

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Trakční vlastnosti lokomotivy s velkým instalovaným
výkonem**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin VINTR**
Osobní číslo: **E15N0080P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Trakční vlastnosti lokomotivy s velkým instalovaným výkonem**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce je zaměřena na porovnání trakčních vlastností vozidla s velkým instalovaným výkonem ("pohon nové generace") a standardního trakčního vozidla - tj. porovnat současnou lokomotivu o výkonu 6 MW (resp. 3 MW) a "novou" lokomotivu o výkonu 9 MW (a více). Diplomová práce bude obsahovat tyto body:

1. Nakreslete a popište vzorové trakční charakteristiky uvažovaných vozidel.
2. Na vhodně zvolených příkladech demonstруйте rozdílné chování vlaku vedených těmito vozidly (tj. pro danou zátěž a daný sklon tratě proveďte porovnání jejich dob a ujeté vzdálenosti pro akceleraci).
3. Pro vhodně zvolené příklady demonstруйте časovou úsporu na jízdní době při srovnání těchto trakčních vozidel.
4. Diskutujte dosažené výsledky z dalších hledisek (vliv pomocných pohonů, možnost krátkodobého přetěžování pohonu, aplikace výsledků na vozidla lehké trakce).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pittermann, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Diplomová práce si dává za úkol porovnat klasické vyráběné lokomotivy o výkonu 3MW a 6MW a jejich jízdní výkony s teoretickou lokomotivou o výrazně větším instalovaném výkonu a následně tyto rozdíly prezentovat. Dále diskutuje smysluplnost tohoto zvýšení výkonu zejména ve vztahu k tuzemským tratím.

Klíčová slova

Elektrická lokomotiva, instalovaný výkon, trakční charakteristika, tažná síla, rychlost, zrychlení, doba jízdy

Abstract

The aim of this thesis is to compare classical locomotives with 3MW or 6MW of installed power and their running performance to a theoretical new generation locomotive with a larger installed power and to present differences between them. It also discusses if it makes sense to build such a locomotive, especially with the Czech railtracks in mind.

Key words

Electric locomotive, installed power, traction characteristics, tractive force, velocity, acceleration, running time

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2017

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Pittermanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
1 SOUČASNÝ STAV ŽELEZNIČNÍHO PROVOZU V ČR	3
1.1 LOKOMOTIVA ŠKODA 69E	4
1.2 LOKOMOTIVA ŠKODA 109E	6
2 LOKOMOTIVA S VELKÝM INSTALOVANÝM VÝKONEM	8
2.1 TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKA TAŽNÉHO VOZIDLA	8
3 DYNAMIKA TRAKČNÍHO POHONU	9
3.1 JÍZDNÍ REŽIMY TRAKČNÍHO VOZIDLA	10
3.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ PROTI POHYBU VOZIDLA	11
3.2.1 <i>Vozidlové odpory</i>	12
3.2.2 <i>Traťové odpory</i>	14
3.2.3 <i>Výsledná síla působící proti pohybu vlaku</i>	15
3.3 POHYBOVÁ ROVNICE VLAKU	16
3.3.1 <i>Rotující hmoty vlaku</i>	16
3.3.2 <i>Odvození pohybové rovnice vlaku</i>	17
3.3.3 <i>Adheze</i>	17
4 LOKOMOTIVA S VELKÝM INSTALOVANÝM VÝKONEM	19
4.1 VLIV JÍZDNÍCH ODPORŮ NA TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKU	20
4.2 VZOROVÉ TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY LOKOMOTIV O VÝKONU 9 A 12MW	21
4.2.1 <i>Lokomotiva s instalovaným výkonem 9MW</i>	21
4.2.2 <i>Lokomotivy s instalovaným výkonem 12MW</i>	22
4.3 VYBRANÉ VLAKOVÉ SOUPRAVY	24
4.3.1 <i>IC 513 Opava</i>	24
4.3.2 <i>EC 173 Hungaria</i>	25
4.3.3 <i>EC 282 Slovenská strela</i>	26
4.3.4 <i>EN 442 Bohemia</i>	27
4.4 JÍZDNÍ ODPORY VYBRANÝCH VLAKOVÝCH SOUPRAV.....	28
4.4.1 <i>Porovnání s lokomotivami Škoda</i>	29
4.5 TRAŤOVÉ ÚSEKY VYBRANÉ PRO SIMULACI	30
4.5.1 <i>Traťový úsek Chlumčany - Přeštice</i>	31
4.5.2 <i>Traťový úsek Zelená Lhota - Hojsova stráž</i>	31
4.5.3 <i>Traťový úsek Špičák - Železná Ruda, město</i>	31

4.5.4	<i>Fiktivní traťový úsek</i>	32
5	SIMULACE JÍZDY VLAKŮ A POROVNÁNÍ JÍZDNÍCH DOB	32
5.1	TRAKČNÍ VLASTNOSTI PŘI AKCELERACI	34
5.1.1	<i>Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží IC 513 Opava (351t)</i>	34
5.1.2	<i>Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EC 272 Slovenská strela (446t)</i>	35
5.1.3	<i>Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EC 173 Hungaria(484t)</i>	37
5.1.4	<i>Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EN 442 Bohemia(655t)</i>	38
5.2	POROVNÁNÍ JÍZDNÍCH DOB UVAŽOVANÝCH LOKOMOTIV	39
5.2.1	<i>Jízdní doby lokomotiv se zátěží IC 513 Opava</i>	40
5.2.2	<i>Jízdní doby lokomotiv se zátěží EC 272 Slovenská strela</i>	41
5.2.3	<i>Jízdní doby lokomotiv se zátěží EC 173 Hungaria</i>	42
5.2.4	<i>Jízdní doby lokomotiv se zátěží EN 442 Bohemia</i>	43
6	ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ	45
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48

Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na porovnání trakčních vlastností lokomotiv Škoda 69E a Škoda 109E vzhledem k jejich instalovanému výkonu a dále je srovnává s fiktivní lokomotivou nové generace o větším instalovaném výkonu.

Text je rozdělen do několika částí; první část popisuje parametry současných lokomotiv Škoda 69E a Škoda 109E. Druhá a třetí část popisují trakční charakteristiky a dynamiku trakčních vozidel. Čtvrtá část se zabývá parametry uvažovaných fiktivních lokomotiv nové generace o výkonu 9MW a 12MW, pátá část popisuje parametry vzorových vlakových zátěží a traťových úseků užitých pro porovnávání vlastností lokomotiv a poslední část se věnuje výsledkům simulace a porovnání trakčních vlastností uvažovaných lokomotiv, společně s úvahou nad dalšími možnostmi pohonu a smysluplnosti uvažované koncepce.

Seznam symbolů a zkratk

ČD.....	České dráhy
ČSD	Československé státní dráhy
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
ZSSK	Železničná spoločnosť Slovensko
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
DB.....	Deutsche Bahn
ř.....	řada (označení vozidla ČD dle mezinárodních ustanovení)
ss	stejnoseměrná napájecí soustava
P	výkon (W)
F.....	síla (N)
v	rychlost (m/s)
V	rychlost (km/h)
a	zrychlení (m/s^2)
o	měrný jízdní odpor (N/kN)
O	odporová síla (N)
m.....	hmotnost (t)
R	poloměr (m)
G	tíhová síla (N)
ξ	koeficient rotačních hmot (-)
μ	koeficient adheze (-), příp. (N/kN)
ε	koeficient využití adheze (-)
η	účinnost (-), příp. (%)

1 Současný stav železničního provozu v ČR

Jakékoliv myšlenky na změnu stavu vozového parku a zejména pak konstrukce lokomotiv by měly vždy být předcházeny analýzou současného stavu a posouzení jeho uspokojivosti. Proto se první kapitola zabývá současným stavem vozového parku ČD a tratí na území České republiky, přičemž situaci poměrně nedávno změnilo rozhodnutí vlády o plánované výstavbě rychlodráhy.

Na území České republiky se momentálně nejčastěji vyskytují lokomotivy tzv. druhé generace – lokomotivy s plynulou regulací stejnosměrných cize buzených motorů – a nejnovější lokomotivy tzv. třetí generace s asynchronními motory reprezentované zejména lokomotivou Škoda 109E, rychlíkovou jednotkou Škoda 7Ev RegioPanter, InterPanter a vysokorychlostními náklápečnými jednotkami Pendolino. Ty jsou však z celkového přehledu poměrně v menšině, jelikož většinu výkonů zajišťují právě lokomotivy druhé generace řad 163, 362 a 363. Zahrneme-li do tohoto pohledu ještě společnost ČD Cargo, jež je hlavním provozovatelem nákladní dopravy na našem území, zjistíme, že zde mají velký podíl dokonce ještě lokomotivy první generace, často staré 50 let.

Tratě v České republice umožňují většinou rychlosti od 80 do 120km/h, na určitých úsecích až 160km/h. Zdálo by se tedy, že současný vozový park svými výkony pro tyto traťové podmínky dostačuje. Faktem však je, že patří mezi nejstarší v Evropě, zejména lokomotivy 69E jsou na hranici životnosti, a navíc zcela nedávno při společném jednání s německými představiteli bylo rozhodnuto o výstavbě rychlodráhy směrem Praha – Drážďany a Praha – Brno – Ostrava. Nabízí se tedy možnost zmodernizovat vozový park ČD ve chvíli, kdy to jeho aktuální stav vyžaduje (nebo minimálně rekonstrukci stávajících vozidel) a zároveň zařazení nových vozidel, která by mohla splňovat parametry požadované pro provoz zejména rychlíkových souprav po nové rychlodráze. A jednou z variant, jak provozovat vlaky s kratšími jízdními dobami, která zde dále bude diskutována, je varianta konstrukce lokomotivy s vyšším instalovaným výkonem, než je nyní běžné. Tato hodnota se zhruba pohybuje okolo 6 000kW a lokomotivy s takovýmto výkonem dnes vyrábí jak Škoda Transportation a.s., tak i zahraniční společnosti jako např. Siemens.

Instalovaný výkon zde uvažované lokomotivy bude 9 000kW a pro porovnání zde budou uvedeny ještě parametry dvou nejčastěji užívaných rychlíkových lokomotiv Škoda 69E a Škoda 109E.

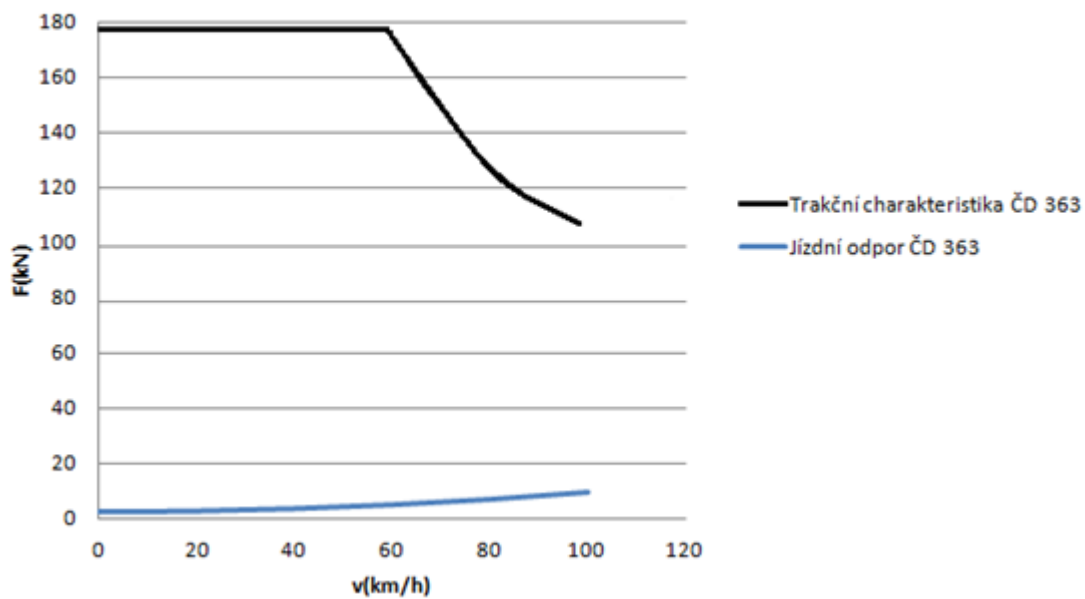
1.1 Lokomotiva Škoda 69E

Lokomotiva Škoda 69E, v ČD původně označovaná jako ES 499.1, později dle standardu UIC jako ř. 363 spatřila světlo světa v roce 1980 a stala se první více systémovou lokomotivou s plynulou (polovodičovou) regulací. Lokomotiva má dva dvounápravové podvozky a celkem čtyři trakční motory (tedy pro každé dvojkolí jeden). Těmito motory jsou stejnosměrné cize buzené motory Škoda AI 4542 FiR. Ty jsou řízené na svoji dobu velice moderními tyristorovými pulzními měniči, přičemž pro provoz na střídavé síti byla lokomotiva vybavena ještě trakčním usměrňovačem. Řízení těchto výkonových prvků bylo zajištěno elektronickými analogovými logickými obvody. Lokomotiva je schopná provozu s manuálním či automatickým ovládním (Automatická regulace rychlosti).

Maximální výkon lokomotivy je na síti 3kV SS 3 480kW a na síti 25kV/50Hz 3 060kW. Trvalá tažná síla dosahuje hodnoty 176,5kN, krátkodobě může dosáhnout až 300kN. Hmotnost lokomotivy je 87 tun. Maximální rychlost činí 120km/h. Později byly některé vozy vybaveny jinými převody, takže dosahují rychlosti 140km/h. Ty byly označeny jako ČD ř. 362.

Výroba však začala až v roce 1984 a do roku 1990 vzniklo 191 kusů. Nyní často více jak třicet let staré stroje tvoří základní kámen vozového parku ČD pro rychlíkové soupravy a vozy se nachází ve stavu, kdy vyžadují důkladnou rekonstrukci. V důsledku toho vzniká nedostatek vozidel schopných provozu na tratích, kde se stýkají obě napájecí soustavy, a tak se často stává, že jejich úlohu provozu na střídavých tratích přebírají ještě starší lokomotivy ř. 242. Jedním z důvodů tohoto stavu je též nedostatek vyrobených kusů nástupce ř. 363, typu 109E (ř. 380), jenž na sebe navíc nechal velice dlouho čekat.

