

Tomáš Michálek¹, Jiří Šlapák²

Vliv elektrifikace trati Klatovy–Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie

Klíčová slova: *elektrifikace trati, železniční trať Klatovy–Železná Ruda-Alžbětín, trakční výpočty, jízdní doby, spotřeba energie, rekuperace*

Úvod

Trendem poslední doby je zavádění nízkoemisních druhů dopravy, což na železnici znamená přechod od motorové vozby k elektrické trakci. Tento trend je v souladu se státní energetickou koncepcí, která v následujících desetiletích předpokládá výrazný nárůst spotřeby elektrické energie na úkor spotřeby ropných produktů (viz např. [1]). Elektrifikace, jež sama o sobě představuje poměrně nákladnou investiční akci, však má své opodstatnění pouze na tratích se silnějším provozem; na slabě zatížených tratích přichází v úvahu spíše nasazení hybridních (bateriových) vozidel.

Trať z Klatov do Železné Rudy je jednou z těch, u kterých bylo v minulosti několikrát uvažováno o elektrifikaci (viz např. článek [2]). Mimo jiné i proto, že první úsek trati z Plzně do Klatov byl elektrifikován již v roce 1996, a přímé vlaky tudíž nyní musí v Klatovech přepřahat. K realizaci tohoto záměru však (zatím) nedošlo, byť tato trať prošla v roce 2015 modernizací. V roce 2016 byla na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice vypracována bakalářská práce [3], která se zabývá teoretickým posouzením vlivu případné elektrifikace této trati na jízdní doby a spotřebu energie. Výsledky a nejvýznamnější závěry práce jsou představeny v tomto článku.

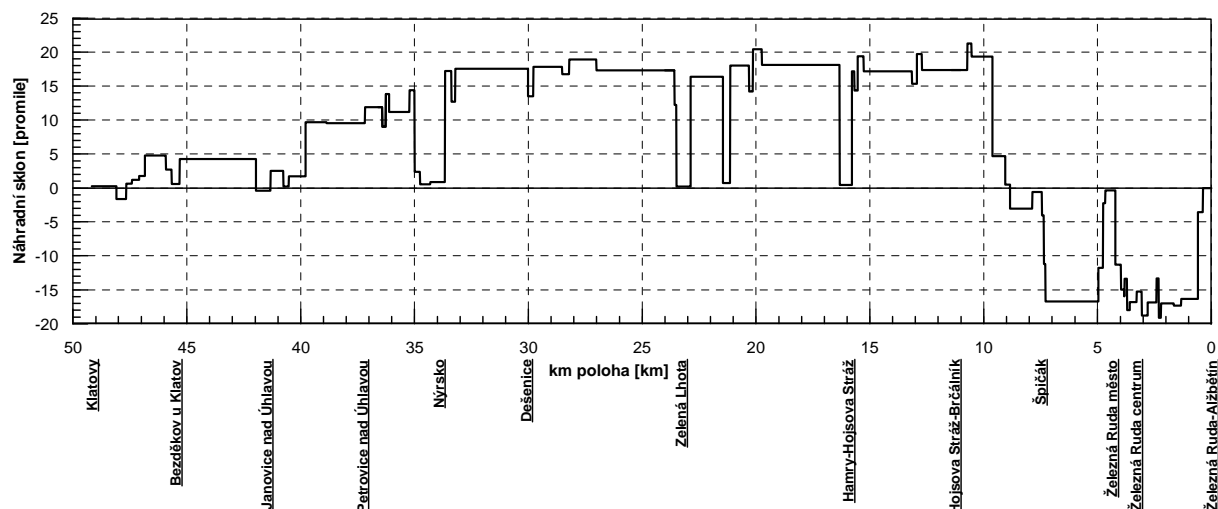
1. Stručná charakteristika trati

Vyšetřovaný, 49,18 km dlouhý, traťový úsek je součástí trati č. 183 (označení podle jízdního řádu) z Plzně hl. n. do Železné Rudy-Alžbětína, resp. jde o trať č. 711B (dle TTP SŽDC). Jedná se o jednokolejnou neelektrifikovanou trať, která je v současnosti klasifikována jako dráha regionální. Nejvýznamnějšími body na trati jsou Janovice nad Úhlavou, odkud odbočuje trať do Domažlic, dále Nýrsko a zejména pak Špičák a Železná Ruda, tedy významná turistická a lyžařská centra této části Šumavy. Nádraží v Alžbětíně, resp. v Bayerisch Eisenstein, je společnou pohraniční

¹ Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.; 1985; absolvent Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, obor Dopravní prostředky – zaměření Kolejová vozidla, nyní odborný asistent na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky DFJP UPa; adresa: Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová; tel.: 466 037 428; e-mail: Tomas.Michalek@upce.cz.

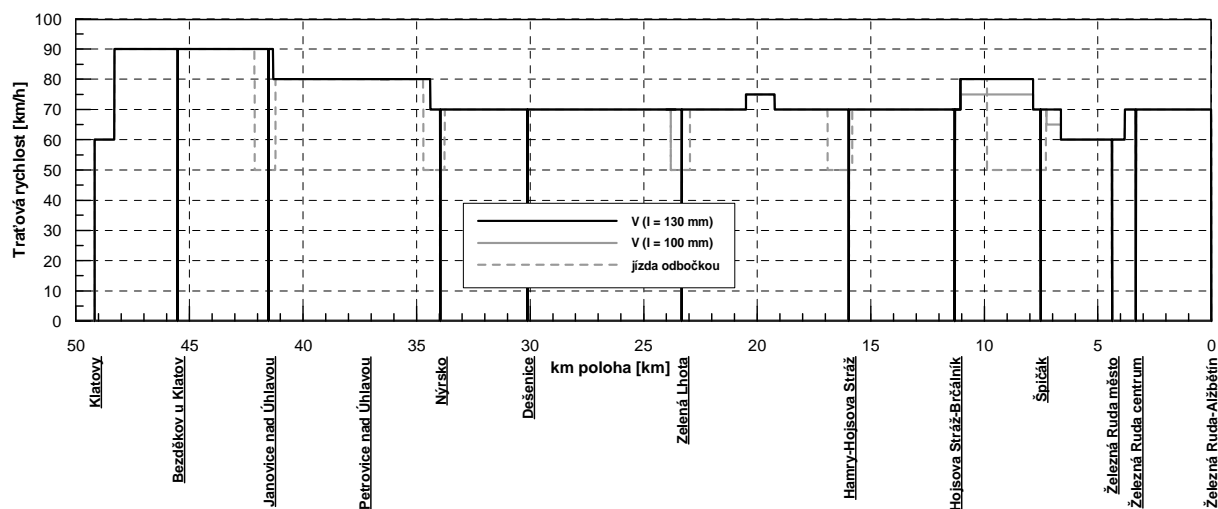
² Bc. Jiří Šlapák; 1993; absolvent bakalářského studia oboru Dopravní prostředky – zaměření Kolejová vozidla na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice, nyní student navazujícího magisterského studia téhož oboru; e-mail: Jiri.Slapak@student.upce.cz.

přechodovou stanicí, odkud na německé straně trať (ve správě DB Netz) pokračuje přes Zwiesel, Regen a Deggendorf až do Plattlingu, kde dnes existují jak přípoje (mezi)regionálními vlaky do Mnichova, Řezna a Pasova, tak též vlaky ICE do Vídně či Frankfurtu nad Mohanem. Zajímavostí je skutečnost, že díky napojení na síť vlaků ICE je dnes cesta z Klatov do Vídně či Budapešti rychlejší přes Železnou Rudu než přes Prahu a např. nejrychlejší vlakové spojení Alžbětina a Paříže má jízdní dobu kratší než 10 hodin.



Obr. 1 - Průběh náhradního sklonu trati Klatovy–Železná Ruda-Alžbětín

Z hlediska technických parametrů je trať z Klatov do Alžbětína zařazena do traťové třídy C3. Z Klatov do Nýrska trať prochází poměrně nenáročným terénem, avšak za Nýrskem začíná s využitím výraznějších sklonů (běžně 17 promile) stoupat četnými oblouky až na Špičák, který je s nadmořskou výškou 835 m n. m. nejvýše položenou stanicí na trati a odkud trať dále až do pohraniční přechodové stanice klesá. Průběh náhradního sklonu trati v závislosti na kilometrické poloze je pro směr Klatovy (km 49,180) – Železná Ruda-Alžbětín (km 0,000) znázorněn na obr. 1. Na vyšetřovaném úseku trati se nachází tři tunely, z nichž nejdelší je vrcholový, stavebně dvoukolejný Špičácký tunel pod Špičáckým sedlem se svojí délkou 1 747 m.



