

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Využití softwaru OpenTrack  
pro simulaci provozu metra**

**Tomáš Adamec**

**Bakalářská práce**

**2018**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Adamec**

Osobní číslo: **D13141**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy: Technologie a řízení dopravních systémů**

Název tématu: **Využití SW OpenTrack pro simulaci provozu metra**

Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

## Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úvod

1 Analýza linky C pražského metra a potřebných vstupních dat pro SW OpenTrack

2 Simulace provozu pomocí matematického modelu jízdy vlaku a SW OpenTrack

3 Porovnání simulace se skutečným záznamem jízdy a zhodnocení možnosti využít SW OpenTrack pro simulaci provozu metra

Závěr


Rozsah grafických prací: 3 - 4  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:


1. DRDLA, Pavel. Osobní doprava regionálního a nadregionálního významu. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2014. ISBN 978-80-7395-787-2.
2. ZELENKA, Jaromír, Tomáš MICHÁLEK a Martin KOHOUT. Mechanika dopravy: studijní opora. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, dislokované pracoviště Česká Třebová, 2013. ISBN 978-80-7395-739-1.
3. HUERLIMANN, Daniel. OpenTrack: Simulation of Railway Networks. Version 1.3. Zurich: ETH Zurich Institute for Transport Planning and Systems.
4. D 1/1 - Návěstní předpis pro metro. Dopravní podnik - Metro, o.z., 1999.

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. února 2018**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2018**

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

L.S.

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

V Pardubicích dne 3. února 2018

Prohlašuji:

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

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2018

Tomáš Adamec

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zabývá možností simulace provozu pražského metra na lince C v softwaru OpenTrack a porovnává ji s matematickým modelem pohybu vlaku a skutečným záznamem jízdy vozidla. V úvodní části je popsána linka C a její specifika. Dále se práce věnuje matematickému modelu pohybu vlaku, silám, které jízdu vozidla ovlivňují, a popisu funkcí softwaru OpenTrack včetně vstupních dat potřebných k vytvoření simulačního modelu. V poslední části práce jsou porovnány výsledky výpočtu, simulace a skutečného průběhu jízdy vozidla.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Praha, metro, trasa C, OpenTrack, simulace

## **TITLE**

Use of OpenTrack Software for Metro Network Simulation

## **ANOTATION**

This bachelor thesis deals with the options of simulation of operation of the Prague metro line C in the OpenTrack application. The aim is to the simulation compare with mathematical model of train motion and with the real record of vehicle driving. In the introductory section, line C and its specifics are described. Further the thesis deals with mathematical model of the train motion; the forces that influence the vehicle driving, and description of the OpenTrack software features, including the input data required to create the simulation model. The last part compares the results of the calculation, simulation and real course of the vehicle.

## **KEYWORDS**

Prague, metro, line C, OpenTrack, simulation

# OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 PODZEMNÍ DRÁHA V PRAZE .....</b>	<b>11</b>
1.1 Historie linky C .....	13
1.2 Infrastruktura linky C .....	15
1.3 Zabezpečovací zařízení linky C .....	16
1.4 Vozidla linky C .....	17
<b>2 METODY ZJIŠŤOVÁNÍ JÍZDNÍ DOBY.....</b>	<b>19</b>
2.1 Matematický model pohybu vlaku .....	19
2.1.1 Pohybová rovnice vlaku .....	19
2.1.2 Jízdní odpory .....	20
2.2 Software OpenTrack .....	23
2.2.1 Parametry infrastruktury .....	23
2.2.2 Parametry vozidel.....	24
2.2.3 Jízdní řád .....	24
2.3 Záznam jízdy vozidla .....	24
<b>3 VÝSLEDKY ZJIŠŤOVÁNÍ JÍZDNÍ DOBY .....</b>	<b>26</b>
3.1 Výsledky výpočtu pomocí matematického modelu pohybu vlaku .....	26
3.2 Výsledky simulace softwarem OpenTrack .....	28
3.3 Skutečný průběh jízdy vozidla .....	29
<b>4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>32</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>33</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>35</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Plán sítě metra .....	12
Obrázek 2 Schéma trasy C .....	14
Obrázek 3 Tachogram úseku Letňany – Prosek, výpočet a simulace .....	28
Obrázek 4 Tachogram úseku Letňany – Prosek, záznam jízdy.....	29

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Výpočet jízdní doby v úseku Letňany – Prosek .....	27
Tabulka 2 Jízdní doby Letňany – Háje .....	30