Charakteristika vozidla ČD 363



Obr. 1.1. Trakční charakteristika lokomotivy řady ČD363



Obr. 1.2. Prototyp lokomotivy ES 499.1001 (1980). Nyní zařazen do provozu jako ř. 362.001.[1]

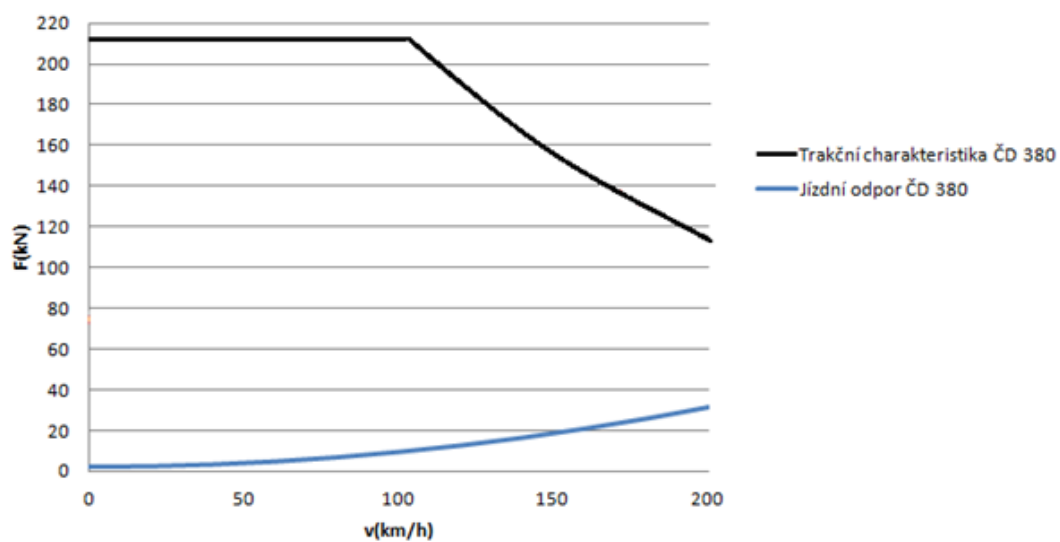
1.2 Lokomotiva Škoda 109E

Lokomotiva Škoda 109E v současnosti představuje tzv. třetí generaci lokomotiv, která používá moderních polovodičových prvků a asynchronních motorů a na tratích se poprvé objevila v roce 2009. V provedení pro ČD (ř. 380) a ZSSK (ř. 381) se jedná o třísystémovou lokomotivu, která tedy kromě domácích systémů 3kV ss a 25kV/50Hz zvládá též provoz na systému 15kV/16,7Hz, jenž se vyskytuje v Německu a Rakousku a zčásti též u nás. Jedná se opět o čtyřnápravovou lokomotivu s dvěma podvozky, přičemž každá náprava má opět vlastní motor Škoda ML 4550 K/6. Jedná se o motor zvláštní konstrukce, jelikož jeho statorové vinutí je zapojeno do tzv. dvojité hvězdy, což je řešení typické pro Škodu (bylo užito např. i u elektrické jednotky ř. 471 *City Elephant*). V souladu s vývojem polovodičové techniky a požadavky na co nejmenší negativní vlivy na napájecí síť využívá lokomotiva pulzních usměrňovačů napěťového typu (anglicky *Active rectifier*, německy a škodovácky *Vierkvadrant*). Tyto měniče využívají nejmodernějších součástek IGBT. Řízení celé lokomotivy je plně mikroprocesorové.

Na všech napájecích systémech lokomotiva dokáže vyvinout maximální výkon 7 200kW, při stálém zatížení 6 400kW, což je oproti předchozí lokomotivě 69E dvojnásobek. Maximální tažná síla dosahuje hodnoty 274kN, stálá tažná síla při rychlosti 102km/h činí 213kN. Lokomotiva váží 87,6 tuny a dosahuje maximální rychlosti 200km/h.

Lokomotiva 109E své předchůdce přesvědčivě poráží ve všech důležitých parametrech. Přesto se však nestala kýženým nástupcem dosavadních lokomotiv. ČD objednaly 20 kusů těchto lokomotiv s termínem dodání 2009, avšak vývoj lokomotivy se zpozdil a kusy, které dopravci dorazily o rok později, postrádaly jakoukoli certifikaci pro provoz, takže je ČD odmítly převzít. Následně byly všechny potřebné certifikáty vystaveny a ČD lokomotivy převzaly, avšak jejich pozdní dodání bylo předmětem vleklého soudního sporu. Díky tomu tak v současné době moderní lokomotivy chybí a současný stav tak nabízí myšlenku, zda modernizaci neprovést pomocí výkonnějších lokomotiv, které by mohly ušetřit čas a dosahovat větších rychlostí.

Charakteristika vozidla ČD 380



Obr. 1.3. Trakční charakteristika lokomotivy ČD 380



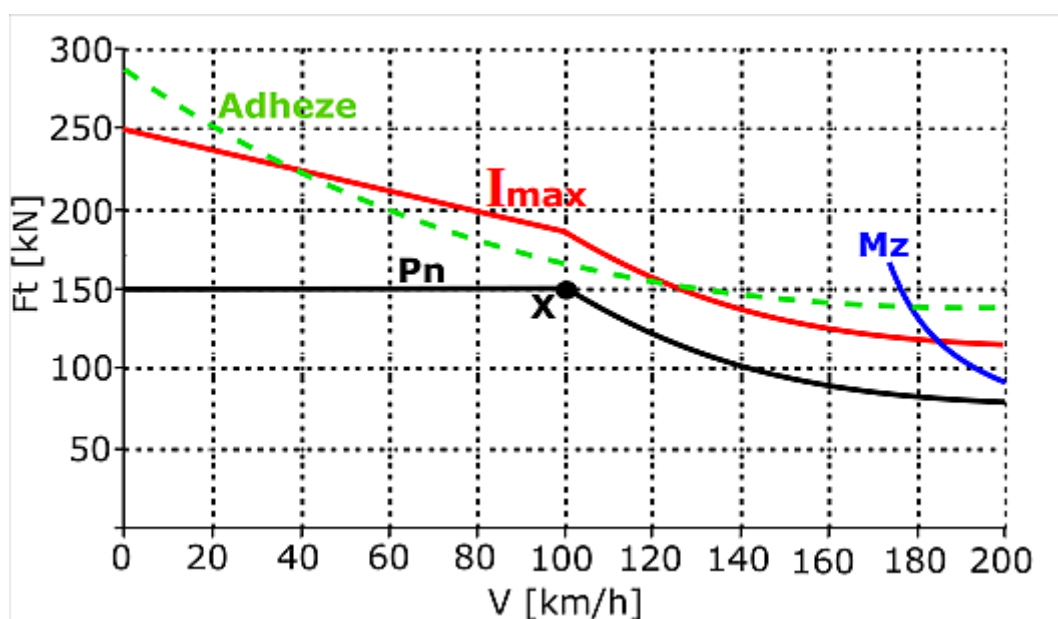
Obr. 1.4. Lokomotiva Škoda 109E, ČD ř. 380.[2]

2 Lokomotiva s velkým instalovaným výkonem

K vysvětlení, proč uvažovat o výrobě a provozu lokomotivy s instalovaným výkonem vyšším, než jakým disponují současné lokomotivy, je nutné znát úmysly za touto úvahou. Vždy platí, že jak dopravce, tak i cestující se chce na místo určení dostat co nejrychleji. Lokomotiva s velkým instalovaným výkonem by tedy teoreticky měla přinést časovou úsporu při jízdě. Její použití se nabízí také v nákladní dopravě, kdy by větší výkon lokomotivy mohl umožnit snazší či rychlejší jízdu nákladního vlaku do různých stoupání, případně by umožnil provozovat těžší nákladní soupravy.

2.1 Trakční charakteristika tažného vozidla

Souvislost mezi instalovaným výkonem lokomotivy, její rychlostí a silou, kterou pro svůj pohyb dokáže lokomotiva vyvinout, je závislost, jež se nazývá *trakční charakteristika*. Jedná se o závislost síly, kterou je vozidlo schopné vyvinout, na rychlosti, kterou se vozidlo pohybuje.



Obr. 2.1. Obecná trakční charakteristika vozidla s asynchronním motorem.[3]

Až do takzvaného jmenovitého bodu vozidla (na obr 2.1. se jedná o bod X), se snažíme udržovat konstantní tahovou sílu postupným zvyšováním frekvence a jmenovitého napětí. To však lze pouze do tohoto bodu, protože zde jsme dosáhli jmenovitého napětí a další zvyšování napětí nepřichází vzhledem ke konstrukci motorů v úvahu. Do jmenovitého bodu charakteristiky se jedná o regulaci na konstantní tahovou sílu. Dále můžeme zvyšovat pouze frekvenci.

Tím motory ztrácejí sílu, která tedy začne postupně se zvyšující se rychlostí klesat. Tento pokles je hyperbolický, protože se zde snažíme regulovat tak, abychom dosáhli konstantního výkonu podle vztahu

$$P = F_t \cdot v = konst. \quad (2.1)$$

Uvedený vztah můžeme upravit do podoby

$$v = \frac{P}{F_t} \quad (2.2)$$

Z toho plyne, že čím větším výkonem lokomotiva disponuje, o to větší rychlost by měla být teoreticky schopna vyvinout. Ze vztahu též vyplývá již zmíněný fakt, že se zvyšující se rychlostí klesá tažná síla vozidla. Ovšem i její velikost je přímo úměrná instalovanému výkonu. Celkovým efektem pak je jev, jenž bude vysvětlen následně v kapitole 4, tedy že větší instalovaný výkon umožní disponovat větší tažnou silou vozidla až do jmenovitého bodu s vyšší rychlostí a následně bude poskytovat takovou výkonovou rezervu, že bude možné dosahovat vyšší rychlosti než u slabších lokomotiv i přes nevyhnutelný pokles tažné síly za jmenovitým bodem. Důležitým faktorem zde jsou takzvané jízdní odpory, neboli soubor sil, které působí proti pohybu vlaku. Právě k jejich překonání je potřebná již zmíněná výkonová rezerva, kterou by nám poskytla lokomotiva s vyšším instalovaným výkonem.

3 Dynamika trakčního pohonu

Aby bylo možné zabývat se a porovnávat jízdní doby lokomotiv či vlakových souprav, je nutné znát teorii pohybu vozidla na trati. V této kapitole tedy bude popsán teoretický základ pro vytvořenou simulaci, pomocí níž byly jízdní doby uvažovaných konfigurací lokomotiv a vlaků posuzovány.

3.1 Jízdní režimy trakčního vozidla

Každé vozidlo na trati se obecně pohybuje v několika definovaných jízdních režimech.

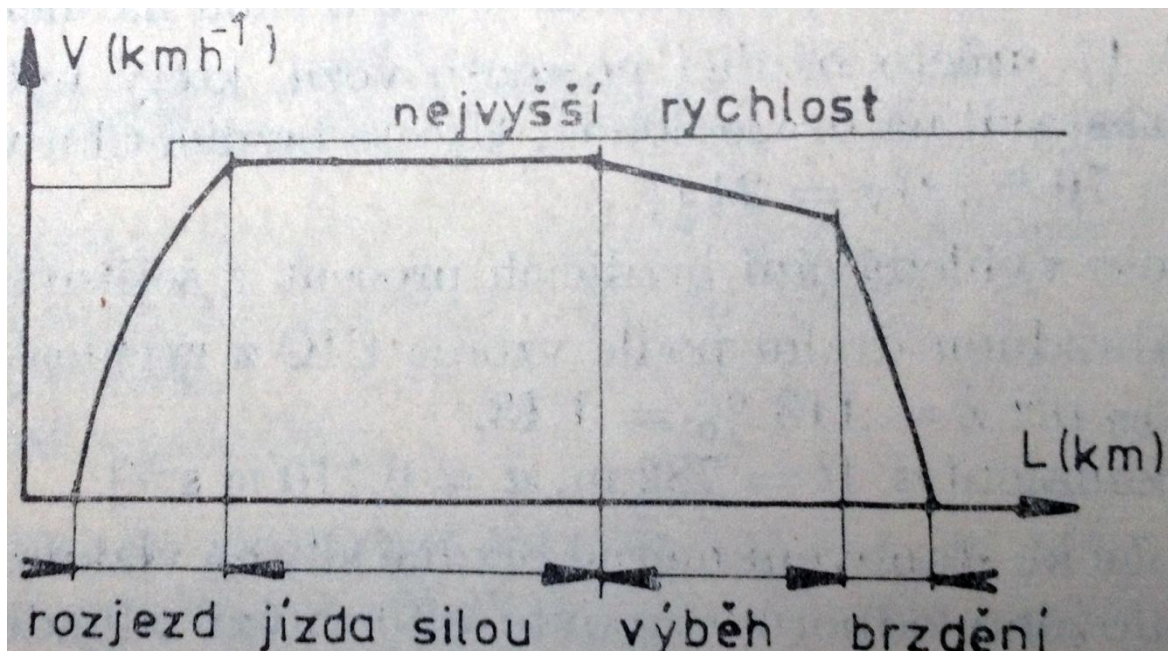
Mezi tyto režimy patří:

1. Rozjezd vozidla ($a > 0$)
2. Jízda silou ($a = 0$)
3. Jízda výběhem ($a < 0$)
4. Brzdění ($a \ll 0$),

kde:

a - zrychlení vozidla / soupravy [m/s^2].

Během jízdy se v závislosti na složení těchto režimů mění i rychlost vozidla v [m/s], ujetá dráha vozidla / soupravy s [m] a zrychlující síla F_a [N]. Závislost změn těchto veličin v průběhu času se často znázorňuje graficky. Výsledkem je takzvaný tachogram jízdy a z uvedeného plyne, že se pro každou jízdu vlaku je vždy odlišný.



Obr. 3.1. Obecný tachogram jízdy [9]

Zjištění průběhu veličin znázorněných v tachogramu se odvozuje od zrychlení, jež je nutné znát. Zrychlení se totiž odvíjí od tažné síly vozidla, kterou zadává strojvedoucí, a je tedy možné jej bez problému určit, známe-li vztah mezi zrychlující silou vozidla a jeho

zrychlením. Průběhy rychlosti a dráhy se poté ze zrychlení následně vypočtou.

Pokud uvažujeme, že vozidlo na trati má určitou hmotnost, vyvíjí určitou sílu ve snaze se pohybovat a tato síla jí uděluje odpovídající zrychlení, nabízí se jako vztah spojující tyto veličiny mezi sebou Newtonův druhý pohybový zákon, jenž zní

$$F = m \cdot a \quad (3.1)$$

kde:

F - síla vyvinutá na těleso

m - hmotnost tělesa

a - zrychlení tělesa

Chceme - li znát zrychlení vozidla a je nám známá urychlující síla F_a vyvíjená vozidlem a jeho hmotnost, lze rovnici (2.1) upravit do tvaru

$$a = \frac{F_a}{m} \quad (3.2)$$

Tato rovnice se stává základem řešení pohybu vozidla po trati. Reálná situace je však komplikovanější a rovnice (2.2) je tak pouze základ výpočtu zrychlení vozidla.