Obr. 2 - Uvažovaný rychlostní profil trati Klatovy–Železná Ruda-Alžbětín

V roce 2015 prošel vyšetřovaný traťový úsek modernizací, v rámci které byla celá trať mj. vybavena dálkově ovládaným zabezpečovacím zařízením, ve stanicích byly provedeny rozsáhlé úpravy kolejíště a vybudována bezbariérově přístupná nástupiště s nástupní hranou ve výšce 550 mm nad TK, byla obnovena železniční stanice na Zelené Lhotě, kde je tak nyní možné křížování vlaků, a v některých místech došlo též k úpravám železničního svršku s cílem zvýšení traťové rychlosti. Traťová rychlost se tak nyní pohybuje v celém úseku v rozmezí 60 až 90 km/h. Rychlostní profil trati, jenž byl následně uvažován při trakčních výpočtech, je znázorněn na obr. 2.

2. Uvažované vlakové soupravy

Vliv případné elektrifikace předmětného traťového úseku byl v práci [3] posuzován s využitím výpočtů teoretických jízdních dob šesti různých vlakových souprav. Tyto soupravy lze rozdělit do dvou kategorií z hlediska obsaditelnosti sedícími cestujícími; jednak jde o soupravy s kapacitou přibližně 350 míst a dále o soupravy s kapacitou zhruba 150 míst. V obou kategoriích jsou zastoupeny jak soupravy, jež jsou na dané trati provozovány v současnosti době v motorové trakci (a doplněné navíc o moderní motorovou jednotku), tak i soupravy, jejichž nasazení by přicházelo v úvahu po případné elektrifikaci trati. Konkrétně byly uvažovány tyto vlakové soupravy:

- lokomotiva ř. 754 ČD (viz obr. 3) a souprava 5 osobních vozů (ABpee³⁴⁷ + Bbdgmee²³⁶ + 3x Bdtee²⁷⁶);
- lokomotiva ř. 363 ČD (viz obr. 6) a souprava 5 osobních vozů (ABpee³⁴⁷ + Bbdgmee²³⁶ + 3x Bdtee²⁷⁶), tedy stejná souprava jako v předchozím případě, avšak tažená elektrickou lokomotivou, jež je na daných soupravách rychlíků nasazována z Prahy do Plzně, příp. až do Klatov, již nyní;
- pětivozová rychlíková elektrická jednotka ř. 661 ČD „InterPanter“ (typ Škoda 10Ev, viz obr. 8);
- modernizovaný motorový vůz ř. 842 ČD s přípojným vozem Bdtn⁷⁵⁶ (viz obr. 4);
- dvoučlánková motorová jednotka Siemens Desiro Classic (viz obr. 5);
- dvouvozová regionální elektrická jednotka ř. 650 ČD „RegioPanter“ (typ Škoda 7Ev, viz obr. 7).



Obr. 3 - Lokomotiva ř. 754 ČD v žst. Železná Ruda-Alžbětín



Obr. 4 - Souprava ř. 842 + Bdtn⁷⁵⁶



Obr. 5 - Motorová jednotka Siemens Desiro Classic



Obr. 6 - Elektrická lokomotiva
ř. 363 ČD (v popředí) v žst.
Plzeň hl. n.



Obr. 7 - EJ
ř. 650 ČD
(Škoda 7Ev)

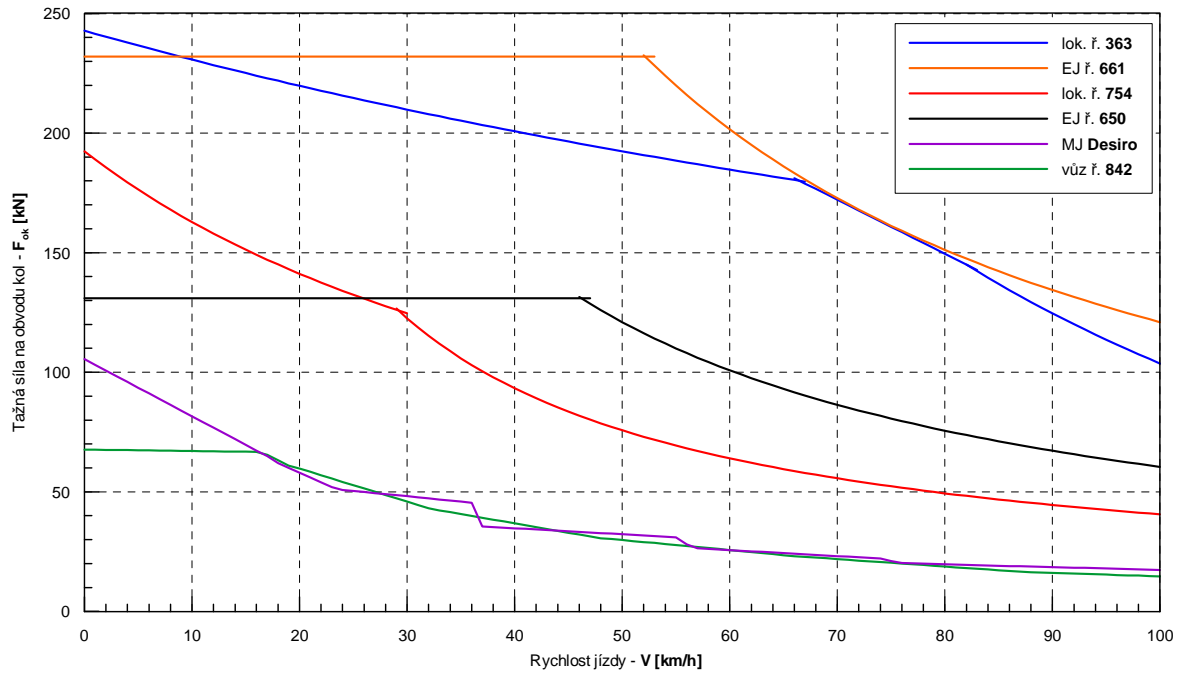


Obr. 8 - Elektrická jednotka
ř. 661 ČD (Škoda 10Ev)

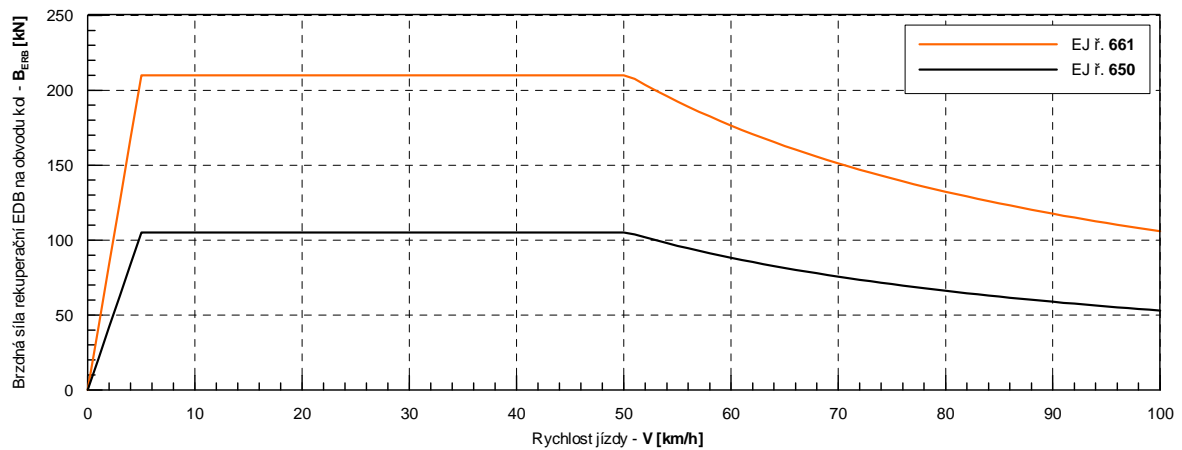
Základní technické údaje jednotlivých vlakových souprav jsou uvedeny v tab. 1. Na obr. 9, resp. obr. 10 je provedeno porovnání trakčních, resp. brzdových charakteristik na obvodu kol pro hodnocené vlakové soupravy; na obr. 11 jsou uvedeny uvažované závislosti jejich absolutního vozidlového odporu na rychlosti jízdy.

