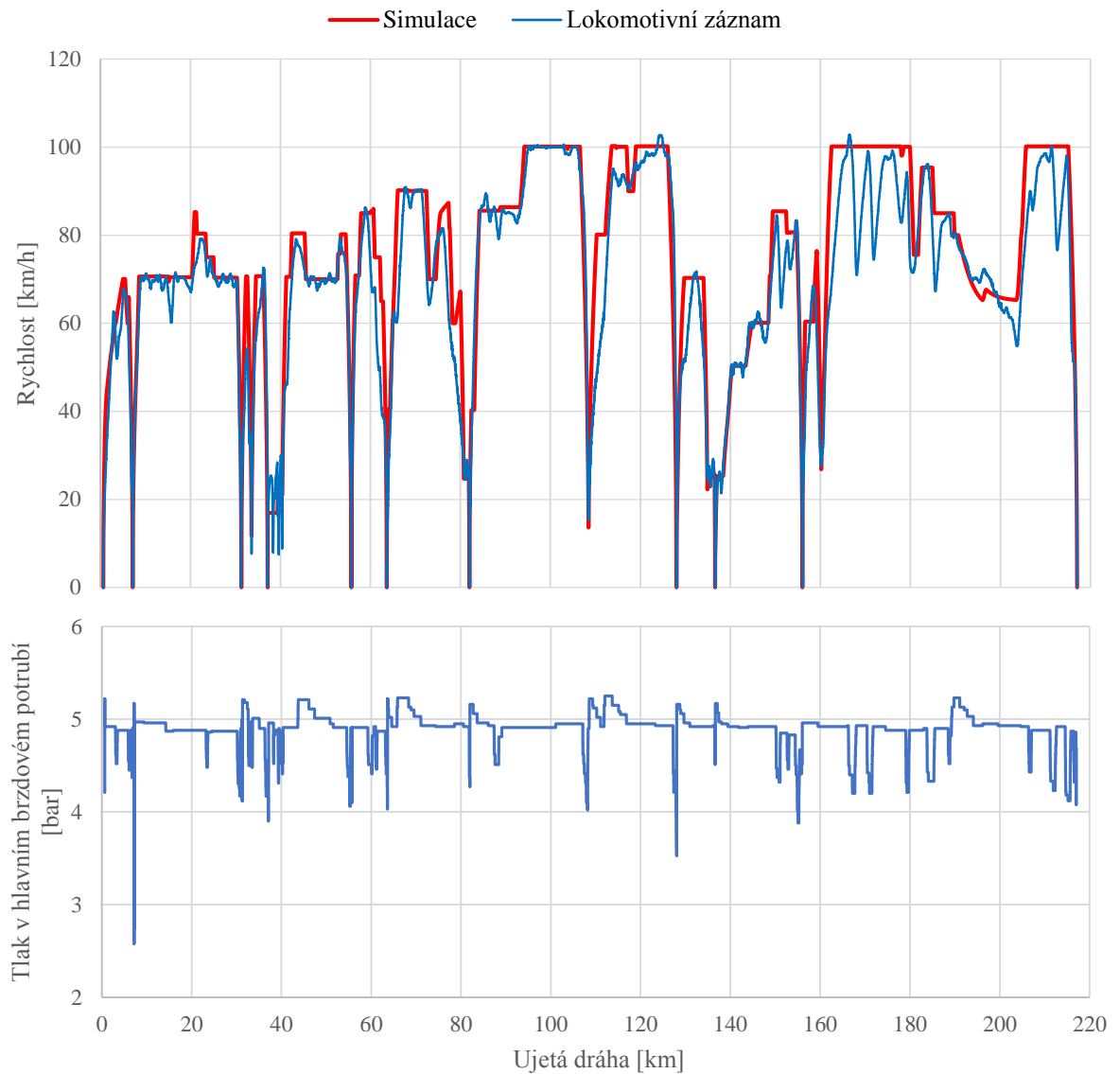
## 6.4 Výpočetní varianta 4.

Tato varianta zohledňuje co nejpřesněji reálný průběh rychlosti daného vlaku Nex 41500. Dráhový tachogram této výpočetní varianty je možné vidět na obrázku 20. Z obrázku je patrné, že nasimulovaný a reálný průběh rychlosti se velmi podobají. Také jízdní doba je velice podobná reálné jízdní době. Spotřeba trakční elektrické energie vzrostla oproti teoretické variantě 1. téměř o 400 kWh.