3.2 Síly působící proti pohybu vozidla

Zde přichází na řadu třetí Newtonův pohybový zákon; je - li provedena akce, existuje na ní i reakce, která působí proti původní akci. Vyvine - li tedy vozidlo snahu se pohybovat, okamžitě vzniknou síly, které mu v pohybu brání a jejichž výslednice působí v opačném směru, než síla urychlující pohyb vozidla. Aby bylo možné vozidlo rozjet, je nutné, aby urychlující síla byla větší, než výslednice sil působících proti pohybu vozidla. Platí tedy vztah

$$F_a > O_v \quad (3.3)$$

kde:

F_a - urychlující síla vozidla

O_v - výslednice sil působících proti pohybu vozidla

Do výslednice sil působících proti pohybu vlaku se započítávají takzvané jízdní

odpory. Jsou celkem dva druhy těchto jízdních odporů: odpory vozidlové a odpory traťové.

3.2.1 Vozidlové odpory

Jízdní odpor vozidla jedoucího po trati má tři základní složky, které mají na výslednou odporovou sílu vliv:

- složka respektující valivý pohyb dvojkolí po kolejnici,
- vliv tření ložisek na vozidle,
- odpor vzduchu vozidla.

Vzhledem k této skutečnosti je zjevné, že pro každé vozidlo bude jeho jízdní odpor jedinečný. Stanovení těchto hodnot výpočtem by však bylo velice složité, takže, jako poměrně často v oboru elektrické trakce, jsou zjišťovány vozidlové odpory měřením. Tato měření vychází z předpokladu, respektive skutečnosti, že:

- první složka je konstantní,
- druhá složka je přímo úměrná rychlosti,
- třetí složka je úměrná druhé mocnině rychlosti.

Pro měření se užívá obecného vztahu

$$o_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (3.4)$$

kde:

o_v - měrný vozidlový odpor

a, b, c - konstanty reflektující danou složku odporu

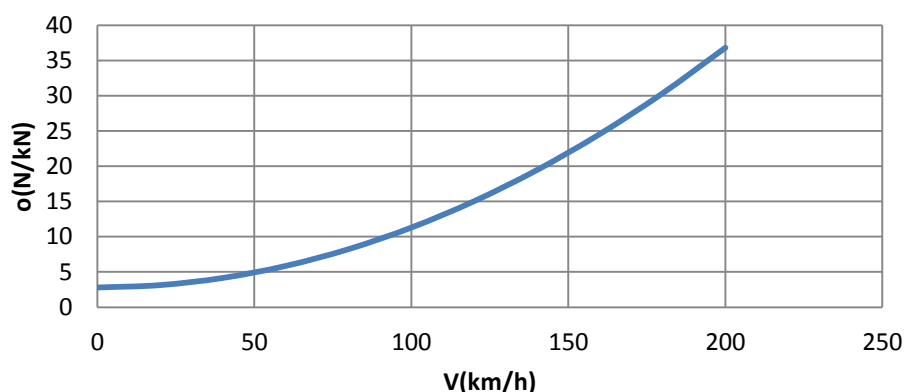
V - rychlost vozidla.

V současnosti na našich tratích vyskytují zásadně lokomotivy s dvěma dvounápravovými podvozky, přičemž každá náprava je hnací. Dřívější šestinápravové lokomotivy se u nás již téměř nevyskytují. Pro klasickou lokomotivu, jíž můžeme tedy v současnosti na našich tratích potkat byl měřením stanoven vztah pro výpočet vozidlového odporu

$$o_v = 2,8 + 0,00085 \cdot V^2 \quad (3.5)$$

Lze tedy usoudit, že vozidlový odpor se při jízdě po trati mění v závislosti na rychlosti, přičemž tato závislost je kvadratická. Jednotkou vozidlového odporu jsou [N/kN].

Jízdní vozidlový odpor čtyřnápravové lokomotivy



Obr. 3.2. Graf vyjadřující závislost vozidlového odporu na rychlosti

Lokomotiva však není jediným vozidlem, jež se pohybuje po trati. Lokomotiva obvykle táhne vagony a ty pochopitelně též mají svůj podíl na vozidlovém odporu. Zde již ovšem mluvíme o vozidlovém odporu vlakových souprav. Jejich empiricky získané vzorce jsou shrnuty v Tab. 3.1.

Typ vozidlového odporu	Souprava vozů	Rovnice vozidlového odporu
R	osobní čtyřnápravové vozy	$o_v = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2$
S	osobní a nákladní vozy	$o_v = 1,9 + 0,000465 \cdot V^2$
M4	osobní čtyřnápravové vozy lehké stavby	$o_v = 1,8 + 0,01 \cdot V + 0,000476 \cdot V^2$
M2	osobní dvounápravové vozy lehké stavby	$o_v = 1,5 + 0,00089 \cdot V^2$
U2	prázdné dvounápravové nákladní vozy	$o_v = 2,0 + 0,00125 \cdot V^2$
U4	prázdné čtyřnápravové nákladní vozy	$o_v = 2,0 + 0,0008 \cdot V^2$
T2	ložené dvounápravové nákladní vozy	$o_v = 1,7 + 0,0033 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$
T4	ložené čtyřnápravové nákladní vozy	$o_v = 1,3 + 0,00033 \cdot V^2$

Tab. 3.1.: Vztahy pro výpočet vozidlových odporů dle typu zátěže.[4]

3.2.2 Traťové odpory

Traťové jízdní odpory se skládají ze dvou složek:

- odpor vznikající při jízdě obloukem,
- odpor vznikající při jízdě do (ze) stoupání.

Zjištění odporu z jízdy obloukem je opět velice složité, jelikož má na jeho hodnotu vliv mnoho okolností a parametrů jak tratě, tak vozidel. Existuje tedy mnoho empiricky zjištěných vztahů, přičemž ČD (dříve ČSD) používají Röcklova vztahu

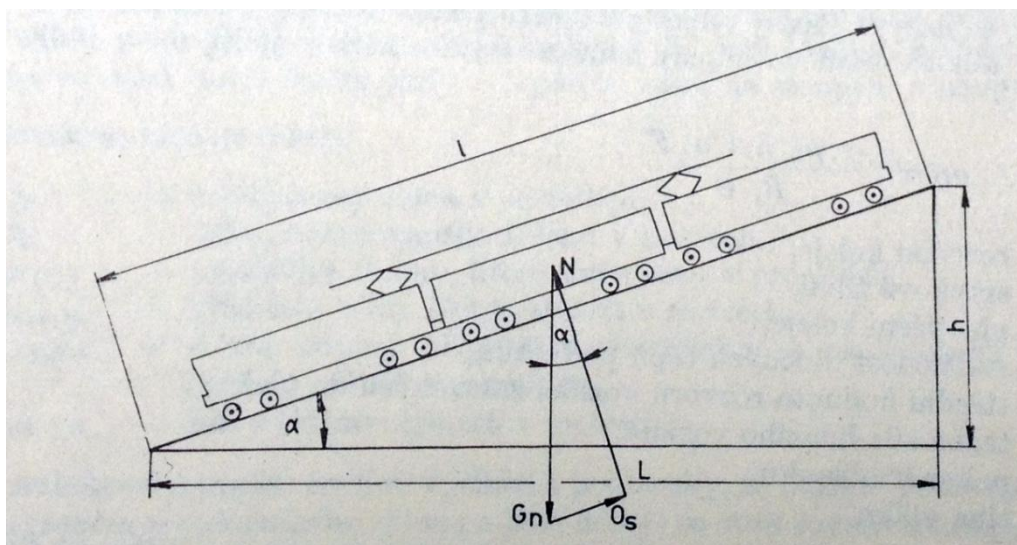
$$o_o = \frac{500}{R-55} \quad (3.6)$$

kde:

R - poloměr oblouku.

Tento vztah platí pro rozchod 1 435mm, jenž naše tratě užívají, a tratě ČD označené jako hlavní, tedy takové, na kterých hlavně můžeme očekávat provoz lokomotiv vlaků většího významu.

Odpor z jízdy do stoupání je dán silami, které na vlak při jízdě do stoupání působí, jak ukazuje obr. 3.3.:



Obr. 3.3. Síly působící na vlak při jízdě do stoupání [5]

Síla G_N je tíhovou silou působící na vlak a vyvolává reakční sílu N , která je kolmá na

rovinu tratě. Složka O_s působí v rovině trati a při jízdě do stoupání vlak zpomaluje, při jízdě ze spádu naopak vlak urychluje.

Pokud budeme uvažovat tíhovou sílu v kN a odporovou sílu v N, dostaneme dle obrázku vztah

$$O_s = 1000G \cdot \sin(\alpha) \quad (3.7)$$

Pokud budeme chtít výslednou odporovou sílu z jízdy do stoupání vyjádřit v N/kN, jako ostatní jízdní odpory, dostaneme vztah

$$o_s = \frac{O_s}{G} = 1000 \sin(\alpha) \quad (3.8)$$

Na tratích ČD je obvyklé při popisu trati vyjadřovat sklon v promilích a značit jej s . Dle obrázku výše též platí

$$s = \frac{h}{1} \cdot 1000 = 1000 \sin(\alpha) \quad (3.9)$$

Z toho vyplývá, že velikost sklonu v promilích odpovídá nivelačnímu převýšení trati h v metrech, uvažujeme - li úsek dlouhý 1 000 metrů. Zároveň ze srovnání rovnic (3.9) a (3.10) vidíme, že měrný odpor ze stoupání v N/kN se rovná vyjádření stoupání v promilích. Pro výpočet odporu z jízdy do stoupání se tak používá jednoduchý vztah

$$o_s = s \quad (3.10)$$

Pro zjednodušení výsledné rovnice pro výpočet zrychlení vlaku se zavádí takzvaný redukovaný sklon. Ten vznikne prostým sloučením hodnoty odporu z jízdy obloukem a odporu z jízdy do stoupání, platí tedy

$$o_{s \text{ red.}} = o_o + o_s \quad (3.11)$$

Znaménko odporu z jízdy do stoupání je dáno faktem, zda vlak jede do stoupání (pak je kladné), či jede ze spádu (pak je záporné).

3.2.3 Výsledná síla působící proti pohybu vlaku

Chceme - li ze získaných hodnot vozidlových či traťových odporů získat velikost příslušné odporové síly, je nutné daný odpor ještě násobit tíhou daného vozidla či soupravy.

Protože vozidlové odpory jsou různé pro lokomotivu a vagony, počítá se odporová síla vždy pro daný celek zvlášť dle vztahů

$$O_{vl} = o_{vl} \cdot G_l \quad (3.12)$$

$$O_{vv} = o_{vv} \cdot G_v \quad (3.13)$$

kde:

index l značí lokomotivu, index v značí vagonovou soupravu,

o_v - daný vozidlový odpor,

$G_{l/v}$ - tíha lokomotivy/vagonové soupravy (kdy $G_{l/v} = m_{l/v} \cdot g$)

Odporová síla z redukovaného sklonu se pak spočítá analogicky jako

$$O_{sl} = o_{s\ red.} \cdot G_l \quad (3.14)$$

$$O_{sv} = o_{s\ red.} \cdot G_v \quad (3.15)$$

3.3 Pohybová rovnice vlaku

3.3.1 Rotující hmoty vlaku

Ze vztahu (3.2) vyplývá, že zrychlení vlaku závisí od síly, která vlak urychluje, a jeho hmotnosti. Zjistili jsme, že tato síla je menší o velikost odporových sil, které na vlak působí. Bylo by tedy možné již sestavit podrobnou pohybovou rovnici vlaku a vyjádřit z ní zrychlení. Avšak je zde ještě jeden činitel, který má na toto zrychlení vliv, a to je účinek rotujících hmot vlaku. Vlak jako celek se pohybuje postupným, nebo též translačním pohybem. Jeho součástí jsou však i komponenty, které kromě toho, že se posunují s vlakem, vykonávají také pohyb rotační (dvojkolí, rotory elektrických motorů apod.). Vydeme-li ze vztahu 3.1, víme, že síla F udělí hmotě m určité zrychlení a . Pokud však tato hmota rotuje, je toto zrychlení pro její postupný pohyb menší, než kdyby nerotovala. Proto každou hmotnost v pohybové rovnici vlaku musíme ještě zaměnit za takzvanou redukovanou hmotnost, v níž je rotující pohyb součástí vlaku respektován *koeficientem rotujících hmot* ξ . Rovnice 3.2 tedy nabude základní tvar

$$a = \frac{F_a}{m \cdot \xi} \quad (3.16)$$

Opět platí, že výpočtové stanovení tohoto koeficientu je velmi složité a je tedy prováděno měřením. Pro elektrické lokomotivy byl tento koeficient stanoven na 1,2 - 1,3 a u klasických osobních a nákladních vagonů má tento koeficient hodnotu 1,06.

3.3.2 Odvození pohybové rovnice vlaku

Vyděme ze vztahu 3.16. Urychlující síla F_a je již silou, která se vypořádala se všemi odporovými silami, které na vlak působí. Chceme - li tedy znát její velikost, je nutné znát tažnou sílu vozidla F_t a všechny odporové síly. Zároveň do jmenovatele dosadíme redukovanou hmotnost lokomotivy a redukovanou hmotnost vagonů. Vztah 3.16 tedy změní svůj tvar na

$$a = \frac{F_t - O_{vl} - O_{vv} - O_s}{m_l \cdot \xi_l + m_v \cdot \xi_v} \quad (3.17)$$

Získali jsme tedy pohybovou rovnici vlaku. Pokud ještě dosadíme za jednotlivé síly dle předchozích vztahů, získáme pak rovnici

$$a = \frac{F_t - o_{vl} \cdot G_l - o_{vv} \cdot G_v - o_{s \text{ red.}} \cdot (G_l + G_v)}{m_l \cdot \xi_l + m_v \cdot \xi_v} \quad (3.18)$$

Opět platí, že index l značí lokomotivu, index v značí vagonovou soupravu.

3.3.3 Adheze

Zdánlivě bychom nyní mohli přistoupit k výpočtu, z něhož bychom získali zrychlení. Je zde však ještě jeden činitel, který má poměrně velký význam na velikost výsledné tažné síly, která pohybuje vozidlem v požadovaném směru. Tímto činitelem je *adheze*. Adheze se dá popsat jako schopnost přenést co největší sílu vozidla z dvojkolí na kolej a uvést vozidlo do pohybu, aniž by dvojkolí proklouzlo. Tedy nejvyšší síla přenášená z dvojkolí na kolej, než se z valivého pohybu dvojkolí po kolejnici stane skluz. Již jsme urychlující sílu vlaku nazvali F_a . Chceme - li tedy najít maximální sílu, kterou můžeme bez vzniku proklouznutí dvojkolí vyvinout, nazvěme tuto sílu $F_{a \text{ max}}$.