K uvedeným technickým údajům vyšetřovaných vlakových souprav (obr. 9 až 11 a tab. 1) budiž podáno následující vysvětlení:

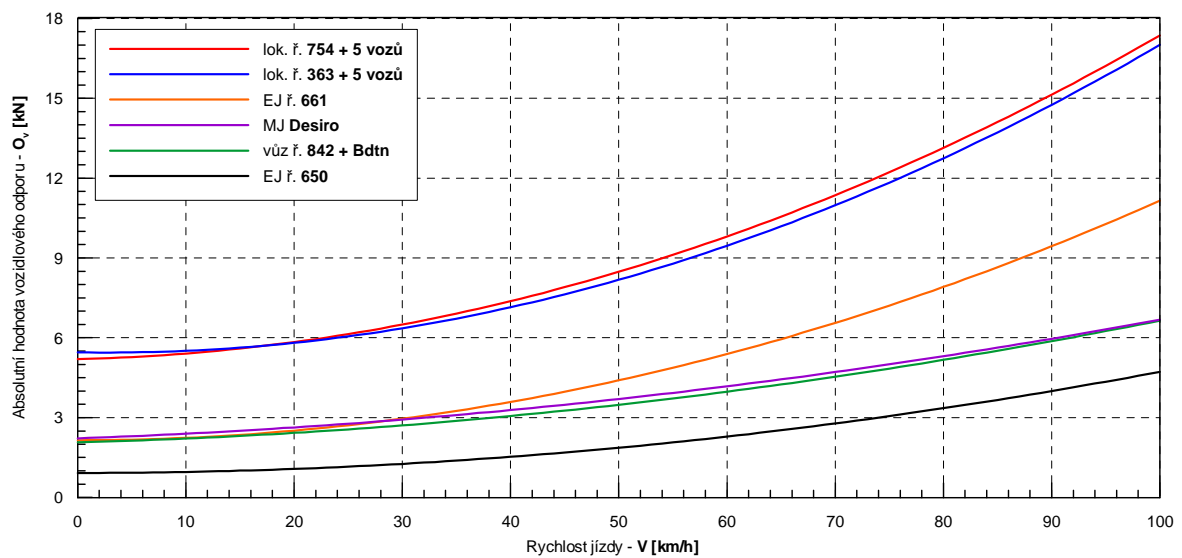
- trakční charakteristiky, jejichž zdrojem je předpis V7 [4] pro případ lokomotiv řad 363 a 754, technická dokumentace k vozidlu v případě motorového vozu řady 842, článek [5] v případě motorové jednotky Desiro Classic a technická dokumentace výrobce v případě elektrických jednotek rodiny „Panter“, byly pro potřeby trakčních výpočtů nahrazeny po částech analytickými funkcemi, které jsou vykresleny na obr. 9;
- pokud bylo zjištěno, že některá z trakčních charakteristik využívá vyšší součinitel adheze, než kolik předpokládají pro trakční výpočty současné TSI LOC&PAS [6], byla trakční charakteristika dodatečně omezena dle těchto TSI, tedy na maximální hodnotu součinitele adheze 0,30 při rozjezdu; zde se toto opatření týkalo pouze motorového vozu ř. 842;
- zdrojem vozidlových odporů jednotlivých uvažovaných vozidel byl jednak předpis [4] pro případ lokomotiv řad 363 a 754, jednak běžně používaný měrný vozidlový odpor typu „R“ (dle předpisu V7) pro případ osobních vozů klasické stavby, jednak článek [5] pro případ motorové jednotky Desiro Classic a jednak výsledky měření měrného vozidlového odporu moderní elektrické jednotky, které jsou zpracované v bakalářské práci [7], a které zde byly využity pro odhad absolutního vozidlového odporu elektrických jednotek řad 650 a 661; absolutní vozidlový odpor jednotlivých souprav tak byl pro potřeby trakčních výpočtů vždy popsán polynomem 2. stupně;
- v případě motorového vozu řady 842, u něhož nebyla závislost vozidlového odporu na rychlosti jízdy známa, byl při výpočtu předpokládán stejný tvar měrného vozidlového odporu jako u jednotky Desiro Classic.



Obr. 9 - Uvažované trakční charakteristiky vyšetřovaných vlakových souprav



Obr. 10 - Uvažované brzdné charakteristiky rekuperační EDB elektrických jednotek



Obr. 11 - Uvažované vozidlové odpory vyšetřovaných vlakových souprav

Tab. 1 - Základní technické údaje vyšetřovaných vlakových souprav

Souprava Veličina	Lok. 754 + 5 vozů	Lok. 363 + 5 vozů	EJ ř. 661 InterPanter	MV ř. 842 + Bdt ⁿ 756	MJ Desiro	EJ ř. 650 RegioPanter
Celková hmotnost při obsazení sedícími cestujícími	296,0 t	310,0 t	270,5 t	97,4 t	78,0 t	115,3 t
Délka soupravy přes nárazníky	141,0 m	141,2 m	132,4 m	49,7 m	40,2 m	52,9 m
Počet míst k sezení	363	363	350	152	123	147
Maximální rychlost	100 km/h	120 km/h	160 km/h	100 km/h	120 km/h	160 km/h
Maximální výkon	1460 kW	3060 kW	3360 kW	484 kW	550 kW	1680 kW
Hmotnost prázdné soupravy na sedadlo	736 kg	774 kg	693 kg	553 kg	554 kg	704 kg
Hmotnostní výkon obsazené soupravy	4,9 kW/t	9,9 kW/t	12,4 kW/t	5,0 kW/t	7,1 kW/t	14,6 kW/t

3. Trakční výpočty

Samotné výpočty jízdních dob a spotřeby energie jednotlivých uvažovaných souprav byly provedeny s využitím tabulkového editoru MS Excel, a to pro oba směry jízdy. Základem těchto trakčních výpočtů bylo numerické řešení pohybové rovnice vlaku, která může být obecně zapsána ve tvaru:

$$\left(\sum_{(i)} m_i \cdot (1 + \rho_i) \right) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_v - O_v - O_t, \quad (1)$$

kde m_i a ρ_i jsou hmotnosti a součinitele rotačních hmot jednotlivých vozidel řazených ve vlaku, \ddot{x} je aktuální hodnota zrychlení vlaku, F_{ok} je aktuální celková tažná síla na obvodu kol, B_v je aktuální brzdná síla, O_v je aktuální hodnota celkového absolutního vozidlového odporu vlaku a O_t je aktuální hodnota celkového absolutního traťového odporu vlaku. Součinitele rotačních hmot jednotlivých uvažovaných vozidel byly pro potřeby trakčních výpočtů odhadnuty na základě známých, příp. běžných hodnot potřebných parametrů vozidel; z hlediska hmotnosti vozidel byl uvažován stav, kdy jsou jednotlivé soupravy plně obsazeny sedícími cestujícími.

Pokud zavedeme setrvačnou (redukovanou) hmotnost vlaku m_{v-red} , dále vyjádříme traťový odpor O_t s využitím znalosti náhradního sklonu s_n (udávaného v [‰]) a celkové hmotnosti vlaku M_v (udávané v [t]) a vyjádříme zrychlení \ddot{x} zavedením závislosti změny rychlosti v na dráze x , získává diferenciální rovnice (1) tvar:

$$m_{v-red} \cdot \frac{d(v^2)}{2 \cdot dx} = F_{ok} - B_v - O_v - s_n \cdot M_v \cdot g. \quad (2)$$

Pro potřeby numerického řešení pohybu vlaku (viz též například skriptu [8]) byla diferenciální rovnice (2) následně upravena do diferenčního tvaru, který umožňuje řešení dráhového tachogramu, tedy závislosti rychlosti V (udávané v [km/h]) na ujeté dráze x (udávané v [m]), zavedením dráhového integračního kroku délky Δx . Vztah pro výpočet rychlosti V_{i+1} na základě znalosti rychlosti V_i v předchozím integračním kroku tak má následující tvar:

$$V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{F_{ok} - B_v - O_v - s_n \cdot M_v \cdot g}{m_{v-red}} \cdot \Delta x}. \quad (3)$$

Při samotném numerickém výpočtu zde byla volena délka integračního kroku 10 m, která se ukazuje jako plně postačující. Délka vlaku byla ve výpočtech zohledněna takovým způsobem, že např. zrychlování vlaku při jeho vjezdu do traťového úseku s vyšší traťovou rychlostí je umožněno až tehdy, když do tohoto úseku vjede celý vlak. Jinak je však vlak – s ohledem na způsob matematického popisu jeho pohybu – reprezentován hmotným bodem, který je situován na čele reálné soupravy a k němuž se vztahuje např. aktuální hodnota náhradního (redukovaného) sklonu na trati.