Nasimulovaná jízdní doba: 207,8 min. (Reálná 220 min.)

Nasimulovaná spotřeba trakční elektrické energie: 5488 kWh. (Reálná 4578 kWh.)

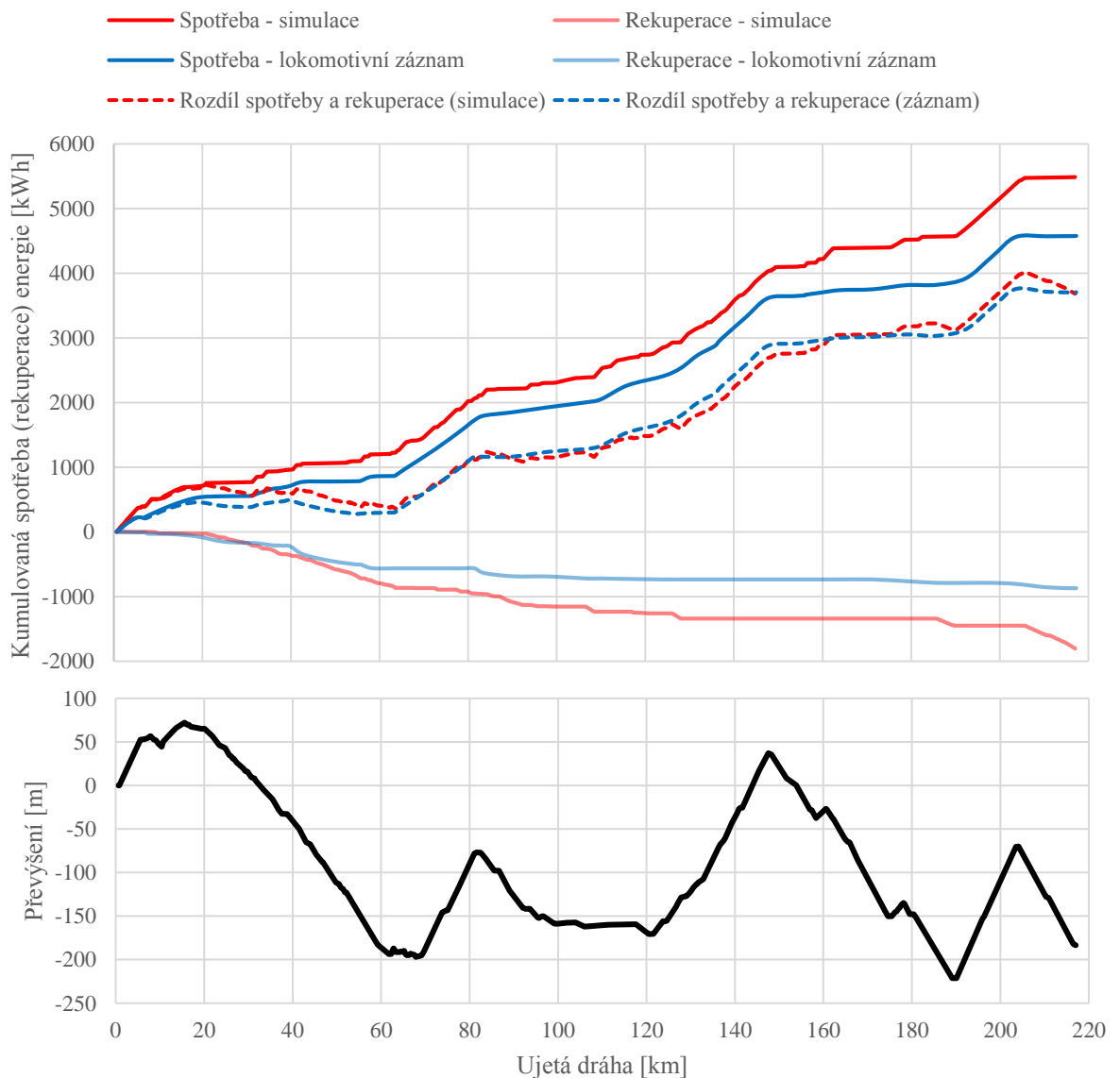
Nasimulovaná rekuperovaná elektrická energie: 1804 kWh. (Reálná 871 kWh.)