Velikost této síly je potom dána vztahem

$$F_{t \text{ max}} = \mu \cdot \varepsilon \cdot G_a \quad (3.19)$$

kde:

μ - součinitel adheze

G_a - adhezní tíha

ε - koeficient využití adheze (respektování reálné situace, kdy adhezi nikdy nevyužijeme zcela)

Adhezní tíha je ta část tíhy hnacího vozidla, kterou přenáší hnací dvojkolí. U moderních lokomotiv, kdy jsou všechny nápravy hnací, je tak adhezní tíže rovná tíži celé lokomotivy. Můžeme tedy tvrdit, že adhezní tíha je rovná tíže lokomotivy, již jsme ve vztazích 3.13 a 3.15 nazvali G_l . Pokud toto uděláme a zároveň dle vztahu 3.20 dosadíme $F_t = F_{t \max}$, dostaneme ze vztahu 3.19 rovnici

$$a = \frac{\mu \cdot \varepsilon \cdot G_a - o_{vl} \cdot G_a - o_{vv} \cdot G_v - o_{s \text{ red.}} \cdot (G_a + G_v)}{m_l \cdot \xi_l + m_v \cdot \xi_v} \quad (3.20),$$

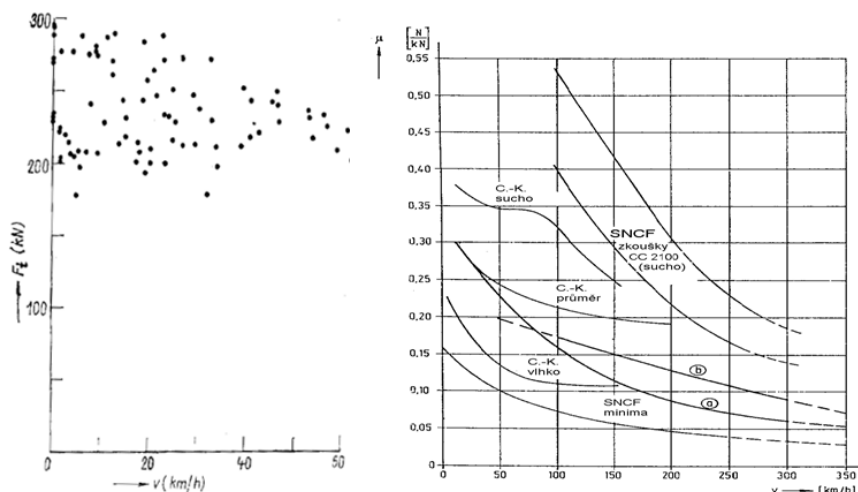
což lze upravit na tvar

$$a = \frac{(\mu \cdot \varepsilon - o_{vl} + o_{s \text{ red.}}) \cdot G_a - (o_{vv} + o_{s \text{ red.}}) \cdot G_v}{m_l \cdot \xi_l + m_v \cdot \xi_v} \quad (3.21)$$

Chceme - li, aby se vlak rozjel, musí být čítec rovnice 3.22 kladný. Řešíme tedy podmínku $(\mu \cdot \varepsilon - o_{vl} + o_{s \text{ red.}}) \cdot G_a - (o_{vv} + o_{s \text{ red.}}) \cdot G_v \geq 0$, z níž po vyjádření G_a dostaneme vztah

$$G_a \geq \frac{(o_{vv} + o_{s \text{ red.}}) \cdot G_v}{(\mu \cdot \varepsilon - o_{vl} - o_{s \text{ red.}})} \quad (3.22)$$

Co se týče samotného stanovení koeficientu adheze, opět se jedná o složitý úkol, jenž byl řešen měřením. Oficiálně uznávaná měření provedli Curtius společně s Knifflerem a nezávisle na nich též další, například zde francouzská železniční společnost SNCF. Na obr. 3.4 jsou vyobrazeny křivky závislosti součinitele adheze v závislosti na rychlosti vozidla dle měření Curtius - Kniffler a dle SNCF. Graf vlevo ukazuje výsledky reálného měření, graf vpravo pak křivky, jež ohraničují výskyt bodů naměřených v grafu vlevo.



Obr. 3.4. Závislost součinitele adheze dle Curtius-Knifflera a SNCF [8]

Naměřené křivky odpovídají empirickým vzorcům

$$\mu = \left(\frac{7\,500}{V+44} + 161 \right) / 1000 \quad (3.23)$$

dle Curtius - Knifflera a

$$\mu = \left(\frac{9\,000}{V+42} + 116 \right) / 1000 \quad (3.24)$$

dle Köthera. V obou případech značí V rychlost.

Křivka omezení adhezí se obvykle zakresluje i do trakčních charakteristik. většinou však obálku trakční charakteristiky neomezuje. Omezení adheze se však v běžném provozu projevuje, zejména pokud je špatné počasí, nebo je nedokonalý styk kolo - kolejnice (rez, nečistoty, listí apod.).

4 Lokomotiva s velkým instalovaným výkonem

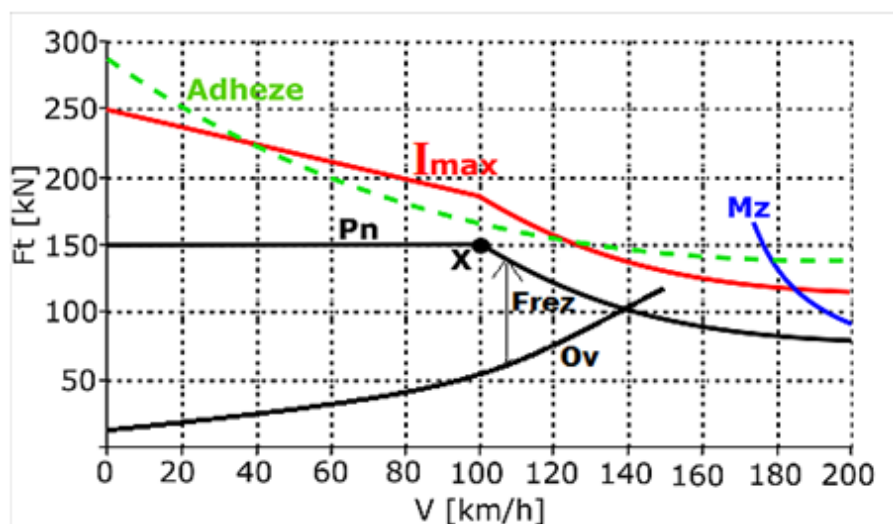
Pro tuto práci bylo zvoleno zadání uvažovat lokomotivu o instalovaném výkonu 9MW, případně více. Budeme - li uvažovat stálé výkony již zmíněných lokomotiv Škoda, lze vyzorovat, že výkon byl navýšen zhruba dvojnásobně. Pokud tedy budeme uvažovat lokomotivu o výkonu 9MW a srovnávat jí se strojem 109E, bude se výkonový rozdíl opět téměř rovnat výkonu jedné lokomotivy z 80. let. Práce tedy bude porovnávat lokomotivy 69E (3,5MW), 109E (6,4MW), lokomotivu s výkonem 9MW a ještě lokomotivu s výkonem 12MW.

Hned zkraje je nutno uvést, že pro případnou produkci lokomotiv s větším instalovaným výkonem by bylo nutné výrazně změnit koncepci samotného vozidla. Například trakční motory u lokomotivy 109E, jež se řadí mezi nejvýkonnější sériově

vyráběné lokomotivy, využívá trakčních motorů o jmenovitém výkonu 1,6MW, což při koncepci všech čtyř hnacích náprav znamená právě celkový udávaný jmenovitý výkon lokomotivy 6,4MW. Pokud by tedy nová výkonnější lokomotiva měla kromě vyššího výkonu disponovat i stejným uspořádáním pojezdu, bylo by zcela jistě potřeba výkonnějších motorů. Využití stávajících motorů by bylo možné pouze při použití vícenápravového pojezdu. To je však pro tuzemské trati nevhodné vzhledem k poloměru oblouků a ačkoli lze uvažovat, že v případě vysokorychlostní přepravy by vlaky jezdily po co nejpřímějších tratích, lokomotivy by byly jistě užívány i v nákladní dopravě, která má v mnoha případech i lokální charakter. A právě na lokálních tratích by byl provoz více než čtyřnápravových lokomotiv přinejmenším problémový. A to jak při vynikajícím stavu tratí, tak zejména v současnosti, kdy mají na mnoha tratích v důsledku mizerného technického stavu problém projet i malé motorové soupravy. I dimenzování dalších součástí, jakými jsou například trakční usměrňovač, transformátor, trakční měnič a podobně by musely být nově navrženy, protože ty stávající by z hlediska proudového zatížení již nemusely vyhovovat.

4.1 Vliv jízdních odporů na trakční charakteristiku

Pokud známe trakční charakteristiku tažného vozidla a průběh jízdních odporů, můžeme sloučením obou průběhů zjistit, do jaké rychlosti bude vozidlo schopné pohybu na trati, tedy do jaké rychlosti nevzrostou hodnoty jízdního odporu natolik, že je tažná síla vozidla nedovede překonat. Aby bylo možné vložit do trakční charakteristiky průběh jízdních odporů, je nutné jej vkládat ve stejných jednotkách, v jakých zobrazujeme tažnou sílu, obvykle v kN. K získání hodnot jízdních odporů v kN je nutné je přepočítat na odporové síly dle vzorců (3.13) – (3.16). Následně je možné provést vynesení jejich průběhů v závislosti na rychlosti, přičemž situace umožňující jízdu vozidla po trati je v té části grafu, kdy je křivka trakční charakteristiky výše, než křivka jízdních odporů. Průsečík obou průběhů pak značí rovnováhu tažné síly a jízdních odporů, což může mít dva důsledky. Pokud vozidlo jede po rovině, stačí rovnováha těchto sil na udržování konstantní rychlosti vozidla. Pokud však vozidlo jede do stoupání či oblouku, začne zpomalovat a pokud se podmínky pro jízdu nezlepší, nakonec se zastaví. Při rovnováze obou sil totiž není možná akcelerace. Tu je možné získat pouze tehdy, je – li tažná síla větší, než odporová. Graficky odečtený rozdíl v daném bodě mezi charakteristikami pak vyjadřuje silovou rezervu (F_{rez}), kterou má vozidlo ještě k dispozici pro další zrychlení, či jízdu do vyššího stoupání.



Obr. 4.1. Trakční charakteristika se znázorněním vozidlového odporu a silovou rezervou pro danou rychlost

A právě tato silová rezerva je podstatou úvahy, zda nevyrábět lokomotivy s vyšším instalovaným výkonem. Teoreticky by měly být poté schopné jet po rovině či mírném stoupání vyšší rychlostí či schopné jet do prudšího stoupání, než tomu je u současných lokomotiv.

4.2 Vzorové trakční charakteristiky lokomotiv o výkonu 9 a 12MW

Základem pro výpočet trakční charakteristiky, pokud fyzicky lokomotiva neexistuje a nelze charakteristiku změřit, je údaj o výkonu a rychlosti. Pak se tažná síla vypočte dle vztahu 2.1. Z hlediska instalovaného výkonu je též ještě nutné uvažovat účinnost, jelikož ve všech elektrických zařízeních vznikají ztráty. Pak je použitelný instalovaný výkon vypočten dle vztahu

$$P = \eta \cdot P_{inst} \quad (4.1)$$

Pro tuto práci byla uvažována účinnost lokomotivy pro zjednodušení konstantní (ačkoliv reálně se účinnost mění během změny výkonu apod.) $\eta = 0,9$.

4.2.1 Lokomotiva s instalovaným výkonem 9MW

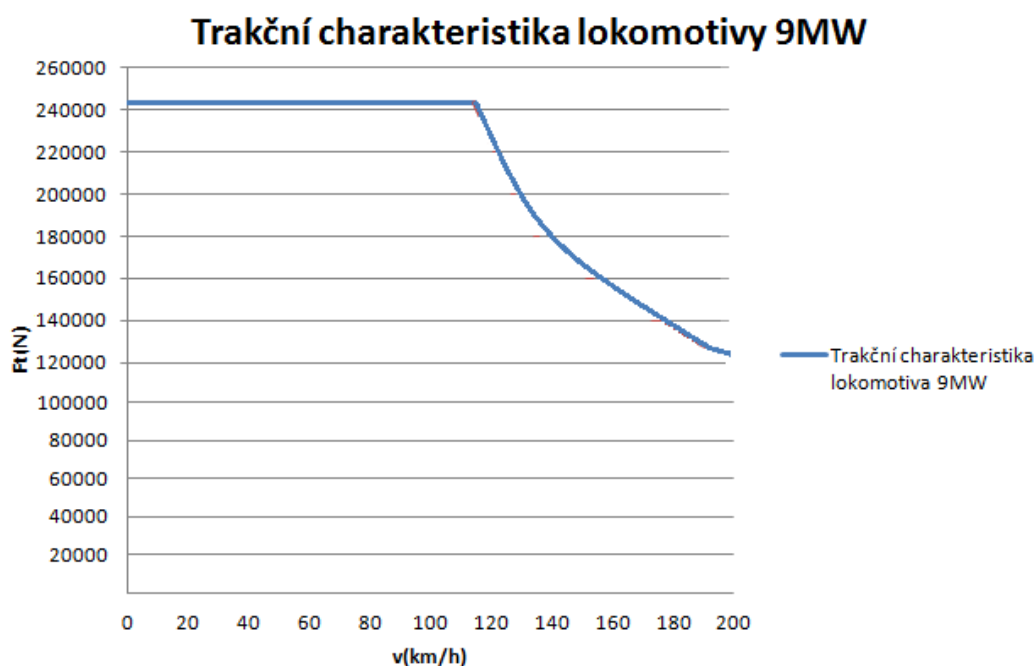
Základní úvahou při určování parametrů lokomotivy bylo určit, do jaké rychlosti bude lokomotiva moci pracovat v režimu konstantní síly (tj. stanovení jmenovitého bodu). S ohledem na avizované zvyšování rychlostí na tratích byla zvolena hodnota rychlosti $v = 120$ km/h, aby zde došlo k posunu oproti lokomotivě Škoda 109E, která dosáhne jmenovitého bodu při rychlosti 105 km/h.