Dále se postup při numerickém řešení pohybu vlaku mírně liší podle toho, o kterou fázi jízdy vlaku se jedná. Obecně mohou nastat tyto situace:

- Při rozjezdu (zrychlování) vlaku se uvažuje jízda s maximální tažnou silou, jež je při aktuální rychlosti jízdy k dispozici (viz trakční charakteristiky uvedené na obr. 9), zatímco brzdná síla je nulová. V jednotlivých integračních krocích je zohledněn aktuální vozidlový odpor, jenž je závislý na rychlosti jízdy, i aktuální traťový odpor, který závisí na ujeté dráze, resp. na aktuální poloze vlaku na trati. Pro výpočet tachogramu tak lze přímo aplikovat vztah (3).
- Po dosažení traťové rychlosti v daném úseku se vlak pohybuje konstantní rychlostí. Z tohoto důvodu je levá strana rovnice (1), resp. (2), nulová, a proto je potřeba pro aktuální podmínky dané vozidlovým a traťovým odporem hledat v každém integračním kroku takovou tažnou, příp. brzdou sílu, kterou musí vlak vyvíjet, aby výsledné zrychlení bylo nulové. Zvláštní případ nastává, je-li potřebná tažná síla při dané rychlosti při jízdě do stoupání větší než aktuálně dostupná tažná síla dle příslušné trakční charakteristiky. Potom je pro řešení opět nutné použít vztah (3) a sledovat vývoj rychlosti jízdy vlaku.
- Ve fázi brzdění vlaku (ať už do zastavení, nebo při snižování rychlosti jízdy před omezením traťové rychlosti) bylo při výpočtech uvažováno pro všechny soupravy a za všech podmínek konstantní zpomalení (odrychlení) o hodnotě $a_b = 0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Brzdná dráha x_b , tedy vzdálenost před místem zastavení, resp. začátkem omezení traťové rychlosti, kde je nutné začít vyvíjet brzdou sílu, tak může být stanovena pomocí vztahu:

$$x_b = \frac{\Delta(V^2)}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a_b}, \quad (4)$$

přičemž potřebnou brzdou sílu je možné v jednotlivých integračních krocích opět vypočítat s využitím pohybové rovnice vlaku (1), tedy jako:

$$B_v = m_{v-red} \cdot a_b - O_v - s_n \cdot M_v \cdot g. \quad (5)$$

- Při brzdění vozidel vybavených elektrodynamickou rekuperační brzdou (ERB) je přednostně uvažováno využití této ERB (viz brzdové charakteristiky na obr. 10). To znamená, že celková brzdná síla vlaku B_v je rozdělena na brzdou sílu ERB (B_{ERB}) a na brzdou sílu mechanické třecí (kotoučové) brzdy (B_{TB}). A jen v případě, kdy by účinek brzdé síly ERB nebyl pro dosažení požadovaného odrychlení (nebo pro udržování konstantní rychlosti na spádu) dostatečný, by

byl její účinek doplněn účinkem třecí brzdy. Tato úvaha sice nemá vliv na jízdu vlaku jako takovou, resp. na jízdní doby, avšak projeví se v energetické bilanci jízdy vlaku při zohlednění vlivu rekuperované energie.

Z hlediska výpočtu jízdních dob jsou v rámci numerického řešení pohybové rovnice vlaku počítány pro jednotlivé dráhové integrační kroky dílčí jízdní doby, a to buď jako:

$$\Delta t_i = \frac{3,6 \cdot \Delta x}{V_i} \quad (6)$$

pro případ jízdy vlaku konstantní rychlostí, anebo za předpokladu nenulové aktuální hodnoty zrychlení jako:

$$\Delta t_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{3,6 \cdot \ddot{x}_i}. \quad (7)$$

Celková jízdní doba ve vyšetřovaném traťovém úseku je pak definována jako součet příslušných dílčích jízdních dob.

Poslední úlohou, která byla v rámci práce [3] řešena, byly výpočty spotřeby energie. Na základě numerického řešení pohybové rovnice vlaku lze jednoznačně vypočítat vykonanou trakční práci W_{tr} , která je v každém integračním kroku definována jako součin tažné síly na obvodu kol F_{ok} a délky dráhového integračního kroku Δx . Pro získání údaje o skutečně spotřebované trakční energii E_{tr} je však nutné do výpočtu zahrnout ještě účinnost η ; pro dílčí spotřebu energie v integračním kroku i tedy platí:

$$E_{tr,i} = \frac{1}{\eta} \cdot W_{tr,i} = \frac{1}{\eta} \cdot F_{ok,i} \cdot \Delta x. \quad (8)$$

Stanovit přesně účinnost η , ať už při uvažování motorové, nebo elektrické trakce, je prakticky nemožné, neboť tato je ovlivněna celou řadou faktorů a pro zohlednění výsledné energetické náročnosti jízdy vlaku by do ní měla být započtena například i spotřeba pomocných pohonů, klimatizace, resp. vytápění atd. Zde proto byly využity zjednodušené odhady, předpokládající účinnost vozidel elektrické trakce o hodnotě 70 % (v níž je uvažována jednak účinnost samotného vozidla, ale i trakční napájecí soustavy za předpokladu napájení soustavou 25 kV AC 50 Hz) a 34 % pro případ hnacích vozidel motorové trakce (zde je uvažována účinnost spalovacího motoru 40 % v kombinaci s účinností zařízení pro přenos výkonu 85 %). V obou případech je tudíž výsledkem odhad spotřeby energie „na vstupu do železničního systému“. V případě závislé trakce jde o elektrickou energii odebíranou ze sítě trakční napájecí stanicí a v případě nezávislé trakce o teplo, jež se uvolní spálením motorové nafty ve spalovacím motoru; uvažováním výhřevnosti motorové nafty o hodnotě cca 10 kWh/l lze pak příslušnou spotřebu tepelné energie přepočítat na spotřebu nafty v litrech.

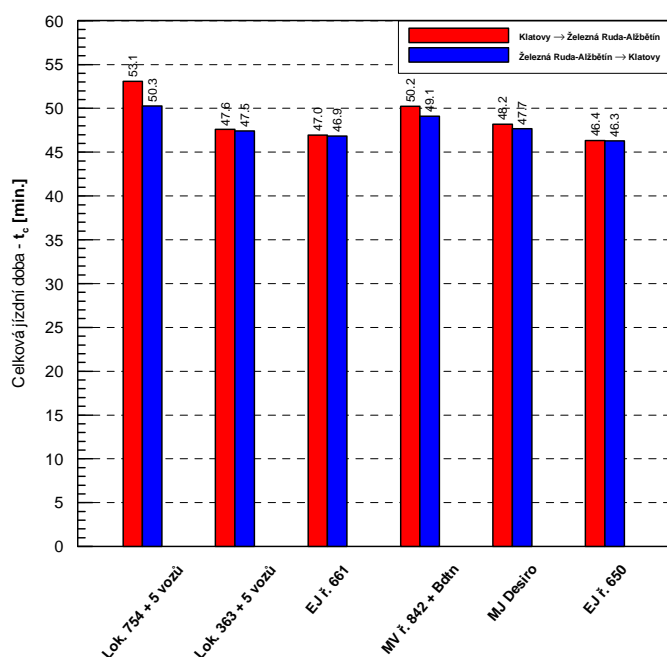
V případě použití rekuperační elektrodynamické brzdy (ERB) lze v ideálním případě docílit energetických úspor, neboť rekuperovanou elektrickou energii lze v principu vrátit zpět do sítě, případně s ní napájet pomocné pohony a další agregáty vozidla. Rekuperačním brzděním tak lze získat elektrickou energii, kterou je možné v určitém integračním kroku určit jako:

$$E_{ERB,i} = \eta \cdot B_{ERB,i} \cdot \Delta x, \quad (9)$$

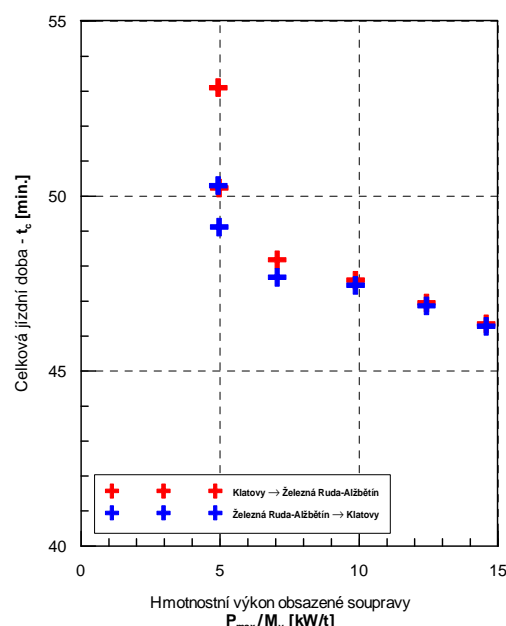
kde η je opět účinnost, tentokrát definovaná jako podíl reálně využitelné energie získané rekuperačním brzděním (např. tedy energie navrácené do sítě) a kinetické energie, která je vozidlu účinkem ERB odebrána. Zde byla opět pro jednoduchost uvažována účinnost 70 %.