**Obrázek 20** - Dráhový tachogram (Varianta 4.) a průběh tlaku v hlavním brzdovém potrubí

Zdroj: autor

Na obrázku 20 je pro úplnost znázorněn i průběh tlaku v hlavním brzdovém potrubí. Zejména v případě nákladních vlaků je relativně obtížné na větším spádu udržovat rychlost jízdy vlaku s využitím pneumatické brzdy. Na obrázku 20 je to možné vidět v km 170. Z obrázku 21 je možné vypořádat porovnání reálného a nasimulovaného růstu spotřeby a rekuperace elektrické energie. Pro názornost je zde vykreslen i výškový profil vyšetřovaného traťového úseku. Z tohoto je možné vidět, že k největším nárůstům spotřeby trakční elektrické energie dochází v místech, kde je velké stoupání. Naopak v místech, kde se trať nachází v klesání, dochází k největším nárůstům rekuperované energie.



**Obrázek 21** - Porovnání nasimulovaného a reálného růstu spotřeby (rekuperace) energie s výškovým profilem tratě

Zdroj: autor

## 6.5 Spotřeba stanovená pomocí paušálních sazeb

S využitím paušálních sazeb uvedených v tabulkách 1 a 2 bylo vypočteno, že pokud by vlak nebyl vybaven měřicím zařízením EMS, tak jeho předpokládaná spotřeba trakční elektrické energie by byla stanovena na 5427 kWh. Jsou zohledněny různé hodnoty měrné spotřeby na AC a DC soustavě, přičemž AC soustavou je pokryto 178 km tratě a na DC soustavou 39 km. Hmotnost soupravy včetně lokomotivy je 1725 t. Výsledek nebyl násoben koeficienty technických ztrát ani koeficienty technologické spotřeby, jelikož těmito koeficienty je násobena i spotřeba naměřená pomocí EMS. Tím pádem to rozdíl výsledků neovlivní.

## 6.6 Zhodnocení výsledků

V tabulce 8 jsou shrnuty výsledky všech výpočetních variant a lokomotivního záznamu, popřípadě SJŘ.