Protože ve chvíli, kdy se provoz lokomotivy blíží jmenovitému bodu, stroj jede na

téměř maximální výkon, je tažná síla dle vztahu 2.1 vypočítána právě pro tento stav. Při uvažování účinnosti $\eta = 0,9$ je využitelný instalovaný výkon $P = 8,1\text{MW}$. Jmenovitá tažná síla tedy dle vztahu 2.1 po převedení rychlosti na $33,33\text{ m/s}$ je

$$F_t = \frac{P}{v} = \frac{8\,100\,000}{33,33} = 243\,000\text{ N}$$

Pro provoz za jmenovitým bodem, tj. v režimu konstantního výkonu, byla zvolena hodnota $P = 7,1\text{MW}$. Hodnota byla odvozena dle výpočtů výkonu z trakční charakteristiky lokomotivy Škoda 109E (viz obr. 1.3). Pak dle již zmíněného vztahu 2.1 dostává průběh trakční charakteristiky hyperbolický průběh a postupně klesá až do hodnoty pro 200km/h . Rychlost 200km/h byla zvolena jako maximální rychlosti lokomotivy, jelikož pro české poměry tato rychlost stále výrazně převyšuje maximální povolenou rychlost na tratích. Celkový průběh vzorové trakční charakteristiky pro lokomotivu s instalovaným výkonem 9MW je zobrazen na obr. 4.2.



Obr. 4.2. Vzorová trakční charakteristika lokomotivy o výkonu 9MW

4.2.2 Lokomotivy s instalovaným výkonem 12MW

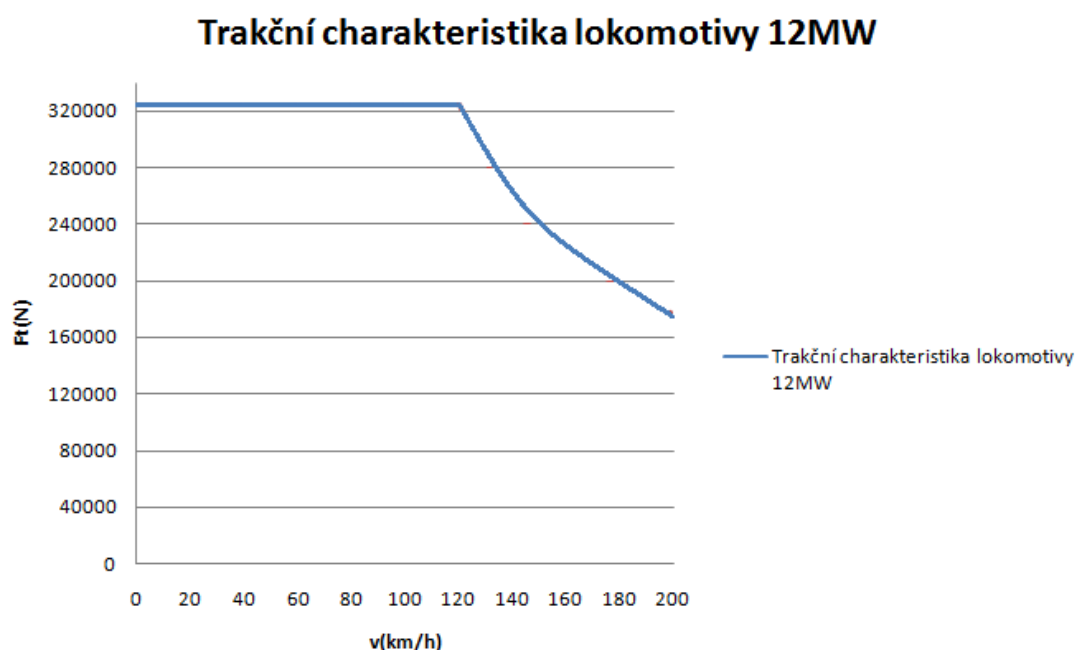
U této výkonnější lokomotivy byl opět zvolen jmenovitý bod při $v = 120\text{km/h}$. Důvodem byl fakt, že zatímco pro rychlé a ne zvláště těžké vlakové soupravy bude stačit menší tažná síla a důležitá bude zejména rychlost, jíž se dá dosáhnout i odbuzováním bez nutnosti silného tahu, bude možné lokomotivu s výkonem 12MW využít i pro nákladní vlaky, kde je naopak tažná síla důležitá. Pro využití tohoto výkonu tedy byla místo

možnosti získat větší rychlost zvolena možnost získat výrazně vyšší tažnou sílu.

Při uvažování účinnosti $\eta = 0,9$ je využitelný instalovaný výkon $P = 10,8\text{MW}$. Pro jmenovitý bod opět umístěný při $v = 120\text{km/h}$ pak dle vztahu 2.1 vychází tažná síla

$$F_t = \frac{P}{v} = \frac{10\,800\,000}{33,33} = 324\,000\text{ N}$$

V režimu konstantního výkonu, tj. provozu za jmenovitým bodem, byl opět zvolen výkon s rezervou cca 1MW, tedy $P = 9,8\text{MW}$. Průběh vzorové trakční charakteristiky pro lokomotivu o výkonu 12MW je pak znázorněn na obr. 4.3.



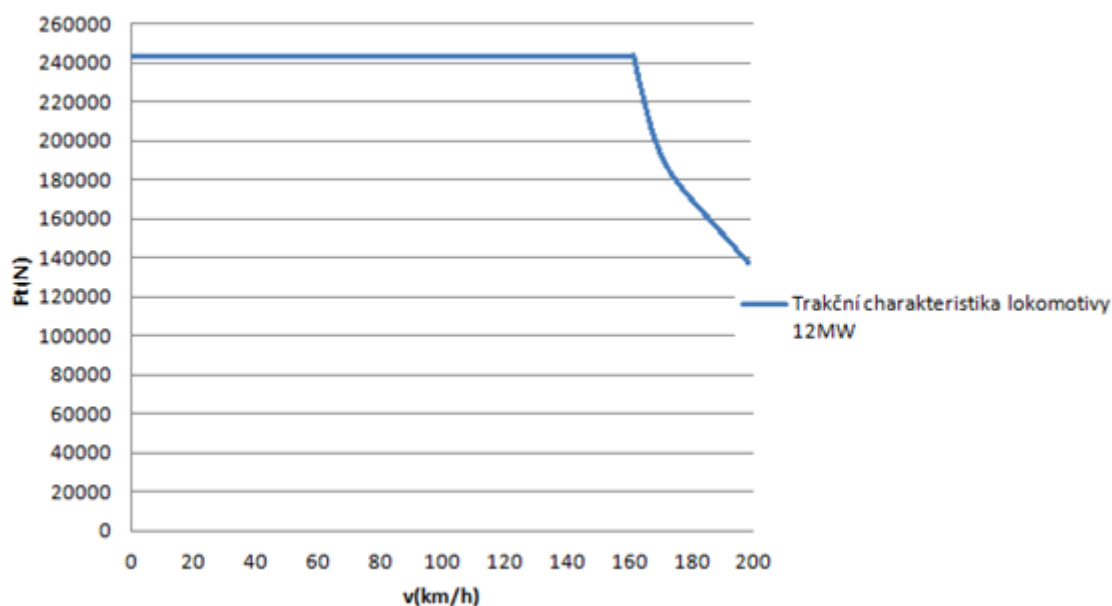
Obr. 4.3. Vzorová trakční charakteristika lokomotivy o výkonu 12MW s velkou tažnou silou

Je však možné, že v případě výkonné lokomotivy přijde i požadavek výkon skutečně využít i na vyšší rychlost ve jmenovitém bodě. Proto byla zvolena i varianta lokomotivy s výkonem 12MW (dále *Lokomotiva 12MW 2*), která by ve jmenovitém bodě dosahovala maximální rychlosti 160km/h. Při uvažování stejného využitelného výkonu (10,8MW) pak vyjde výsledná maximální trvalá tažná síla dle následujícího výpočtu:

$$F_t = \frac{P}{v} = \frac{10\,800\,000}{44,44} = 243\,000\text{ N}$$

Vidíme, že hodnota tažné síly se shoduje s hodnotou tažné síly u uvažované lokomotivy 9MW, avšak zde máme výhodu v tom, že tuto sílu můžeme využívat o mnoho déle, tj. při jízdě vyššími rychlostmi. Průběh vzorové trakční charakteristiky pro lokomotivu o výkonu 12MW s vyšší rychlostí je pak znázorněn na obr. 4.4.

Trakční charakteristika lokomotivy 12MW



Obr. 4.4. Vzorová trakční charakteristika lokomotivy o výkonu 12MW s vyšší rychlostí

4.3 Vybrané vlakové soupravy

Jako vlakové soupravy, které budou v simulacích a ukázkách trakčních charakteristik s vlivem jízdnicích odporů použity, byly vybrány vlakové soupravy ČD EuroCity, jeden vlak EuroNight a jediný (v roce 2017) ČD provozovaný vlak InterCity. Volba byla dána zejména faktem, že lokomotivy s vyšším instalovaným výkonem by zjevně kromě obtížných tratí byly nasazovány právě na tyto *prestížní* spoje, kde se řeší čas dojezdu na minuty a každá časová úspora se zde velice propaguje.

4.3.1 IC 513 Opava

První vlakovou soupravou, jež bude vzorově použita jako zátěž lokomotiv je jediný (v roce 2017) vlak ČD InterCity, IC 513 *Opava* na trati Praha hl. n. - Opava východ. Tento vlak je běžně tažen lokomotivou řady 371, což je na dnešní dobu velice zastaralá lokomotiva, ačkoli se jedná o více systémový stroj z počátku 90. let. Původně sloužil a nadále slouží jako lokomotiva pro vlaky na styku české soustavy 3kV SS a německé 15kV 16,7Hz. Je vak vybavena netypicky odporovou (stupňovitou) regulací. Slouží často právě i na tratích se stejnosměrným napájením a právě proto je i tažným vozidlem tohoto vlaku InterCity. Kromě řady 380 totiž jako jediná lokomotiva dokáže vyvinout rychlost 160km/h. Při výkonu 3MW však za cenu velice těžkého rozjezdu, jenž je v kopcovitém terénu prakticky nemožný. Nová generace lokomotivy by se právě zde zcela jistě hodila.

Lokomotiva totiž táhne poměrně slušnou zátěž (na současné poměry vlaků ČD). Souprava se totiž skládá celkem ze sedmi čtyřnápravových vozů. V případě plného obsazení totiž vlaková souprava bez lokomotivy váží 351t.



Obr. 4.5: Lokomotiva řady 371 v čele vlaku IC 513 Opava [6]

4.3.2 EC 173 Hungaria

Vlak EC 173 je skutečně mezinárodním expresním rychlíkem, jež provozují ČD. Dle přídomku *Hungaria* vyráží z hlavního nádraží Budapešť, Keleti a následně přes Bratislavu, Brno, Prahu a Drážďany dorazí do stanice Hamburg, Altona. Souprava se skládá celkem z devíti vagonů. Na úseku mezi Budapeští a Prahou je vlak tažen lokomotivou Škoda 109E (řada 380), od Prahy do Drážďan vlak táhne lokomotiva řady 371 a z Drážďan do Hamburgu je vlak tažen lokomotivou německé řady 101. Důvodem tohoto přepřahání jsou nejspíše nadále trvající problémy s homologací lokomotivy 109E pro provoz v Německu, protože fyzicky zde schopná provozu je. I pro tento vlak by se tedy hodila nová tažná lokomotiva, která by problém vyřešila.

Celková hmotnost neobsazené soupravy je oproti IC 513 pochopitelně vyšší: dosahuje hodnoty 438t. Při plném obsazení pak váží 484t.



Obr. 4.6. Lokomotiva řady 380 v čele vlaku EC 173 Hungaria [6]

4.3.3 EC 282 Slovenská strela

Třetím denním vlakem, jenž byl vybrán jako vzorová souprava, je vlak Slovenská strela, jenž spojuje hlavní nádraží v Praze a Bratislavě. Souprava se skládá z osmi osobních vozů, přičemž jeden patří ZSSK a ostatní ČD. Protože vlak projíždí pouze územím Československa, je možné použít pouze jednu lokomotivu. Tažení vlaku tak obstarává lokomotiva Škoda 109E, protože tento vlakový spoj je i přes nedostatek univerzálních lokomotiv dostatečně prestižní na to, aby se zde nedostateková lokomotiva použila.

Hmotnost neobsazené soupravy činí 408t, při plném obsazení pak 446t. průběh vypočteného jízdního odporu je opět možné vidět v grafu na obr. 4.9.



Obr. 4.7. Lokomotiva řady 380 v čele vlaku EC 282 Slovenská strela [7]

4.3.4 EN 442 Bohemia

Poslední vybranou vzorovou soupravou je noční expres, jenž kromě cestujících přepravuje i jejich osobní automobily. V určitém úseku tak jsou zapojeny vedle deseti osobních vagonů i tři vagony pro přepravu osobních vozidel. Protože spoj vyjíždí ze stanice Humenné na Slovensku, kde není elektrizace sítí pro běžnou železniční trakci, je vlak do stanice Košice tažen diesel elektrickou lokomotivou řady 757. odsud jej pak na stanici Praha hl. n. doveze lokomotiva řady 350 ZSSK, případně lokomotiva řady 380 ČD.

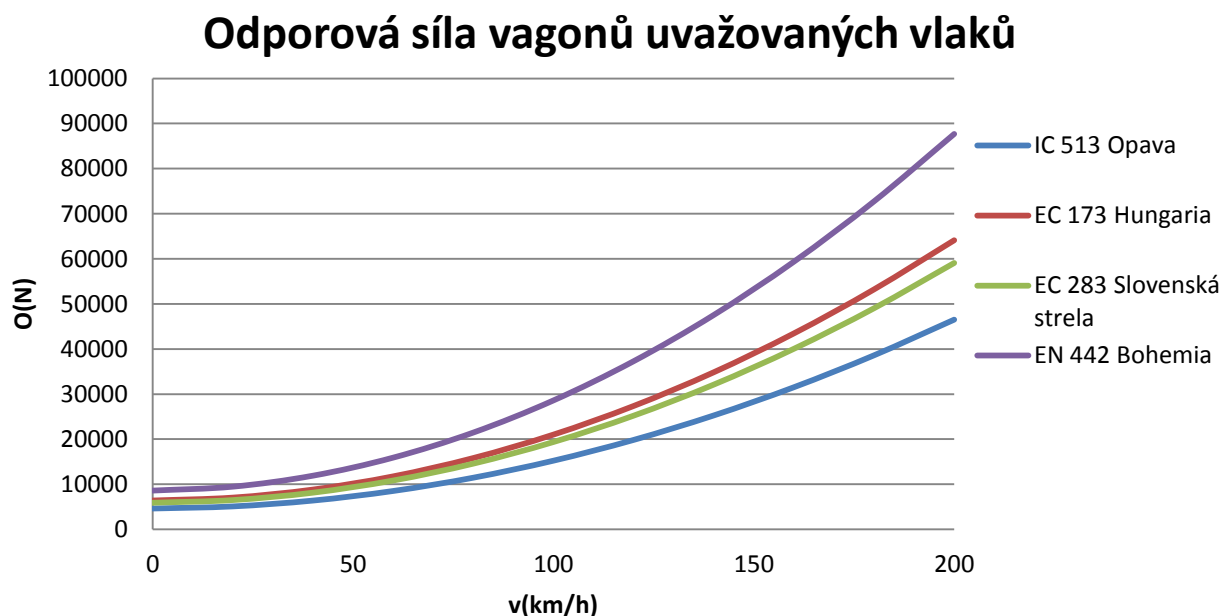
Hmotnost neobsazené soupravy pak dosahuje 609t a obsazené 655t, jedná se tedy o nejtěžší vybraný vlak. Zde by se teoreticky výkonnější lokomotiva uplatnila nejvíce, ačkoliv na neelektrifikovaném úseku Humenné - Košice by ji musela zastoupit diesel elektrická trakce.