4. Dosazené výsledky

Při modelování jízdy vyšetřovaných vlakových souprav s využitím principů popsaných v kap. 3 bylo předpokládáno, že všechny soupravy zastavují ve všech stanicích a zastávkách s výjimkou zastávky Petrovice nad Uhlavou. Vypočtené jízdní doby jsou tedy teoretickými jízdními dobami stanovenými za podmínek plného využití trakčních charakteristik uvedených na obr. 9 a (poměrně intenzivního) brzdění do zastávek s uvažovanou konstantní hodnotou odrychlení $0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V těchto jízdních dobách tedy nejsou započteny pobyty ve stanicích a zastávkách, případně další přírůstky. Vypočtené hodnoty jízdních dob jednotlivých souprav v jednotlivých mezistaničních úsecích jsou pro oba směry uvedeny v tab. 2 a v tab. 3, resp. na obr. 12.



Obr. 12 - Vypočtené teoretické jízdní doby vyšetřovaných souprav v jednotlivých směrech



Obr. 13 - Závislost jízdních dob na hmotnostním výkonu souprav

Z vypočtených jízdních dob uvedených v tab. 2 a tab. 3, resp. graficky na obr. 12, je zřejmé, že uvažované soupravy v elektrické trakci dosahují kratších jízdních dob než soupravy v trakci motorové. To je však dáno zejména nižším hmotnostním výkonem příslušných vlaků motorové trakce spolu s nízkým podílem hnacích dvojkolí, neboť moderní motorová jednotka je schopna dosáhnout jízdních dob, které jsou s jízdními dobami souprav vedených v elektrické trakci porovnatelné. Zatímco souprava vozů tažená lokomotivou ř. 754 a motorový vůz ř. 842 s přípojným vozem Bdtň⁷⁵⁶ disponují hmotnostním výkonem zhruba 5 kW/t (viz tab. 1), v případě motorové jednotky Desiro Classic je to cca 7 kW/t (přičemž má tato jednotka poháněny $\frac{2}{3}$ dvojkolí) a v případě uvažovaných vlaků vedených v elektrické trakci se hmotnostní výkon

pohybuje mezi 10 a 15 kW/t. Souvislost délky jízdních dob s hmotnostním výkonem demonstruje též graf na obr. 13. Rozdíl teoretické čisté jízdni doby nejpomalejšího vlaku (lokomotiva ř. 754 se soupravou vozů) a nejrychlejšího vlaku (dvouvozová elektrická jednotka ř. 650) činí 6,75 minuty (tzn. více než 10 % jízdni doby) ve směru z Klatov do Železné Rudy-Alžbětína a 4 minuty (tj. zhruba 8 % jízdni doby) ve směru opačném.

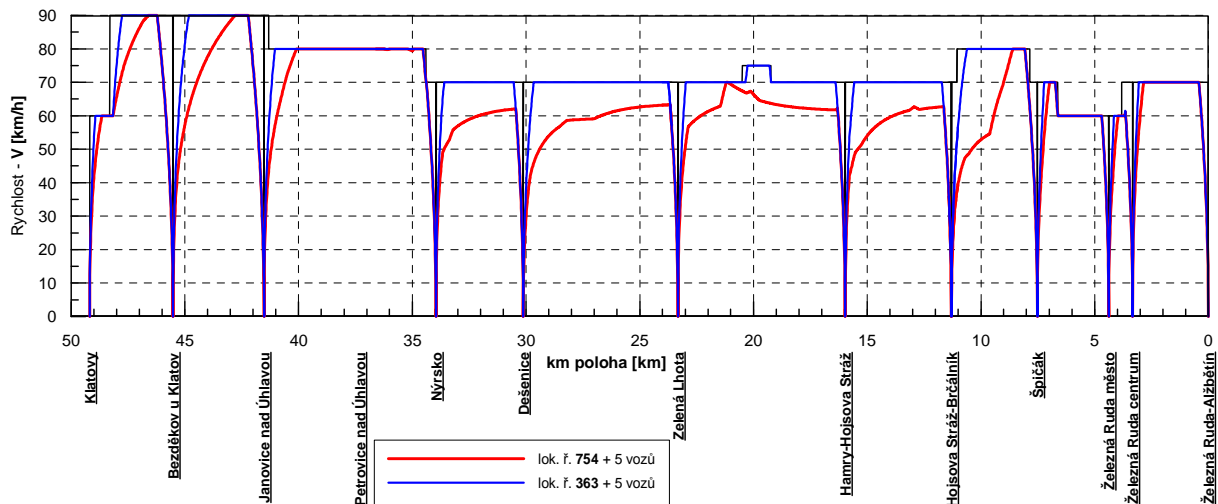
Tab. 2 - Vypočtené teoretické jízdni doby vyšetřovaných vlakových souprav v jednotlivých mezistaničních úsecích traťového úseku Klatovy–Železná Ruda-Alžbětín [min:s]

Souprava Mezistaniční úsek	Lok. 754 + 5 vozů	Lok. 363 + 5 vozů	EJ ř. 661 InterPanter	MV ř. 842 + Bdtn ⁷⁵⁶	MJ Desiro	EJ ř. 650 RegioPanter
Klatovy → Bezděkov	3:45	3:31	3:28	3:39	3:32	3:23
→ Janovice n. Úhl.	3:55	3:29	3:25	3:47	3:36	3:21
→ Nýrsko	6:39	6:23	6:20	6:34	6:26	6:17
→ Dešenice	4:33	3:55	3:52	4:10	3:58	3:49
→ Zelená Lhota	7:42	6:32	6:27	6:57	6:36	6:23
→ Hamry- Hojsova Stráž	7:40	6:52	6:49	7:05	6:53	6:46
→ Hojsova Stráž- Brčálník	5:25	4:38	4:35	4:57	4:42	4:32
→ Špičák	4:33	3:40	3:33	4:17	3:54	3:29
→ Žel. Ruda město	3:42	3:35	3:32	3:41	3:35	3:29
→ Žel. Ruda centrum	1:41	1:35	1:32	1:38	1:33	1:30
→ Železná Ruda- Alžbětín	3:31	3:26	3:24	3:29	3:26	3:22
Celková jízdni doba	53:06	47:36	46:57	50:14	48:11	46:21

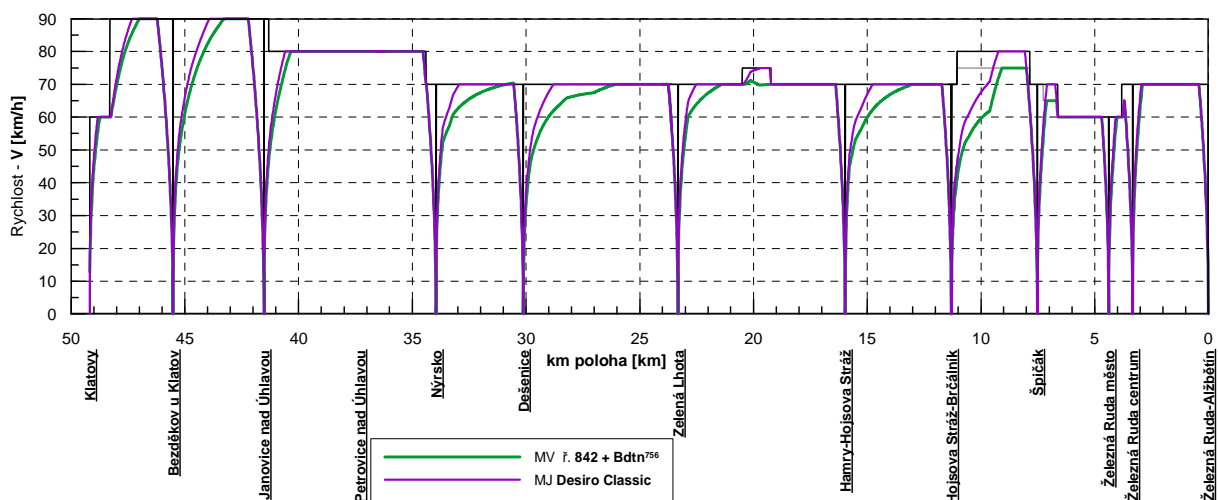
Tab. 3 - Vypočtené teoretické jízdni doby vyšetřovaných vlakových souprav v jednotlivých mezistaničních úsecích traťového úseku Železná Ruda-Alžbětín–Klatovy [min:s]