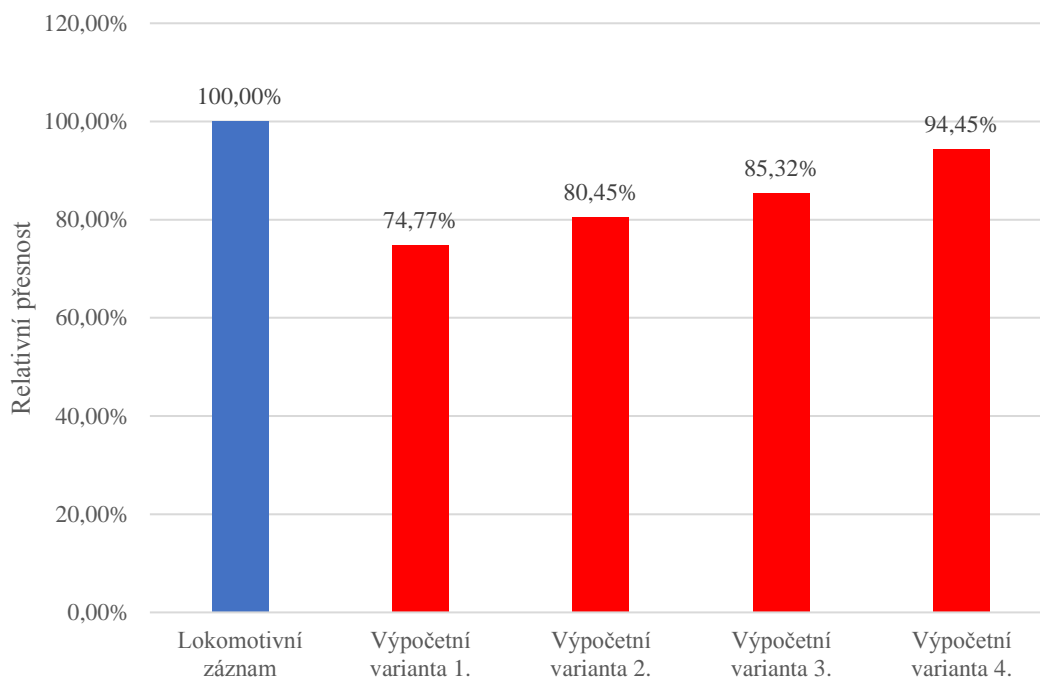
Tabulka 8 - Shrnutí výsledků

Přehled výsledků				
	Jízdní doba [min]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Rekuperace elektrické energie	Rozdíl spotřebované a rekuperované energie [kWh]
Výpočetní varianta 1.	164,5	5082	1670	3412
Výpočetní varianta 2.	177	5230	1721	3509
Výpočetní varianta 3.	187,7	5685	1769	3916
Výpočetní varianta 4.	207,8	5488	1804	3684
<b>Lokomotivní záznam</b>	<b>220</b>	<b>4578</b>	<b>871</b>	<b>3707</b>
Sešitový jízdní řád	219	-	-	-
Paušální spotřeba energie	-	5427	-	-

Zdroj: autor

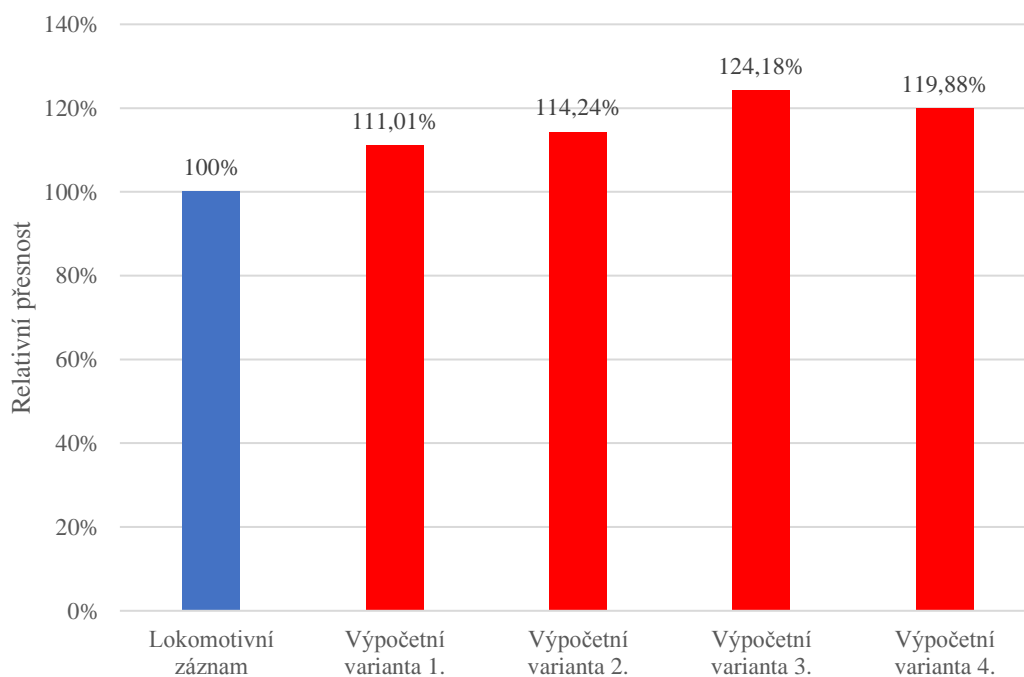
Z výsledků i z dráhového tachogramu na obrázku 20 je zřejmé, že výpočetní varianta 4. udává nejpřesnější jízdní dobu i průběh rychlosti. Jízdní doba byla nasimulována s relativní odchylkou 5,5 %. Spotřeba energie výpočetní varianty 4. je znatelně vyšší než reálná spotřeba. Relativní odchylka spotřeby energie činí 19,8 %. Důvodem je především to, že u modelování jízdy vlaku se uvažuje maximální výkon lokomotivy, který v realitě nemusí být vždy využíván. Dále v simulačním výpočtu nejsou uvažovány jízdy výběhem, které v reálném provozu snižují spotřebu trakční elektrické energie. Z výsledků je dále patrné, že spotřeba trakční elektrické energie stanovená pomocí paušálních sazeb je o 18,5 % vyšší než u reálně naměřené spotřeby pomocí EMS. To je důvodem, proč nákladní železniční dopravci upřednostňují platbu za reálně odebranou trakční elektrickou energii. Spotřeba nasimulovaná pomocí nejpřesnější výpočetní varianty 4. a spotřeba stanovená pomocí paušálu se téměř shodují. Relativní odchylka činí 1,1 %, avšak paušální platby neumožňují zohlednit odečet rekuperované elektrické energie.