Obr. 4.8. Lokomotiva řady 380 v čele vlaku EN 442 Bohemia [6]

4.4 Jízdní odpory vybraných vlakových souprav

Pro simulaci je nutné znát jízdní odpor vlakových souprav, na což použijeme vzorec pro typ soupravy R z Tab. 3.1. Po dosažení rychlostního rozsahu dostaneme průběhy znázorněné v grafu na obr. 4.5. Jedinou výjimkou je vlak EN 442 Bohemia, kde se musí k odporu osobních vagonů zvlášť vypočítat a přičíst jízdní odpor nákladních vagonů pro přepravu osobních automobilů. Ze stejné tabulky se použije vzorec pro typ zátěže $T4$, jelikož ve všech případech uvažujeme tzv. nejhorší stav, tedy plně obsazenou soupravu.



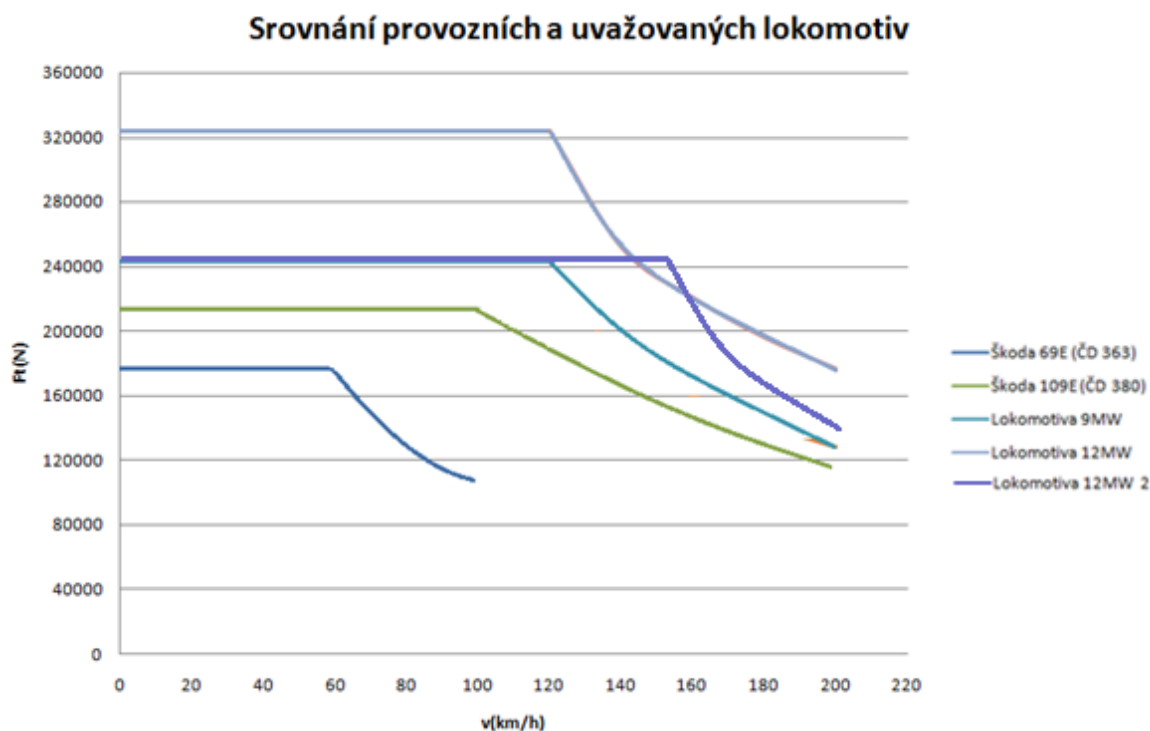
Obr. 4.9. Průběh vozidlových odporových sil uvažovaných vlakových souprav

4.4.1 Porovnání s lokomotivami Škoda

Proveďme nyní srovnání teoreticky uvažovaných lokomotiv s nejpoužívanějšími lokomotivami Škoda 69E a 109E pro zjištění, jaké navýšení parametrů přineslo instalování výrazně vyššího výkonu.

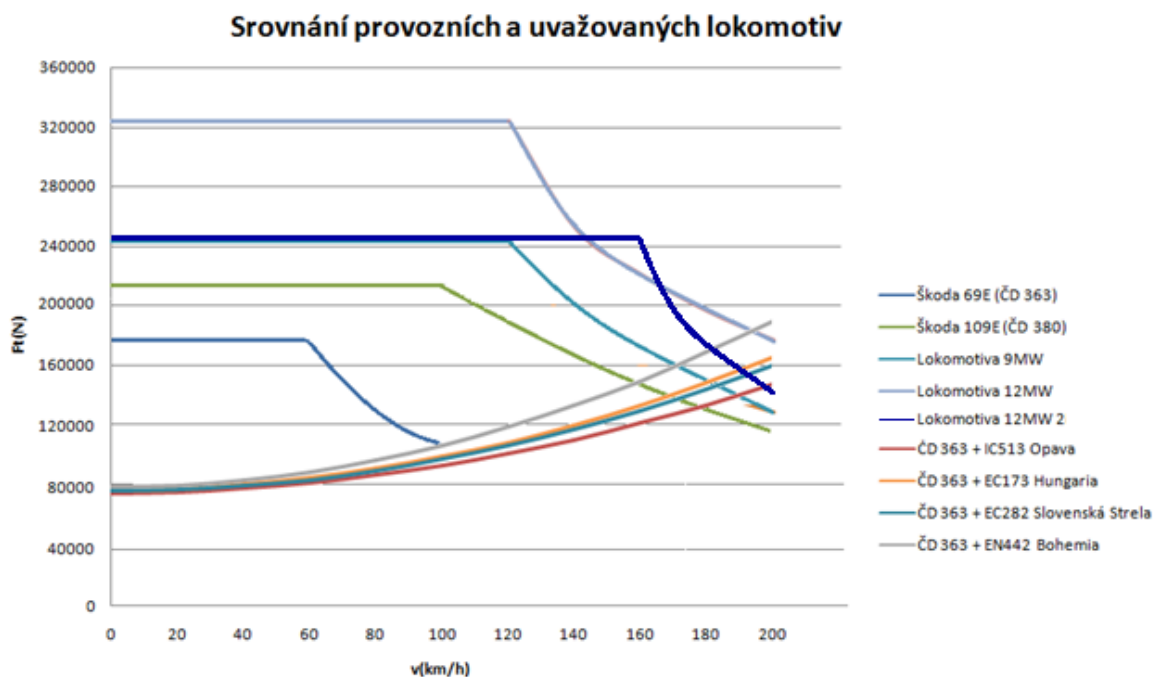
Lokomotiva Škoda 69E dosahuje nejnižšího výkonu a tažné síly (viz obr 1.2). Nárůst výkonu o cca 3MW u lokomotivy 109E přinesl posun jmenovitého bodu ze 60km/h na 105km/h a nárůst tažné síly o 33kN na 213kN. Oproti lokomotivě 109E došlo u lokomotivy 9MW ke zvýšení výkonu o 2,6MW. Jmenovitý bod byl posunut na 120km/h a tažná síla vzrostla o dalších 30kN. Je tedy vidět, že došlo ke zlepšení parametrů, ačkoli nárůst není nijak dramatický vzhledem k výkonu, jehož zvýšení zcela jistě nebude levnou záležitostí ať již z hlediska konstrukce, tak z hlediska provozu.

U lokomotivy 12MW lze pozorovat oproti stroji s 9MW velice výrazný nárůst tažné síly (+ 81kN), jelikož byla zachována jmenovitá rychlost 120km/h jako u lokomotivy 9MW. Je tedy vidět, že instalovaný výkon lze užít na zvýšení jmenovité rychlosti, avšak za cenu malého nárůstu tažné síly, či pro zvýšení tažné síly, ale ne extrémnímu zvýšení jmenovité rychlosti. Naproti tomu lokomotiva 12MW 2 disponuje stejnou tažnou silou, jako lokomotiva 9MW, avšak svůj výkon zužitkuje na vyšší rychlost v režimu konstantní síly.



Obr. 4.10. Srovnání trakčních charakteristik zmiňovaných lokomotiv

Pro ilustraci efektu větší tažné síly díky většímu instalovanému výkonu můžeme do obr. 4.4 vynést ještě jízdní odpory zmiňovaných vlakových souprav, viz obr. 4.5.



Obr. 4.11. Vliv jízdních odporů vlakových souprav na porovnávané lokomotivy

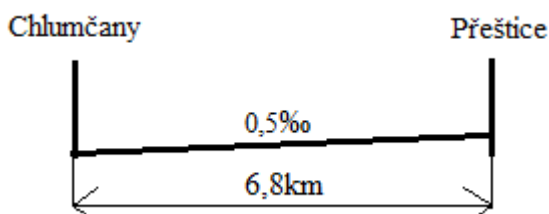
Na zmíněném grafu je vidět, že lokomotiva ČD 363 sice nemá problém s překonáním jízdních odporů vlakových souprav, ale jen proto, že nevyvine dostatečnou rychlost na to, aby jízdní odpory začaly prudce růst. Lokomotivy 109E a 9MW nemají s jízdními odpory vlakových souprav problémy do 150km/h, takže by tyto vlaky mohly bez problému táhnout v rámci současných rychlostních limitů v ČR. Lokomotiva 12MW pak nemá problém s překonáním jízdních odporů zmiňovaných souprav téměř vůbec, pouze u nejtěžší soupravy vlaku EN 442 Bohemia by nedokázala vyvinout rychlost nad 195km/h.

4.5 Traťové úseky vybrané pro simulaci

Pro simulaci byly vybrány celkem tři traťové úseky, na kterých budou porovnávány vlastnosti klasických a výkonnějších lokomotiv. Všechny tři úseky lze nalézt na trati č. 183 Plzeň hl. n. - Železná Ruda.

4.5.1 Traťový úsek Chlumčany - Přeštice

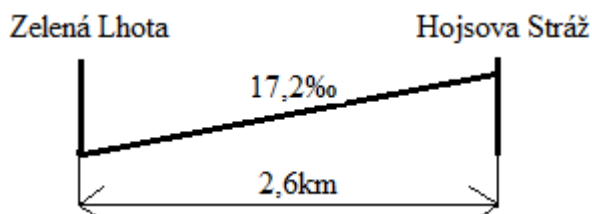
Úsek se nachází mezi stanicemi Plzeň a Klatovy. Je dlouhý 6,8km a vyznačuje se téměř rovným terénem - redukovaný sklon má hodnotu pouze 0,5‰. Na tomto úseku bude porovnáván jízdní výkon lokomotiv v situaci minimálního traťového převýšení. Maximální traťová rychlost se v tomto úseku pohybuje v rozmezí 85 - 100km/h.



Obr. 4.12. Úsek trati Chlumčany - Přeštice

4.5.2 Traťový úsek Zelená Lhota - Hojsova stráž

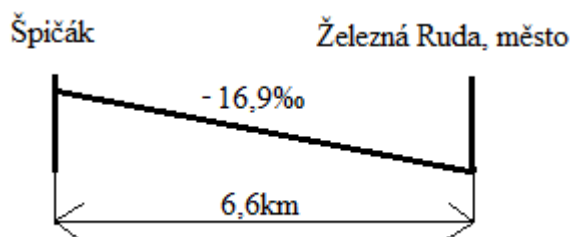
Tento úsek se nachází až za stanicí Klatovy, byl proto vybrán pouze pro svůj sklon, jenž dosahuje hodnoty 17,2‰. Úsek z Klatov do Železné Rudy však není elektrifikován, takže použití elektrických lokomotiv je zde nemožné. Pro simulaci však postačí parametry trati. Maximální traťová rychlost je zde stanovena v rozmezí 75 - 80km/h a délka úseku činí 2,6km.



Obr. 4.13. Úsek trati Zelená Lhota - Hojsova Stráž

4.5.3 Traťový úsek Špičák - Železná Ruda, město

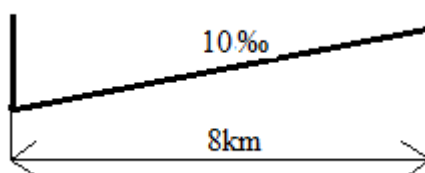
Aby byla v simulaci a porovnání reprezentována i jízda ze spádu, byl vybrán tento konkrétní úsek. Spád zde dosahuje hodnoty 16,9‰, což se do pohybové rovnice vlaku dosadí jako záporná hodnota redukovaného sklonu. Délka úseku činí 6,6km a maximální traťová rychlost je stanovena na 75 - 80km/h.



Obr. 4.14. Úsek trati Špičák - Železná Ruda, město

4.5.4 Fiktivní traťový úsek

Jako poslední byl vybrán fiktivní 8km dlouhý úsek pro lokomotivu 12MW s vyšší rychlostí. Tento úsek má sklon 10‰ a maximální rychlost byla zvolena 160km/h.



Obr. 4.15. Fiktivní traťový úsek

5 Simulace jízdy vlaků a porovnání jízdních dob

Pro simulaci rozjezdových časů jednotlivých vlaků a souprav byl vytvořen jednoduchý skript v programu Matlab. Využívá poznatků z teoretické kapitoly 3 a pomocí zde uvedených vztahů vypočítá zrychlení vozidla, čas a vzdálenost, kterou vozidlo potřebuje k dosažení požadované rychlosti.

Vstupními údaji skriptu jsou počáteční čas simulace, časový krok, počáteční rychlost, požadovaná rychlost na konci rozjezdu, redukovaný sklon daného úseku a jízdní odpor vlakové soupravy. Dle zadání lze změnit typ tažné lokomotivy. Pro každou lokomotivu je v programu obsažena aproximace trakční charakteristiky, z níž je vždy pro výpočet zrychlení určována tažná síla. Výpočet zrychlení je proveden dle vztahu 3.18. Rychlost v danou chvíli se pak jednoduše vypočítá jako předchozí rychlost a přírůstek zrychlení za daný časový krok, tedy

$$v_1 = v_0 + a \cdot k \quad (5.1)$$

kde:

v_1 – rychlost v novém časovém úseku

v_0 – rychlost v předchozím časovém úseku

a – zrychlení vozidla

k – časový krok simulace.