Souprava Mezistaniční úsek	Lok. 754 + 5 vozů	Lok. 363 + 5 vozů	EJ ř. 661 InterPanter	MV ř. 842 + Bdtn ⁷⁵⁶	MJ Desiro	EJ ř. 650 RegioPanter
Žel. Ruda-Alžbětín → → Žel. Ruda centrum	4:01	3:29	3:26	3:42	3:29	3:23
→ Žel. Ruda město	2:02	1:40	1:35	1:53	1:42	1:30
→ Špičák	3:59	3:38	3:35	3:45	3:38	3:32
→ Hojsova Stráž- Brčálník	3:54	3:34	3:31	3:52	3:37	3:28
→ Hamry- Hojsova Stráž	4:40	4:35	4:33	4:38	4:35	4:31
→ Zelená Lhota	7:01	6:52	6:49	6:57	6:52	6:46
→ Dešenice	6:35	6:27	6:24	6:32	6:27	6:21
→ Nýrsko	3:58	3:52	3:50	3:56	3:52	3:48
→ Janovice n. Úhl.	6:38	6:25	6:22	6:33	6:26	6:18
→ Bezděkov	3:47	3:29	3:25	3:41	3:33	3:21
→ Klatovy	3:43	3:26	3:22	3:38	3:30	3:19
Celková jízdni doba	50:18	47:27	46:52	49:07	47:41	46:17

Jak je na první pohled zřejmé zejména z grafu na obr. 12, tak u souprav s nízkým hmotnostním výkonem (především u soupravy osobních vozů tažené lokomotivou ř. 754) existuje nezanedbatelný rozdíl v jízdní době vlaku v jednotlivých směrech. Tento jev souvisí s výškovým profilem trati (viz obr. 1), kdy při jízdě vlaku do Železné Rudy převažuje na trati (poměrně výrazné) stoupání, zatímco při jízdě do Klatov jede vlak větší část trati po spádu. A právě ve stoupání potřebuje souprava s nižším výkonem k dosažení traťové rychlosti delší dobu, resp. se rozjíždí na delší dráze, je-li ovšem vůbec schopna v daném úseku traťové rychlosti dosáhnout. Na obr. 14 je tento jev demonstrován na případu porovnání vypočtených dráhových tachogramů pro směr z Klatov do Železné Rudy pro soupravu vozů taženou lokomotivami řad 754 a 363; z těchto tachogramů je zřejmé, že souprava s motorovou lokomotivou není v úsecích s největším (náhradním) sklonem schopna traťové rychlosti dosáhnout. Na obr. 15 je podobné porovnání provedeno pro soupravu 842 + Bdn⁷⁵⁶ (která navíc nemůže využívat rychlostní profil pro nedostatek převýšení 130 mm) a pro motorovou jednotku Desiro.



Obr. 14 - Porovnání vypočtených dráhových tachogramů pro soupravu pěti osobních vozů taženou jednak lokomotivou ř. 754 (červeně) a jednak lokomotivou ř. 363 (modře)



Obr. 15 - Porovnání vypočtených dráhových tachogramů pro motorový vůz ř. 842 s přípojným vozem Bdn⁷⁵⁶ (zeleně) a motorovou jednotku Desiro Classic (fialově)

Při výše uvedených trakčních výpočtech byl uvažován vjezd a odjezd z jednotlivých stanic traťovou rychlostí, což je po provedené modernizaci trati v průběžných kolejích možné. Pro posouzení vlivu jízdy odbočkou na jízdní doby však byly pro jednotlivé stanice a oba směry jízdy provedeny s nejpomalejší a s nejrychlejší soupravou také výpočty právě pro vjezd a odjezd odbočkou. Při těchto dodatečných výpočtech byl uvažován rychlostní profil, který je na obr. 2 znázorněn čárkovanou šedou čarou, a který kromě zastavení vlaku ve stanici předpokládá – s ohledem na tvar použitých výhybek – jízdu rychlostí maximálně 50 km/h od úrovně vjezdového návěstidla až do okamžiku, kdy konec vlaku mine poslední výhybku na odjezdovém zhlaví. Zjištěné přírůstky jízdních dob vlivem jízdy odbočkou jsou pro tento scénář zaznamenány v tab. 4. Z uvedených výsledků vyplývá, že omezení rychlosti při jízdě odbočkou má menší vliv u méně výkonných souprav (ve smyslu nižší hodnoty měrného výkonu), neboť tyto jsou již při rozjezdu omezeny právě svými trakčními parametry, kvůli nimž i rozjezd na rychlost 50 km/h probíhá na delší dráze, resp. v delším čase. Výrazně větší přírůstky jízdních dob obou vyšetřovaných souprav ve stanici Špičák při jízdě od Klatov jsou způsobeny uvažovaným omezením rychlosti na 50 km/h od vjezdového návěstidla, které se zde nachází již před Špičáckým tunelem, tedy téměř 2 km před vjezdovým zhlavím stanice.

Tab. 4 - Přírůstky jízdních dob nejpomalejší a nejrychlejší soupravy v jednotlivých směrech při jízdě vlaku odbočkou v jednotlivých stanicích na trati [min:s]

Směr jízdy	Klatovy → Žel. Ruda-Alžbětín		Žel. Ruda-Alžbětín → Klatovy	
	Lok. ř. 754 + 5 vozů	EJ ř. 650 RegioPanter	Lok. ř. 754 + 5 vozů	EJ ř. 650 RegioPanter
Železniční stanice				
Janovice nad Úhlavou	0:17	0:21	0:14	0:18
Nýrsko	0:15	0:18	0:16	0:18
Zelená Lhota	0:12	0:13	0:11	0:13
Hamry-Hojsova Stráž	0:11	0:18	0:10	0:13
Špičák	0:43	1:02	0:15	0:26

V tab. 5 a tab. 6 jsou uvedeny vypočtené hodnoty vykonané trakční práce a odhady spotřeby energie jednotlivých souprav pro jednotlivé směry za předpokladu účinnosti 34 % pro vlaky nezávislé trakce, resp. 70 % pro vlaky trakce závislé (viz též kap. 3). U elektrických jednotek je uvedena i teoretická úspora elektrické energie při využití rekuperačního brzdění (opět za předpokladu účinnosti rekuperačního procesu 70 %) a odpovídající spotřeba po započtení rekuperované energie. U vlaků motorové trakce je očekávaná spotřeba energie navíc přepočítána na spálený objem motorové nafty a dále je v tabulkách uveden odhad nákladů na energii za předpokladu cen ve výši 2,50 Kč/kWh elektrické energie a 30 Kč/l nafty a bez započtení rekuperačních úspor.

Při pohledu na hodnoty uvedené v tab. 5 a tab. 6 je evidentní, že ve směru z Klatov do Železné Rudy-Alžbětína jsou hodnoty spotřeby energie jednotlivých vlakových souprav prakticky dvojnásobné v porovnání se směrem opačným, což je opět dáno výškovým profilem trati. Tento výškový profil se projevuje i v teoreticky dosažitelných úsporách energie použitím rekuperačního brzdění u elektrických jednotek, kdy je zejména při jízdě ze Špičáku do Nýrska elektrodynamická brzda poměrně intenzivně využívána k udržování konstantní rychlosti na spádu. Při posuzování vypočtených hodnot spotřeby energie je však potřeba mít na paměti předpoklady uvedené v kap. 3 (plné využití trakčních charakteristik, intenzivní brzdění do zastávek); při volnějších

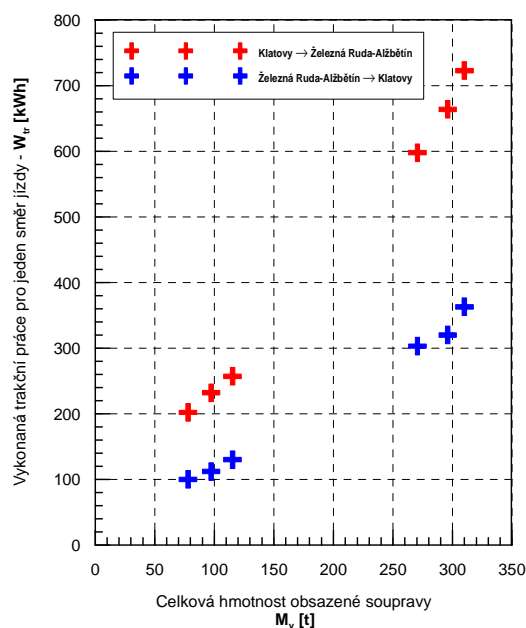
jízdních dobách a větším využití výběhů a příp. i rekuperačního brzdění by spotřeba energie zřejmě mohla být o něco menší.