V níže uvedených grafech na obrázcích 22, 23, 24 a 25 jsou znázorněny relativní přesnosti výsledků všech výpočtových variant.



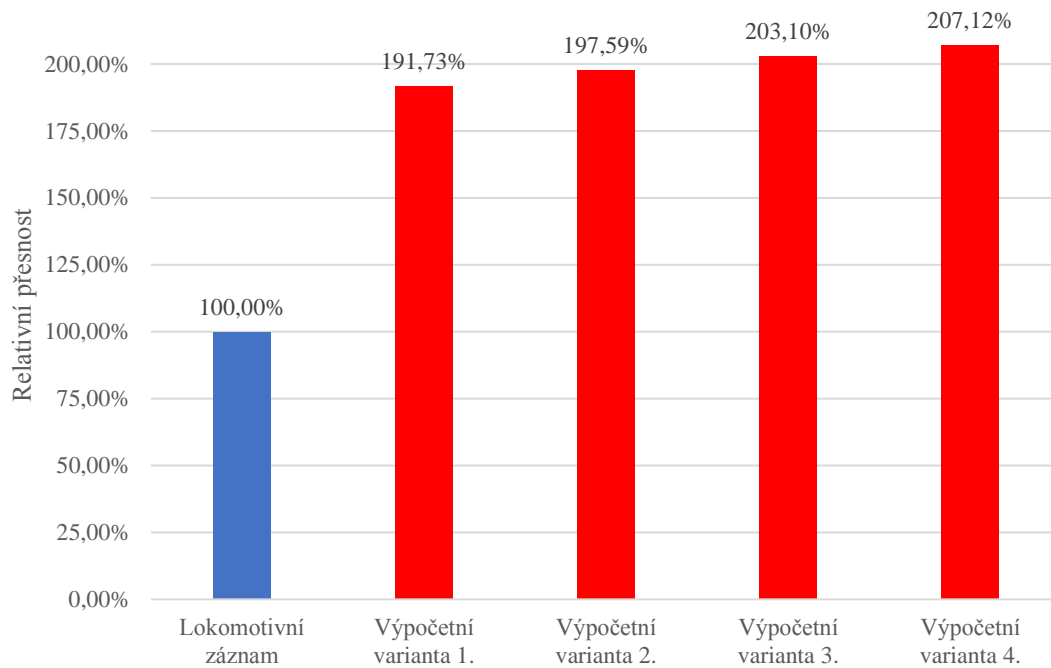
**Obrázek 22** - Relativní přesnost výpočtů jízdních dob

Zdroj: autor



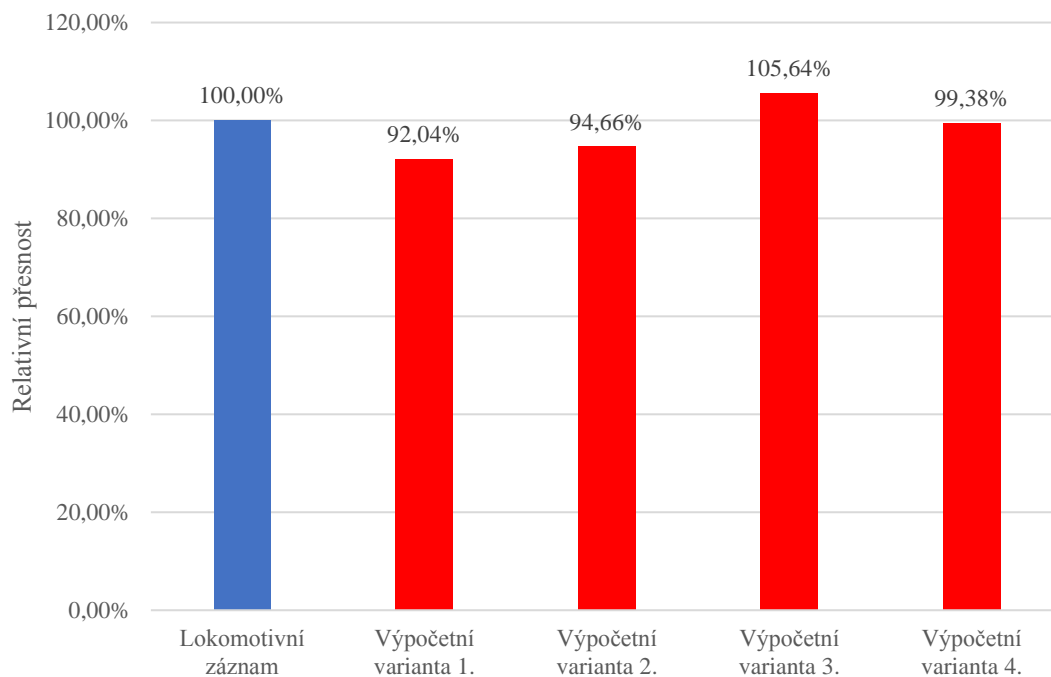
**Obrázek 23** - Relativní přesnost výpočtů spotřeb trakční elektrické energie