Dráha, kterou vozidlo urazí během zrychlení na požadovanou rychlost se pak vypočítá obdobně ze vzdálenosti, kterou vozidlo mělo za sebou v předchozím časovém okamžiku a přírůstkem rychlosti za nový časový úsek, tedy

$$l_1 = l_0 + v \cdot k \quad (5.2)$$

kde:

l_1 – uražená vzdálenost v novém časovém úseku

l_0 – uražená vzdálenost v předchozím časovém úseku

v – rychlost vozidla

k – časový krok simulace.

Veličiny jsou následně ukládány do vektorů a je možné vykreslit jejich grafický průběh. Cyklus výpočtu je zastaven ve chvíli, kdy vozidlo v simulaci dosáhne požadované rychlosti. Je – li požadováno zjištění jízdní doby mezi dvěma body se stejným redukovaným sklonem trati, je možné tuto dobu jednoduše dopočítat dále. Vzhledem k tomu, že po dosažení požadované rychlosti vůz tuto rychlost udržuje a tedy nezrychluje, jedná se o pohyb rovnoměrný přímočarý, kde lze užít klasického vztahu

$$t = \frac{s}{v} \quad (5.3)$$

kde:

t – čas

s – vzdálenost (délka úseku)

v – rychlost.

Pouze je nutné od celkové délky daného úseku nutno odečíst tu vzdálenost, kterou vozidlo využilo pro zrychlení na požadovanou rychlost a k výslednému času vypočtenému dle vztahu 5.3 ještě přičíst dobu nutnou ke zrychlení na požadovanou vzdálenost.

5.1 Trakční vlastnosti při akceleraci

V následující části budou uvedeny a porovnány doby a vzdálenosti nutné k akceleraci porovnávaných lokomotiv a vzorových vlakových zátěží na třech vybraných traťových úsecích. Uvažován byl příklad rozjezdu ze stanice (tj. z nulové rychlosti), přičemž směrodatnými údaji simulace jsou doba a vzdálenost nutná k akceleraci na požadovanou rychlost a následná doba, než vlak dorazí do stanice. Není uvažováno brzdění do stanice. Celková doba průjezdu soupravy úsekem (tj. doba akcelerace v součtu se zbylou dobou, kdy vlak jede konstantní rychlostí) jsou seřazeny do tabulek a zhodnoceny v kapitole 5.2.

Pro první úsek (Chlumčany – Přeštice) byla vzhledem k maximální traťové rychlosti stanovena požadovaná rychlost na 90km/h (25m/s) a na dalších dvou úsecích 80km/h (22,22m/s). Poslední, fiktivní úsek má maximální rychlost 160km/h. Údaje pro jednotlivé úseky budou rozepsány do čtyř částí dle vlakové zátěže.

Lokomotiva 12MW s vyšší rychlostí je pak do porovnání zahrnuta pouze na posledním fiktivním úseku, kde je požadovaná rychlost nastavena na 200km/h. Na zbylých úsecích by srovnání nemělo smysl, jelikož má stejnou hodnotu maximální tažné síly, jako lokomotiva 9MW, takže by dosahovala stejných výsledků. V tomto srovnání naopak není zahrnuta lokomotiva ČD 363, jejich parametry jsou příliš slabé. Důležité zde bylo porovnání s lokomotivou 9MW, kde i přes shodnou tažnou sílu lokomotiva 9MW musí začít dříve odbuzovat. Dá se předpokládat, že oproti silnější verzi lokomotivy 12MW bude její rychlá verze pomalejší.

5.1.1 Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží IC 513 Opava (351t)

Protože vlaková souprava užívaná pro spoj IC 513 Opava je ze vzorových souprav nejlehčí, bylo možné očekávat, že doby a vzdálenosti pro akceleraci budou ve srovnání s ostatními vlakovými zátěžemi nejkratší. Jak je možné vidět dále, tento předpoklad se naplnil. Vzhledem k tomuto faktu se povedlo všem čtyřem uvažovaným lokomotivám dosáhnout požadované rychlosti na daném úseku mezi stanicemi.

Úsek Chlumčany – Přestice, sklon trati 0,5‰, 6,8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	1081	80	229
ČD 380	737	59	243
9MW	644	51	246
12MW	478	38	253
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	1593	129	54
ČD 380	901	81	85
9MW	734	66	93
12MW	488	44	104
Úsek Špičák – Železná Ruda - město, sklon trati -16,9‰, 6,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	526	46	273
ČD 380	426	38	278
9MW	385	35	280
12MW	305	27	283
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 380	7679	230	7
9MW	6190	188	43
12MW	3981	124	90
12MW 2	4408	149	81

Tab. 5.1.: Simulací získané parametry pro zátěž IC 513 Opava

Z Tab. 5.1 lze jasně pozorovat, že čím větším výkonem lokomotiva disponuje, tím rychleji akceleruje a k dosažení požadované rychlosti vyžaduje kratší vzdálenost. Na téměř úseku rovinném úseku se parametry nijak dramaticky neliší, s výjimkou lokomotivy ČD 363, která kromě nejnižšího výkonu ztrácí i díky nejprudšímu poklesu tažné síly při akceleraci, jelikož jmenovitý bodu dosáhne již při 60km/h, zatímco ostatní lokomotivy dosáhnou požadované rychlosti v režimu konstantní tažné síly. To se následně výrazně projevuje při jízdě do prudkého stoupání. Lokomotiva 12MW s vyšší rychlostí pak na "svém" úseku ukázala, že posunutí jmenovitý bodu ve prospěch rychlosti se pozitivně projeví na jejích výkonech v porovnání s lokomotivou 9MW.

5.1.2 Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EC 272 Slovenská strela (446t)

Vlaková souprava EC 272 Slovenská strela je oproti předchozí soupravě o téměř sto tun těžší a tento váhový rozdíl se poměrně výrazně projevil, zejména u lokomotivy ČD

363. Nejslabší lokomotiva na téměř rovinném úseku potřebovala více jak dvojnásobek vzdálenosti pro akceleraci na požadovanou rychlost než lokomotiva 12MW. Při simulaci jízdy do prudkého stoupání pak na daném úseku požadovanou rychlost vyvinout nedokázala, byť o pouhých devět metrů. Uvedená zbylá doba průjezdu je tedy v tomto případě skutečná doba průjezdu lokomotivy sledovaným úsekem.

Výrazně se zde projevila rozdíly mezi lokomotivami ČD 380 a 9MW, které disponují podobnou hodnotou tažné síly (213kN a 243kN) oproti lokomotivě 12MW, jejíž tažná síla je výrazně vyšší (324kN). Tento rozdíl zajistil, že lokomotiva při jízdě do prudkého stoupání zvládla akceleraci na požadovaných 90km/h za vzdálenost o třetinu kratší, než lokomotiva 9MW. Všechny výsledky simulace pro tuto vlakovou zátěž jsou shrnuty do tab.

5.2.

Úsek Chlumčany – Přeštice, sklon trati 0,5‰, 6,8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	1324	98	219
ČD 380	899	72	236
9MW	782	62	241
12MW	582	46	249
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	2609*	203*	202*
ČD 380	1252	112	70
9MW	991	89	77
12MW	635	57	88
Úsek Špičák – Železná Ruda – město, sklon trati -16,9‰, 6,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	600	52	270
ČD 380	490	44	275
9MW	444	40	277
12MW	355	32	281
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 380	10733	314	263
9MW	8381	250	245
12MW	5153	159	64
12MW 2	5718	193	51

Tab. 5.2.: Simulací získané parametry pro zátěž EC 272 Slovenská strela

5.1.3 Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EC 173 Hungaria(484t)

Vlaková zátěž EC 173 Hungaria je oproti vlaku Slovenská strela jen nepatrně těžší (o 38t). I tento rozdíl se však dokázal na výsledcích simulace projevit. Největší byly rozdíly v dobách a vzdálenosti potřebné k akceleraci pochopitelně u nejslabší lokomotivy ČD 363, dále se pak rozdíly zmenšovaly. Tato lokomotiva opět pochopitelně nedokázala při simulaci jízdy do stoupání vyvinout na sledovaném úseku požadovanou rychlost. Za předpokladu uvedeného v předchozí kapitole, tj. že by trať i za hraniční stanicí úseku pokračovala dále stejně, vyvinula by lokomotiva ČD 363 rychlost 90km/h až za 3,3km od rozjezdu. Výsledky simulace pro tuto vlakovou zátěž shrnuje tab. 5.3.

Úsek Chlumčany – Přeštice, sklon trati 0,5‰, 6,8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	1424	105	215
ČD 380	964	77	233
9MW	839	67	238
12MW	623	50	247
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	3288*	249*	217*
ČD 380	1452	128	52
9MW	1114	100	67
12MW	701	63	85
Úsek Špičák – Železná Ruda – město, sklon trati -16,9‰, 6,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	625	54	269
ČD 380	513	46	274
9MW	466	42	276
12MW	376	34	280
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 380	12264	355	274*
9MW	9423	278	252*
12MW	5668	174	53
12MW 2	6297	212	38

Tab. 5.3.: Simulací získané parametry pro zátěž EC 173 Hungaria

5.1.4 Trakční vlastnosti lokomotiv se zátěží EN 442 Bohemia(655t)

Nejtěžší uvažovaná vlaková zátěž je o plných 171t těžší, než vlak Hungaria. Dalo se tedy očekávat, že doby a vzdálenosti potřebné k akceleraci budou výrazně delší, než v předchozích případech.

Předpoklad se potvrdil. Na téměř rovinném prvním úseku narostla akcelerační vzdálenost lokomotivy ČD 363 o téměř půl kilometru, u lokomotivy ČD 380 o třetinu kilometru oproti vlaku Hungaria. Nejvýkonnější lokomotiva 12MW zaznamenala nárůst akcelerační vzdálenosti o cca 200m. Podobně výrazně narostly i časy potřebné k akceleraci, ačkoliv zde se i lokomotiva ČD 363 vešla do 2,5min.

V úseku do stoupání se plně projevila nedostačující charakteristika lokomotivy ČD 363. Protože svého jmenovitého bodu dosáhne již při 60km/h (a i zde disponuje výrazně nižší tažnou silou, než ostatní lokomotivy) a dále již může zrychlovat jen v režimu odbuzování (tj. snižování tažné síly), nebylo v silách lokomotivy vyvinout do tohoto prudkého stoupání požadovanou rychlost 80km/h a to ani v případě, že by úsek se stejným sklonem pokračoval dále.

Následnými pokusy při simulaci teoreticky ukázaly, že lokomotiva do tohoto stoupání s danou zátěží maximálně vyvine rychlost 65km/h.

Ani lokomotiva ČD 380 nedokázala při simulaci jízdy zrychlit na požadovanou rychlost během sledovaného úseku. Pokud by stoupání pokračovalo dále, potřebovala by dalších 41m navíc. Akceleraci na požadovanou rychlost tak nejlépe zvládla s největší zátěží při jízdě do stoupání pouze lokomotiva 12MW, přičemž se zcela jistě projevila její výrazně vyšší tažná síla. Výsledky simulace pro nejtěžší uvažovanou zátěž jsou shrnuty v tab. 5.4.

Úsek Chlumčany – Přestice, sklon trati 0,5‰, 6,8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	2030	148	191
ČD 380	1325	106	219
9MW	1143	91	226
12MW	834	67	239
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	Tažné vozidlo nedosáhlo požadované rychlosti		
ČD 380	2941*	263*	247*
9MW	2031	182	26
12MW	1107	99	67
Úsek Špičák – Železná Ruda - město, sklon trati -16,9‰, 6,6km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 363	754	66	263
ČD 380	625	56	269
9MW	573	51	271
12MW	465	42	276
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km			
Typ lokomotivy	Akcelerační vzdálenost (m)	Akcelerační doba (s)	Zbylá doba průjezdu (s)
ČD 380	52898	1201	337
9MW	21199	561	304
12MW	9437	278	251
12MW 2	10525	342	295

Tab. 5.4.: Simulací získané parametry pro zátěž EN 442 Bohemia

5.2 Porovnání jízdních dob uvažovaných lokomotiv

Z již zmíněných údajů je možné stanovit a porovnat celkové jízdní doby na třech uvažovaných úsecích. Celková jízdní doba se skládá ze součtu doby nutnou pro akceleraci na požadovanou rychlost a doby, jež je v předchozích tabulkách označena jako *zbylá doba průjezdu*. Tato doba byla vypočtena dle vztahu 5.3. Výjimkou jsou situace, kdy lokomotiva nestihla za sledovaný úsek dosáhnout požadované rychlosti. Pak se již v tabulce zmiňuje doba rovná též celkové době průjezdu úsekem a zjištěna byla přímo ze souboru výstupních dat simulace, kdy byl v příslušném vektoru zaznamenáno času pro iteraci odpovídající vzdálenosti úseku odečten odpovídající čas průjezdu hraniční stanicí.

Zatímco u vzdáleností a dob, jež byly potřebné k akceleraci, byly i při nejlehčí uvažované zátěži znatelné, srovnání celkových jízdních dob potřebných k překonání sledovaných úseků již takové rozdíly nenabízí. Důvodem je fakt, že po dosažení požadované rychlosti již vlaky jedou stejnou (maximální povolenou traťovou) rychlostí. A pokud vlaku trvala akcelerace kratší dobu, vyváží se celková průjezdní doba delší *zbylou dobou průjezdu*, kdy vlaku zbývá pro jízdu konstantní rychlostí delší vzdálenost do konce sledovaného úseku.

5.2.1 Jízdní doby lokomotiv se zátěží IC 513 Opava

Při srovnávání jízdních dob u nejlehčí uvažované zátěži nepozorujeme žádné velké rozdíly v jízdních dobách. Na téměř rovinném úseku ušetřila nejvýkonnější lokomotiva oproti nejslabší 18s na necelých sedmi kilometrech.

Na úseku s prudkým stoupáním je již rozdíl 35s, projevila se zde jasně potřeba větší tažné síly. Při jízdě z velkého spádu pak rozdíly jsou skutečně nepatrné, jelikož velký vliv zde má gravitační zrychlení, které výrazně pomáhá v akceleraci i vlaku s nejslabší lokomotivou. Jízdní doby potřebné k překonání uvažovaných úseků s danou zátěží jsou shrnuty v tab. 5.5.

Úsek Chlumčany – Přestice, sklon trati 0,5‰, 6,8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	309
ČD 380	302
9MW	297
12MW	291
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	183
ČD 380	166
9MW	159
12MW	148
Úsek Špičák – Železná Ruda - město, sklon trati -16,9‰, 6,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	319
ČD 380	316
9MW	315
12MW	310
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 380	237
9MW	231
12MW	214
12MW 2	230

Tab. 5.5.: Simulací získané jízdní doby pro zátěž IC 513 Opava

5.2.2 Jízdní doby lokomotiv se zátěží EC 272 Slovenská strela

O téměř sto tun těžší vlaková zátěž se projevila na delších jízdních dobách i větších rozdílech v závislosti na typu lokomotivy. Na téměř rovinném úseku se rozdíl mezi nejslabší a nejsilnější lokomotivou rovnal 22s.