Tab. 5 - Energetická náročnost vyšetřovaných souprav při jízdě z Klatov do Železné Rudy-Alžbětína

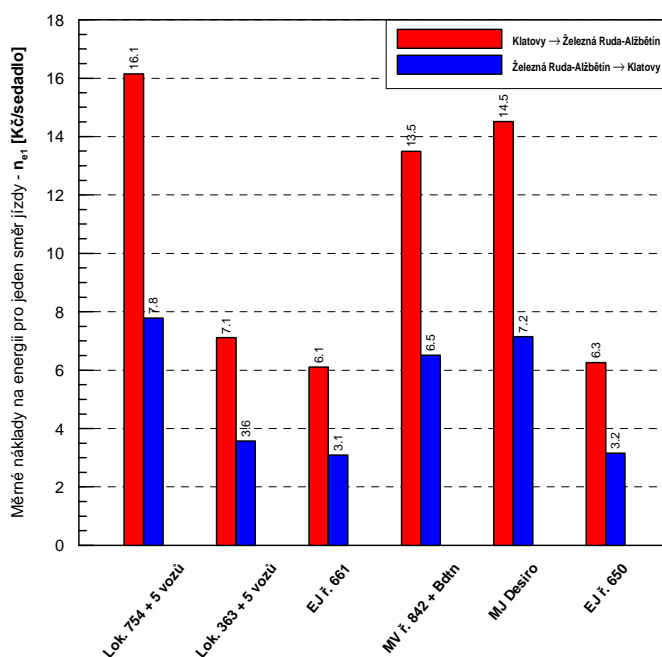
Souprava Veličina	Lok. 754 + 5 vozů	Lok. 363 + 5 vozů	EJ ř. 661 InterPanter	ř. 842 + Bdtn ⁷⁵⁶	MJ Desiro	EJ ř. 650 RegioPanter
Trakční práce	664 kWh	723 kWh	598 kWh	232 kWh	202 kWh	257 kWh
Spotřeba energie	1954 kWh	1033 kWh	854 kWh	683 kWh	595 kWh	367 kWh
Teoretická úspora energie rekuperací	-	-	163 kWh (19 %)	-	-	71 kWh (19 %)
Spotřeba energie po započtení rekuperace	1954 kWh	1033 kWh	691 kWh	683 kWh	595 kWh	296 kWh
Spotřeba motor. nafty	195,4 l	-	-	68,3 l	59,5 l	-
Cena trakční energie	5860 Kč	2580 Kč	2135 Kč	2050 Kč	1785 Kč	920 Kč

Tab. 6 - Energetická náročnost vyšetřovaných souprav při jízdě z Železné Rudy-Alžbětína do Klatov

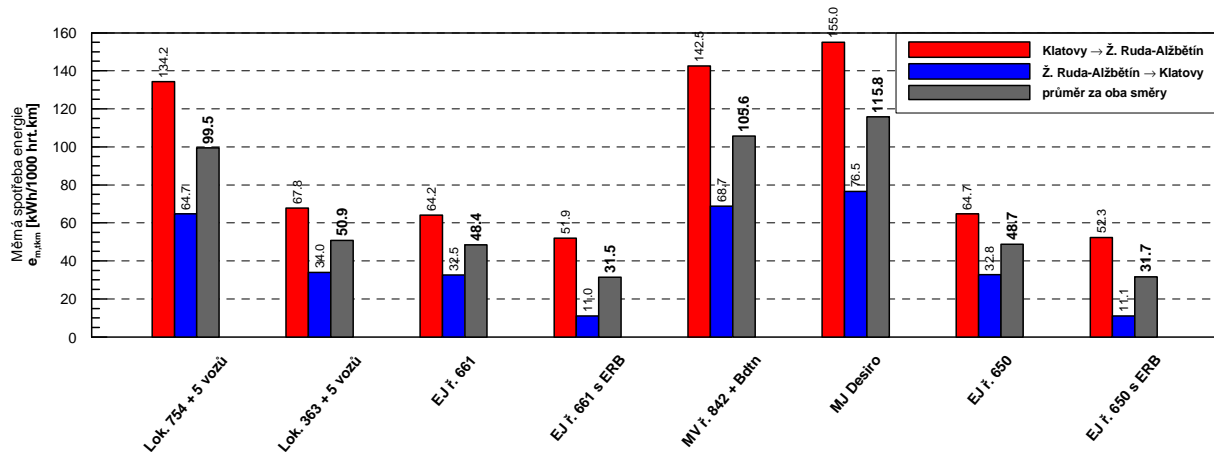
Souprava Veličina	Lok. 754 + 5 vozů	Lok. 363 + 5 vozů	EJ ř. 661 InterPanter	ř. 842 + Bdtn ⁷⁵⁶	MJ Desiro	EJ ř. 650 RegioPanter
Trakční práce	320 kWh	363 kWh	303 kWh	112 kWh	100 kWh	130 kWh
Spotřeba energie	942 kWh	518 kWh	433 kWh	329 kWh	294 kWh	186 kWh
Teoretická úspora energie rekuperací	-	-	287 kWh (66 %)	-	-	123 kWh (66 %)
Spotřeba energie po započtení rekuperace	942 kWh	518 kWh	146 kWh	329 kWh	294 kWh	63 kWh
Spotřeba motor. nafty	94,2 l	-	-	32,9 l	29,4 l	-
Cena trakční energie	2825 Kč	1295 Kč	1080 Kč	990 Kč	880 Kč	465 Kč



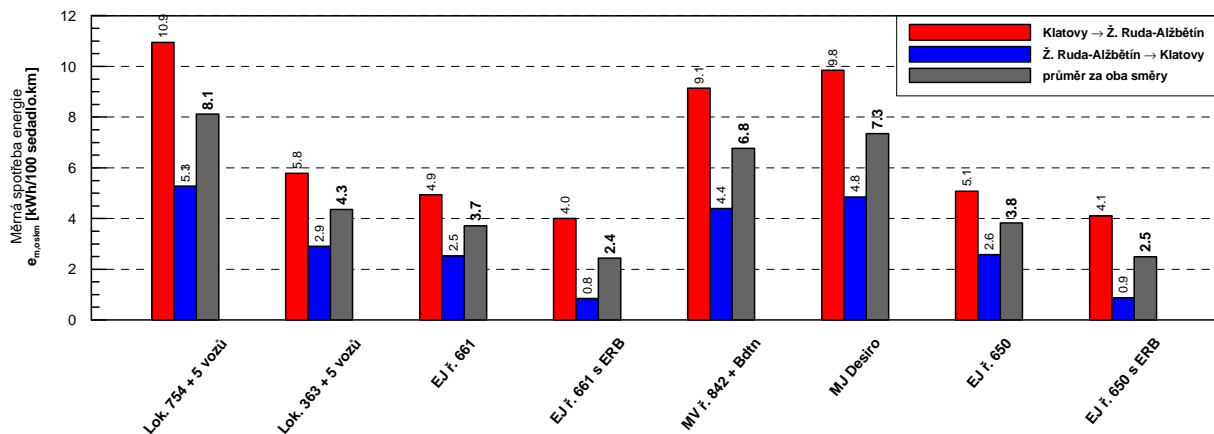
Obr. 16 - Závislost vykonané trakční práce na hmotnosti souprav



Obr. 17 - Náklady na energii na sedadlo pro vyšetřované soupravy v jednotlivých směrech



Obr. 18 - Měrná spotřeba energie vyšetřovaných souprav na dané trati v [kWh/1000 hr.km]



Obr. 19 - Měrná spotřeba na energie vyšetřovaných souprav na dané trati v [kWh/100 os.km]

Při porovnání hodnot vykonané trakční práce vyšetřovaných souprav v jednotlivých směrech se ukazuje, že tato práce je závislá na hmotnosti těchto souprav, což je dobře patrné i v grafu na obr. 16. Při zohlednění účinnosti jednotlivých trakcí se však situace drasticky mění, neboť nízká účinnost motorové trakce de facto znamená, že vykonaná trakční práce představuje přibližně pouhou třetinu celkem spotřebované energie. Tato skutečnost ještě více vynikne, pokud se očekávaná spotřeba energie přepočte na cenu za energii, kdy při uvažovaných jednotkových cenách (viz výše) vychází (tepelná) energie obsažená v naftě asi o 20 % draž než energie elektrická. To je demonstrováno v grafu na obr. 17, ve kterém jsou uvedeny očekávané měrné náklady na energii (uváděné v [Kč/sedadlo]) pro jednotlivé vyšetřované soupravy na jednu jízdu, a to jak pro směr Klatovy–Železná Ruda-Alžbětín, tak pro směr opačný. Kromě toho, že tyto náklady vycházejí (opět vlivem výškového profilu trati) pro směr z Klatov do Železné Rudy-Alžbětína u jednotlivých souprav přibližně dvojnásobné oproti směru opačnému, tak podobná relace platí i v porovnání motorové a elektrické trakce. Měrné náklady na energii (resp. měrná spotřeba energie samotná) jsou tedy za daných podmínek u vyšetřovaných souprav motorové trakce zhruba dvojnásobné oproti vyšetřovaným soupravám trakce elektrické, a to i bez započtení potenciálních úspor dosažitelných rekuperačním brzděním. Uvažujeme-li součtovou hodnotu ceny za energii vztahenou na sedadlo pro celý obrat soupravy z Klatov do Železné Rudy-Alžbětína a zpět, vychází pro vlaky motorové trakce hodnoty v rozmezí 20 až 24 Kč,

zatímco pro vlaky elektrické trakce je to jen 8,50 až 11 Kč. V obou případech vychází vyšší hodnota pro soupravu taženou lokomotivou, což má přímou souvislost s vyšší průměrnou hmotností na sedadlo (viz tab. 1).