Zdroj: autor



**Obrázek 24** - Relativní přesnost výpočtů rekuperace elektrické energie

Zdroj: autor

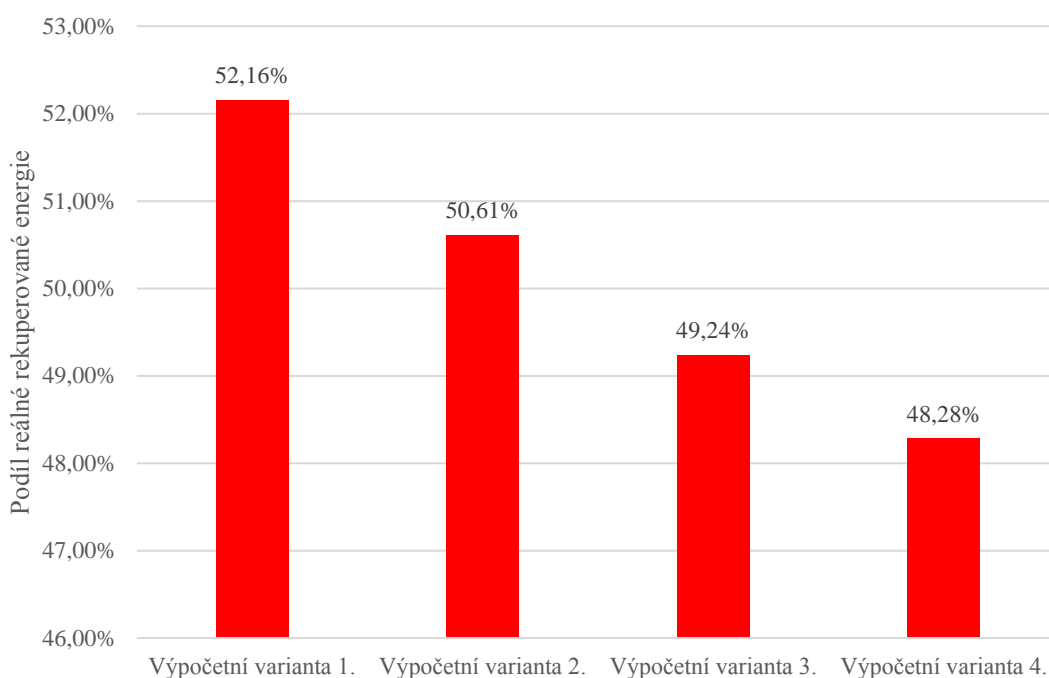


**Obrázek 25** - Relativní přesnost výpočtů rozdílů spotřebované a rekuperované energie

Zdroj: autor

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejpřesnější výpočetní varianta 4. udává nejpřesnější jízdní dobu i rozdíl spotřebované a rekuperované energie. Za povšimnutí stojí, že při