Do prudkého stoupání pak rozdíl činil již 57s, tedy téměř dvojnásobný rozdíl než při lehčí zátěži IC 513 Opava. Nejméně se rozdíl v hmotnosti projevil při jízdě ze spádu, kdy se těžší souprava projevila pouze o jednotky sekund větším rozdílem mezi nejslabší a nejsilnější lokomotivou oproti lehčí zátěži. Jízdní doby potřebné k překonání uvažovaných úseků s danou zátěží jsou shrnuty v tab. 5.6.

Úsek Chlumčany – Přeštice, sklon trati 0,5‰, 6,8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	317
ČD 380	308
9MW	303
12MW	295
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	202*
ČD 380	182
9MW	166
12MW	145
Úsek Špičák – Železná Ruda – město, sklon trati -16,9‰, 6,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	322
ČD 380	319
9MW	317
12MW	313
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 380	263
9MW	245
12MW	223
12MW 2	244

Tab. 5.6: Simulací získané jízdní doby pro zátěž EC 272 Slovenská strela

5.2.3 Jízdní doby lokomotiv se zátěží EC 173 Hungaria

Vlaková zátěž Hungaria jen o několik desítek tun převyšuje celkovou hmotností zátěž vlaku Slovenská strela. Vyskytuje se tedy rozdíl v jízdních dobách poněkud menší, než mezi vlakovými zátěžemi Opava a Slovenská strela, kde byl rozdíl zhruba 90 tun. Rozdíly mezi lokomotivami jsou však pochopitelně vyšší. Na téměř rovinném úseku rozdíl mezi lokomotivami ČD 363 a 12MW dosáhl již 23s.

Při simulaci jízdy do stoupání opět lokomotiva ČD 363 nestihla akcelarovat v daném úseku na požadovanou rychlost a její doba průjezdu úsekem je tak o 69s delší. Téměř shodné rozdíly mezi lokomotivami a jejich jízdní dobou jako u vlaku Slovenská strela lze pozorovat při jízdě ze spádu. Jízdní doby potřebné k překonání uvažovaných úseků s danou zátěží jsou shrnuty v tab. 5.7.

Úsek Chlumčany – Přestice, sklon trati 0,5‰, 6,8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	320
ČD 380	310
9MW	305
12MW	297
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	217*
ČD 380	180
9MW	167
12MW	148
Úsek Špičák – Železná Ruda - město, sklon trati -16,9‰, 6,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	323
ČD 380	320
9MW	318
12MW	314
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 380	274
9MW	252
12MW	227
12MW 2	250

Tab. 5.7: Simulací získané jízdní doby pro zátěž EC 173 Hungaria

5.2.4 Jízdní doby lokomotiv se zátěží EN 442 Bohemia

Zdaleka největší rozdíly v jízdních dobách se pochopitelně a očekávaně projevily u nejtěžší uvažované vlakové zátěže. Na téměř rovinné trati se rozdíl mezi nejslabší a nejsilnější lokomotivou rovnal již 33s.

Při jízdě do stoupání se ukázalo, že lokomotiva ČD 363 by pro nedostatek tažné síly nedokáže vyvinout požadovanou rychlost 80km/h a to ani v případě, že by úsek pokračoval s neomezenou délkou i nadále. Simulací bylo zjištěno, že hraniční rychlost, kdy by lokomotiva byla schopná dále pokračovat ve stoupání, je 65km/h. Pokud by tedy lokomotiva projela úsekem za těchto podmínek, trval by jí průjezd o 193s déle (tj. 3,3 minuty). Výrazné jsou i rozdíly v jízdních dobách lokomotiv ČD 380 a 9MW v porovnání s lokomotivou 12MW. Rozdíly při jízdě ze spádu jsou opět velmi malé. Jízdní doby potřebné k překonání uvažovaných úseků s danou zátěží jsou shrnuty v tab. 5.8.

Úsek Chlumčany – Přeštice, sklon trati 0,5‰, 6,8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	339
ČD 380	325
9MW	317
12MW	306
Úsek Zelená Lhota – Hojsova Stráž, sklon trati 17,2‰, 2,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	359**
ČD 380	247*
9MW	208
12MW	166
Úsek Špičák – Železná Ruda - město, sklon trati -16,9‰, 6,6km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 363	329
ČD 380	325
9MW	322
12MW	318
Fiktivní úsek, sklon trati 10‰, 8km	
Typ lokomotivy	Doba průjezdu úsekem (s)
ČD 380	337
9MW	304
12MW	251
12MW 2	295

Tab. 5.8: Simulací získané jízdní doby pro zátěž EN 442 Bohemia

6 Závěrečné shrnutí

Simulační experiment potvrdil, že užití lokomotiv s vyšším instalovaným výkonem, než se nyní nabízí, skutečně může provoz na železnici urychlit. Ukázalo se, že zejména akcelerační schopnosti jsou u výkonnějších lokomotiv výrazně lepší a to i při srovnání lokomotivy 9MW a rychlejší verze lokomotivy 12MW. Je zde však mnoho dalších okolností, které tento na první pohled jasný závěr zmírňují a dokonce i hovoří proti němu.

Výkony (fiktivních) lokomotiv, se kterými zde bylo operováno při výpočtech a simulacích jsou uvažované pouze pro spotřebu hlavního trakčního pohonu. Moderní lokomotiva s vagony však spotřebuje mnoho elektrické energie i na jiné účely, než na vlastní pohon, tedy jízdu. Pokud by se tak stalo, nebyl by vlak ani schopný zabrzdít. Lokomotivy dnes umí velmi obstojně brzdit elektrodynamickou brzdou (EDB), avšak celou vlakovou soupravu lokomotiva svými silami zastavit nedokáže. A jedinou možností, jak brzdit i vagony, je vzduchotlaká brzda. Jak již název napovídá, k její funkci je třeba vzduch v potrubí natlakovat a k tomu pochopitelně slouží kompresor v soustrojí s elektromotorem. Ten se tak stává hlavním vedlejším spotřebičem (pomocným pohonem) na lokomotivě, jenž také spotřebovává elektrickou energii. Podobně olejová čerpadla, ventilátory a další. A tu samozřejmě bere právě ze systémů lokomotivy. Dalším velice důležitým spotřebičem je topení, které se využívá po většinu roku (skutečně hezké počasí, jež nevyžaduje topení, můžeme očekávat běžně jen cca 40 dní ze 365) a jeho spotřeba je také nezanedbatelná. Moderní vlakové soupravy jsou navíc vybavovány dalšími komfortními zařízeními jako je klimatizace, bezdrátové připojení k vysokorychlostnímu internetu, inteligentní dopravní informační systém, jídelní vůz s možností vaření jídel bez omezení, soustavou zásuvek 230V pro všechny cestující apod. Všechn tento výkon navíc je napájen ze vstupních obvodů lokomotivy, ačkoliv je galvanicky oddělen od obvodů vlastního trakčního pohonu. Při konstrukci lokomotivy je tedy nutno uvažovat rezervu, kterou by bylo třeba zahrnout do instalovaného výkonu lokomotivy, aby se dále mohlo mluvit o trakčním výkonu 9 či 12MW (například pro jízdu na střídavé síti pro konstrukci trakčního transformátoru).

Určitou rezervu zcela jistě není na škodu uvažovat i pro případ, že bychom chtěli dosáhnout krátkodobě ještě lepších parametrů, než jakými lokomotiva ve jmenovitém chodu disponuje (tj. např. jaké parametry byly změřeny právě při podobných experimentech). V současnosti nejčastěji používané motory v trakci, motory asynchronní

(indukční) a synchronní (typu PMSM), snesou poměrně vysoké přetížení. V tomto smyslu by tedy též trakční obvody (transformátory, měniče) mohly být dimenzovány na větší, než jmenovitý výkon, takže by mohly motorům krátkodobě (v řádu desítek sekund) výrazně vyšší výkon, čímž by se dosáhlo kýženého zlepšení jízdních parametrů. Otázkou však zůstává, zda by to bylo u takto výkonných lokomotiv potřebné. Další otázkou je pak otázka finanční, jelikož transformátory a měniče jsou velice drahými zařízeními a každé navýšení jejich dimenzování, tj. výkonu, se výrazně prodraží. Je tedy nutné provést úvahu, zda se pro pár sekund zlepšení jízdních výkonů vozidel, které se v celkovém obrazu jízdy vůbec nemusí projevit, vyplatí instalovat výkonnější napájecí zařízení trakčního pohonu. Při uvažování výkonnějších lokomotiv, zejména lokomotivy 12MW, se při simulaci přibližovalo zrychlení vlaku zrychlení, jež bývá typicky požadováno po městských či příměstských vlakových soupravách, tedy tzv. vozidlech lehké trakce. Pokud nepočítáme metro, typickými zástupci této kategorie jsou elektrické osobní vlakové jednotky ČD 451 a 452 (výkon 1,3MW, zrychlení $0,7\text{m/s}^2$) a jednotky ČD 471 (výkon 2MW, zrychlení až 1m/s^2). Pokud bychom na tyto vozy aplikovali výsledky simulace (tj. vyšší výkon znamená větší rychlost, sílu a kratší jízdní doby), znamenalo by to navýšení výkonu těchto elektrických jednotek až na úroveň současných lokomotiv. Zcela jistě by se však jednalo o navýšení ne zcela žádoucí. Pokud vozidlo s poměrně malým výkonem 2MW dokáže vhodným řízením pohonu dosáhnout zrychlení až 1m/s^2 , zvýšením výkonu na 4 či 6MW by zcela jistě jeho zrychlení posunulo až k hodnotě $1,5\text{m/s}^2$. To je však příliš vysoká hodnota, jelikož experimentálními měřeními v dopravě bylo zjištěno, že hraniční hodnota zrychlení, při které stojící cestující (kterých se v příměstských vlakových linkách ve špičce vyskytuje mnoho) dokáže bez problému zvládnout a neupadnout, je $1,2\text{m/s}^2$. Narostla by též rychlost, avšak moderní jednotka ČD 471 disponuje maximální rychlostí 140km/h, která s velkou rezervou převyšuje maximální povolenou rychlost na většině traťových úseků, kde tyto jednotky operují. Další zvyšování výkonu u vozidel lehké trakce (jichž se s výjimkou příměstských jednotek v ČR jinak v podstatě nevyskytuje) tak z těchto pohledů zcela zjevně postrádá smysl. Aplikace určitých poznatků z nových konstrukcí strojů (zejména transformátorů) pro zvýšení výkonu by snad byla možná ve chvíli, kdy by se uvažovali o propojení vnější příměstské sítě s tramvajovou městskou sítí. V ČR se však vyskytují sítě maximálně 50Hz (kde lze uvažovat o propojení s tramvaji). Smysl by toto mělo možná v Německu či Rakousku, kde jsou vlakové napájecí sítě s frekvencí 16,7Hz.

Další skutečností, která hovoří proti výrobě výkonnějších lokomotiv ve snaze ušetřit jízdní doby je stav tratí v ČR. Od doby, kdy byly ČSD rozděleny na ČD (provoz vlaků) a SŽDC (provoz tratí), chybí kooperace mezi oběma subjekty a tratě často nevyhovují požadavkům ČD, ale v poslední době i nově vznikajících soukromých dopravců. Draze se elektrifikují lokální velmi málo užívané tratě a důležité úseky, jako např. Praha - Beroun léta čekají na modernizaci a díky mizernému technickému stavu na nich nelze zajistit odpovídající služby na úrovni. Navíc i na tratích, které jsou z hlediska technického stavu vyhovující, je málokdy povolena dostatečně vysoká rychlost. V ČR se smí jet maximálně 160km/h a z tohoto hlediska, pokud nechceme šetřit vteřiny ve stoupáních, naprosto vyhovuje současná lokomotiva ČD 380. Na mnoho úsecích je pak povolena rychlost sotva 100 či 120km/h. Vedle toho je prakticky nemožné zažít spoj, jenž dorazil na místo určení s menším, než pětiminutovým zpožděním, což naprosto poráží výsledky, kde s výkonnější lokomotivou právě jen pár minut dopravce získá. Stavba lokomotivy s výrazně vyšším výkonem tak dává smysl snad jen pro využití v nákladní dopravě, kde by důraz nebyl kladen na rychlost, ale na velikost tažné síly, jak u zde uvažované lokomotivy 12MW, což by umožnilo táhnout těžší náklady. Na druhou stranu, železniční nákladní doprava je v ČR tak málo využívaná, že i zde není jistota, zda by se nová lokomotiva uchytila.

Posledním argumentem, který hovoří proti stavbě lokomotivy s velkým instalovaným výkonem pro expresní vlakové spoje, je současný trend v železniční dopravě. Ten dává přednost stavbě elektrických velmi rychlých a aerodynamicky tvarovaných jednotek, které obsluhují expresní dálkové spoje. Toto řešení se již uplatnilo i v ČR, kde od roku 2004 jezdí rychlovlaková souprava ČD 680 *Pendolino*. A i z hlediska parametrů je již tato jednotka pro poměry v ČR předimenzovaná, nehledě na superrychlé soupravy z Německa, Francie či Japonsku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Wikipedie. Lokomotiva 363. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:362_001_Praha_hlavni_nadrazi_detail.jpg.
- [2] railcolor.net. Skoda 109E in Hungary. [online]. Dostupné z: <http://www.railcolor.net/index.php?nav=1411082&lang=1#.WpPvZnpSBxB>.
- [3] educon.zcu.cz. Trakční mechanika, trakční charakteristiky. [online]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050201>.
- [4] VAGONY.cz. Co spotřebuje vagón?. [online]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/vagony/energie.html>.
- [5] BASLAR, Josef, MRKVIČKA, Jan. *Trakční vozidla závislá 1*. 1. vyd. Praha, NADAS, 1982. 51 s. UD - 31-016-82 - 05/94.
- [6] Youtube. Kanál uživatele Martinacek96 - vlaky. [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qHFH18TbZaE>
- [7] vlaky.net. Elektrický viacsystémový rušeň "380". [online]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/upload/galeria/006360/246068.jpg>
- [8] kves.uniza.sk. Elektrická trakce.pptx. [online]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/Elektrick%C3%A1%20trakce.pptx>
- [9] BASLAR, Josef, MRKVIČKA, Jan. *Trakční vozidla závislá 1*. 1. vyd. Praha, NADAS, 1982. 106 s. UD - 31-016-82 - 05/94.