Závěrem tohoto posuzování energetické náročnosti vyšetřovaných souprav při jízdě na dané trati byla ještě očekávaná spotřeba energie vztažena na přepravní výkon, který je udáván buď v [(hr)t.km], což je běžné zejména v nákladní dopravě, avšak pro porovnání jsou příslušné hodnoty uvedeny i zde, anebo v [os.km] – za předpokladu 100% obsazení míst k sezení tedy de facto v jednotkách [sedadlo.km]. Výsledky tohoto porovnání jsou znázorněny v grafech na obr. 18 a obr. 19. Uvedeny jsou přitom zvláště hodnoty pro jednotlivé směry jízdy, ale také hodnota průměrná; v případě elektrických jednotek jsou uvedeny jak hodnoty bez uvažování rekuperace, tak i hodnoty po odečtení teoretických energetických úspor získaných rekuperací. Porovnání průměrných hodnot opět potvrzuje skutečnost, že soupravy v nezávislé trakci vykazují zhruba dvojnásobnou měrnou spotřebu energie oproti vlakům trakce závislé. Dále je také zřejmé, že využití rekuperačního elektrodynamického brzdění představuje u elektrických jednotek potenciál dosáhnout až 35% úsporu energie.

Závěr

Výsledky trakčních výpočtů prezentovaných v tomto článku lze využít k posouzení vlivu případné elektrifikace trati Klatovy–Železná Ruda–Alžbětín na jízdní doby a na spotřebu energie, tedy na posouzení vlivu elektrifikace čistě z hlediska provozního. Z tohoto úhlu pohledu se elektrifikace trati jeví jako jednoznačně prospěšná, neboť umožňuje v případě nasazení příslušných vozidel dosáhnout jak kratších jízdních dob, tak i podstatného snížení spotřeby trakční energie, a tedy i provozních nákladů. Vzhledem k výškovému profilu trati se zde jeví jako velmi výhodné nasazení vozidel s rekuperační elektrodynamickou brzdou, díky které lze docílit další úspory trakční energie (teoreticky až zhruba třetinu) a zároveň snížit opotřebení součástí třecích brzd při brzdění na dlouhých spádech za účelem udržení konstantní rychlosti jízdy.

Srovnatelných jízdních dob jako v případě nasazení uvažovaných souprav elektrické trakce je sice možné dosáhnout i s využitím moderních motorových jednotek, avšak jen za cenu zachování poměrně vysoké spotřeby energie. V této souvislosti stojí též za zmínku, že zde hodnocená jednotka Siemens Desiro Classic patří mezi poměrně lehká vozidla a např. při nasazení motorových jednotek typu Pesa Link II (ř. 844 ČD „RegioShark“) je za stejných podmínek možné předpokládat nezanedbatelně vyšší spotřebu paliva, neboť tato jednotka disponuje při prakticky stejné obsaditelnosti (120 míst k sezení) jednak vyšším trakčním výkonem (780 kW, resp. 9 kW/t), ale zejména vyšší hmotností, a to jak v absolutním vyjádření (86,4 t, tj. zhruba o 10 % více oproti jednotce Desiro), tak i ve vztahu k počtu míst k sezení (více než 700 kg na sedadlo, což je hodnota charakteristická spíše pro elektrické jednotky).

Jedním ze zajímavých závěrů je zjištění, že soupravy, které jsou na vyšetřované trati nasazovány v současné době, nedokáží vlivem svých nedostatečných trakčních parametrů v některých úsecích náležitě využít rychlostní profil trati, jenž byl v rámci nedávno proběhlé modernizace optimalizován. To je nejlépe patrné z dráhového tachogramu soupravy pěti osobních vozů tažené lokomotivou ř. 754 ČD (viz obr. 14)

v úseku Nýrsko–Špičák. Přitom stojí za zmínku, že jedním z cílů modernizace trati bylo umožnit vlakům dosahovat v úseku Nýrsko–Špičák jízdní dobu 30 minut. To je sice nyní v principu možné, ale jen za předpokladu nasazení souprav s dostatečným trakčním výkonem. Sečtením příslušných dílčích jízdních dob v tab. 2 lze totiž u výše zmíněné (nejpomalejší) soupravy dojít v tomto úseku k hodnotě 29 min. a 53 s, a to bez započtení doby pobytu vlaku ve stanicích a zastávkách.

Je samozřejmé, že o (ne)výhodnosti elektrifikace nerozhodují jen provozní hlediska, v tomto případě tedy především úspory trakční energie plynoucí z nasazení vozidel elektrické trakce, ale též další faktory, kterými jsou zde zejména investiční náročnost samotné elektrifikace, využitelnost výhod vyplývajících z elektrické vozby s ohledem na celkový provozní koncept na dané trati, v případě požadavku na nasazení nových vozidel vyšší pořizovací cena elektrických jednotek oproti jednotkám motorovým, dále výrazně nižší údržbová náročnost nových elektrických jednotek oproti vozidlům motorové trakce, ale také finanční náročnost případných alternativních řešení apod. Přestože takovéto komplexní posouzení není předmětem tohoto článku, je možné na základě vypočtených hodnot spotřeby energie alespoň odhadnout úsporu nákladů na energii při případném přechodu z motorové trakce na trakci elektrickou. Budeme-li pro jednoduchost předpokládat na trati provoz 10 párů vlaků denně v celé trase, z toho 5 párů o kapacitě zhruba 350 sedících cestujících (souprava 5 vozů vedená lokomotivou ř. 754 ČD vs. pětivozová elektrická jednotka „InterPanter“) a 5 párů o kapacitě cca 150 sedících cestujících (motorový vůz ř. 842 s přípojným vozem vs. dvouvozová elektrická jednotka „RegioPanter“), vychází při uvažovaných cenách (viz tab. 5 a tab. 6 v kap. 4) a bez započítání vlivu rekuperace denní úspora nákladů na trakční energii ve výši 35 625 Kč, tedy zhruba 13 milionů Kč za rok. Alternativním řešením může být nasazení hybridních vozidel, která na neelektrifikovaných tratích využívají elektrickou energii uloženou v bateriích. Je ovšem otázkou, jak drahé by vozidlo vybavené bateriemi potřebné velikosti bylo a jakou by měly použité baterie životnost. Lze též předpokládat, že při dnešním stavu techniky by baterie, které by disponovaly kapacitou alespoň 1 MWh, která je přibližně potřebná pro jeden obrát pětivozové elektrické jednotky na vyšetřované trati, vážily několik tun.

Literatura

- [1] POHL, J. *Bezemisní železnice*. [on-line] In: Konference TOP EXPO CZ – Trendy evropské dopravy. Praha, 16. 6. 2016.
URL: <http://readgur.com/doc/1530933/pohl-jiří---top> [cit. 2016-07-09].
- [2] KRAUS, T. *Do Železné Rudy již brzy pod trolejí*. [on-line] In: ŽelPage, 10. 8. 2009. URL: <http://www.zelpage.cz/zpravy/7305?lang=cs> [cit. 2016-07-09].
- [3] ŠLAPÁK, J. *Posouzení vlivu elektrifikace trati Klatovy–Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie*. Bakalářská práce, 72 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2016.
- [4] FMD: ČSD V7 – Příloha 5. *Trakční charakteristiky a vozidlové odpory*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1982.
- [5] POHL, J. *Desiro Classic*. In: *Dráha*, 8/2003, s. 21–24. ISSN 1211-1260.
- [6] *Nařízení Komise (EU) č. 1302/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii*. Brusel: Evropská komise, 2014.

- [7] KRÁLÍK, P. *Vozidlový odpor současných kolejových vozidel*. Bakalářská práce, 53 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, 2014.
- [8] ZELENKA, J. – MICHÁLEK, T. – KOHOUT, M. *Mechanika dopravy*. Studijní opora, 1. vydání, 78 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, 2013. ISBN 978-80-7395-739-1.

Praha, srpen 2016

Lektorovali: Ing. Alois Kotrba, Ph.D.
České dráhy, a. s.,
Depo kolejových vozidel Brno

prof. Ing. Vlastislav Mojžíš, CSc.
Univerzita Pardubice,
Dopavní fakulta Jana Pernera