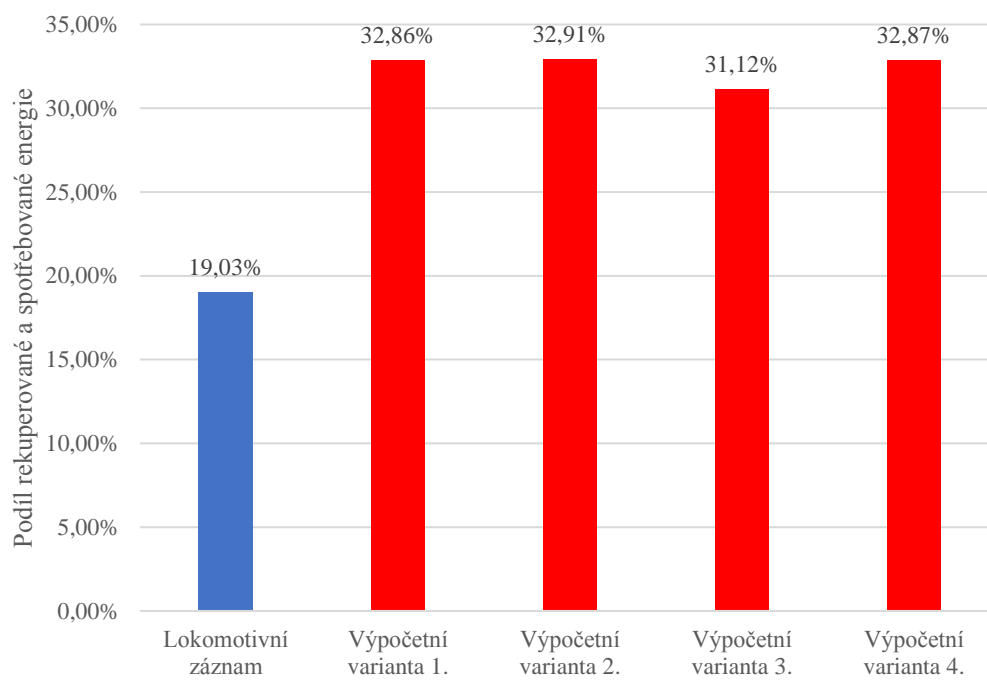
porovnávání rozdílů spotřebované a rekuperované elektrické energie poskytují jednotlivé výpočty (i za uvažovaných předpokladů týkajících se energetické účinnosti) výsledky, které jsou velmi podobné naměřeným datům. Dále je možné vyzorovat zajímavou podobnost jízdní doby naplánované v SJŘ a reálně zaznamenané jízdní doby, přestože vlak reálně zastavil vícekrát, než bylo plánované dle SJŘ. Z toho by mělo plynout, že reálná jízdní doba by měla být mnohem vyšší než plánovaná dle SJŘ. Jak již bylo zmíněno v popisu výpočtové varianty 2., důvodem je pravděpodobně především to, že při plánování mohou být uvažovány konzervativnější trakční parametry lokomotivy při výpočtu pro SJŘ (např. nižší dosažitelná tažná síla při nepříznivém počasí). Na obrázku 26 je možné vidět podíl, jaký tvoří skutečně rekuperovaná elektrická energie vzhledem k vypočítaným rekuperovaným energiím v jednotlivých výpočtových variantách.



**Obrázek 26** - Podíl reálně rekuperované energie vzhledem k vypočítaným rekuperovaným energiím

Zdroj: autor

Z grafu na obrázku 26 se dá usuzovat, že účinnost rekuperace se reálně pohybuje kolem 50 %. Dále na obrázku 27 je možné vidět, jaký procentuální podíl tvoří rekuperovaná elektrická energie vzhledem ke spotřebované elektrické energii v jednotlivých výpočetních variantách. Co se týká reálně zaznamenané rekuperované elektrické energie, tak ta tvoří cca 19 % energie spotřebované, což je relativně nezanedbatelná část. Dále je potřeba si uvědomit, že rekuperaci není možné provádět na 42 km dlouhém úseku této konkrétní tratě, tak jako bylo řečeno v kapitole 3.



**Obrázek 27** - Podíl reuperované a spotřebované elektrické energie

Zdroj: autor



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo analyzovat současný hybridní model plateb za odebranou trakční elektrickou energii a podrobněji rozebrat faktory, které vstupují do výpočtu konečných spotřeb jak v případě vlaků s EMS, tak i v případě vlaků bez EMS. Dále bylo popsáno numerické řešení pohybové rovnice vlaku, které umožňuje stanovit jízdní dobu a odhadnout spotřebu trakční elektrické energie konkrétního vlaku v konkrétním traťovém úseku. Současně byl navržen výpočtový model v MS Excel, který k tomuto numerickému řešení vhodně slouží. Tímto výpočtovým modelem byly nasimulovány čtyři výpočetní varianty jízdy vlaku, které následně byly porovnány s reálně zaznamenanými daty. Výsledkem bylo zhodnocení získaných výsledků a ukázka přesnosti výpočtů. Níže jsou shrnuta nejpodstatnější zjištěná fakta:

- Nejdetailnější výpočetní variantou 4. byla jízdní doba s ohledem na reálnou jízdní dobu stanovena velice přesně, a to s relativní odchylkou cca 6 %.
- Ukazuje se, že jízdní doby uváděné pro nákladní vlaky v SJŘ se zdají být relativně konzervativní. Toto bylo potvrzeno tím, že je lze dodržet i při častějším zastavování.
- Vypočtená spotřeba trakční elektrické energie ve variantě 4. v porovnání s paušální sazbou elektrické energie byla velmi přesná. Relativní odchylka činí 1,1 %.
- Výsledky ukazují, že za daných předpokladů je možné reálnou spotřebu energie nákladního vlaku odhadnout s přesností na 10 % – 25 %, přičemž se vždy jednalo o nadhodnocení skutečně dosažené spotřeby. Důvodem je především to, že se při výpočtu neuvažuje jízda výběhem. Rozdíly spotřeb a rekuperace byly v porovnání s reálně zaznamenanými daty vypočteny s relativní odchylkou 1 % – 8 %.
- Z výsledků je patrné, že reálná účinnost rekuperace se pohybuje kolem 50 %.
- Rekuperací je možné ušetřit zhruba 19 % spotřebované energie.
- Významným poznatkem je, že reálně naměřená spotřeba trakční elektrické energie je znatelně menší než spotřeba stanovená pomocí paušálních sazeb. Z tohoto důvodu železniční nákladní dopravci upřednostňují platbu za skutečně odebranou trakční elektrickou energii, čímž mohou snižovat jednu ze svých nákladových položek.

## SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- (1) SPRÁVA ŽELEZNIC, S. O., *Smlouva o dodávkách trakční elektrické energie* [online]. 2019 [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: [https://www.szdc.cz/documents/50004227/50172200/Smlouva\\_dodavky\\_TEE\\_2019\\_1.pdf/d5918106-60ad-4eaa-bd28-0def8570a818](https://www.szdc.cz/documents/50004227/50172200/Smlouva_dodavky_TEE_2019_1.pdf/d5918106-60ad-4eaa-bd28-0def8570a818)
- (2) MICHÁLEK T., ZELENKA J.: *Trakční mechanika*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018 [cit. 2019-10-28]. ISBN 978-80-7560-175-9.
- (3) ZELENKA J., MICHÁLEK T., KOHOUT M.: *Mechanika dopravy*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2013 [cit. 2019-10-28]. ISBN 978-80-7395-739-1.
- (4) FEDERÁLNÍ MINISTERSTVO DOPRAVY: *ČSD V7. Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982 [cit. 2019-10-28].
- (5) ČESKOSLOVENSKÉ STÁTNI DRÁHY, *Příloha k předpisu ČSD V7. Trakční výpočty*. Praha: Odbor železničních kolejových vozidel a opravárenství, 1992 [cit. 2019-10-28].
- (6) ŠIMRAL P., MICHÁLEK T., KRÁLÍK P.: *K problematice vozidlového odporu kontejnerových vlaků*. In: *Současné problémy v kolejových vozidlech 2013: XXIII. konference s mezinárodní účastí, Sborník příspěvků*, s. 178. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-676-9.
- (7) ŠIMAN, P. *Možnosti úspory trakční elektrické energie a motorové nafty závislé na železniční infrastruktuře*. In: *Vědeckotechnický sborník ČD č. 22/2006* [online]. Olomouc, 2006 [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195375/2202.pdf/6e52a8e7-9e43-4737-b75f-de1e81f95075>
- (8) SPRÁVA ŽELEZNIC, S. O. *Dovolení traťové třídy zatížení* [online]. [cit. 2020-3-18]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=594598>
- (9) SPRÁVA ŽELEZNIC, S. O. *Počty traťových kolejí, systémy trakčních soustav a čísla tratí podle knižního jízdního řádu* [online]. [cit. 2020-3-18]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=594598>
- (10) CS.WIKIPEDIA.ORG, *IV. tranzitní železniční koridor* [online]. [cit. 2020-3-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Ctvrť%C3%BD\\_%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_koridor#/media/Soubor:Ctvrty\\_zeleznicni\\_koridor.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Ctvrť%C3%BD_%C5%BEelezni%C4%8Dn%C3%AD_koridor#/media/Soubor:Ctvrty_zeleznicni_koridor.svg)
- (11) SPRÁVA ŽELEZNIC, S. O. *Rekuperace* [online]. [cit. 2020-3-18]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/PORTAL/ViewArticle.aspx?oid=594598>
- (12) Provozní záznamy společnosti METRANS Rail.