## SEZNAM ZKRATEK

ARS	avtomatičeskoje regulirovanie skorosti (automatická regulace rychlosti)
ATO	automatic train operation
ATP	automatic train protection
AVV	automatické vedení vlaku
BD	Budějovická
CMC	conduite manuelle controlee
CML	conduite manuelle libre
CMP	conduite manuelle plafonee
ČKD DS	Českomoravská-Kolben-Daněk Dopravní systémy
FRC	Florenc C
HA	Háje
HN	Hlavní nádraží
CH	Chodov
IP	I. P. Pavlova
KB	Kobylisy
KC	Kačerov
LA	Ládví
LT	Letňany
LVZ	liniový vlakový zabezpečovač
MUC	Muzeum C
NH	Nádraží Holešovice
OP	Opatov
P+R	Park and Ride
PA	Pilotage automatique
PN	Pankrác
PP	Pražského povstání
PR	Prosek
RO	Roztyly
SW	software
SZ	Střížkov
VL	Vltavská
VY	Vyšehrad

# ÚVOD

Rychlodráhy plní důležitou roli ve veřejné dopravě velkých měst. Jsou budovány kvůli výhodám železniční dopravy, především pro velký objem přepravených cestujících a úplnou segregaci od silniční dopravy. Tato výhoda se projeví v centrech měst, kde dochází k častým dopravním kongescím.

Je potřeba vybudovat dopravní systém, na který jsou kladeny rozdílné nároky než na železnici určenou k přepravě na velké vzdálenosti. Rychlodráhy mají mezi stanicemi menší vzdálenosti a odjezdy jednotlivých spojů následují po kratších intervalech. Stanice jsou umístěny co nejbližší zónám s hustým osídlením, velkým podnikům a veřejným místům, jako jsou městská centra, úřady, obchody a divadla, aby taková doprava byla pro cestující atraktivní a linka byla využita.

Tato bakalářská práce se věnuje již zmíněným rozdílům mezi železnicí určenou pro přepravu na velké vzdálenosti a rychlodráhou pro dopravní obsluhu v rámci jednoho města. Jsou zde analyzovány specifické vlastnosti provozu podzemní dráhy, konkrétně na lince C pražského metra. Práce se také věnuje matematickému modelu pohybu vlaku a analyzuje, jaké faktory ovlivňují jízdu vlaku.

**Cílem práce je zjistit, zda je možné software OpenTrack určený pro simulaci železničního provozu využít i k simulaci provozu metra v Praze.** Je potřeba porovnat výsledky simulace se záznamy jízd vozidel a vyhodnotit, zda se jízdní profily shodují.

Systém pro automatizaci řízení vlaků na lince A pracuje s plánovaným časem příjezdu do následující stanice a řídí rychlost jízdy vlaku tak, aby spoj přijel právě včas. Pro každý vlak je zvlášť modelována brzdňá křivka a jízdní doby se pak mohou lišit.

Na lince B bude v blízké době instalováno nové zabezpečovací zařízení a systém automatického vedení vlaku vycházející ze systému užívaného na lince A. Je proto bezpředmětné zabývat se systémem, který bude brzy nahrazen.

Automatické vedení vlaku na lince C funguje takovým způsobem, že by měl každý spoj jet v jednom konkrétním mezistaničním úseku stejnou dobu. Záznam z takové jízdy je vhodnější pro porovnání se simulací provedenou softwarem OpenTrack a z tohoto důvodu byla pro tuto práci zvolena právě linka C.

# 1 PODZEMNÍ DRÁHA V PRAZE

S rozvojem měst a růstem počtu obyvatel roste i poptávka po rychlé, čtené a spolehlivé dopravě. Expanze individuální automobilové dopravy naráží na nedostatečnou kapacitu pozemních komunikací, čímž dochází ke vzniku častých dopravních kongescí. Negativní vliv má silniční doprava i na životní prostředí. Proto je snaha vyloučit individuální dopravu z center měst. To vyžaduje nahrazení kvalitním dopravním systémem vyhovujícím objemným přepravním nárokům. Zde je příležitost pro kolejovou dopravu. Jednou z možností je tramvajová doprava, která ale může být negativně ovlivňovaná okolním provozem. Ideálním řešením tohoto problému jsou rychlodráhy, které jsou od okolního provozu zcela oddělené.

Trasu rychlodráhy je možné vést třemi odlišnými způsoby. Pod úrovní terénu jsou vedené podzemní dráhy, v úrovni terénu městské a příměstské rychlodráhy a nad terénem nadzemní nebo visuté dráhy.

Pod úrovní terénu je částečně vedená i podpovrchová tramvaj. Tu však nelze zařadit mezi rychlodráhy. Jedná se o dopravní síť, která je v některých místech vedena pod povrchem a ostatní úseky trasy jsou vedeny v úrovni terénu většinou spolu s ostatními druhy dopravy. Podpovrchová tramvaj tak není zcela segregovaná od ostatní dopravy, která pak může narušit plynulost provozu tramvaje v celé trase (1).

O vybudování podpovrchové tramvaje nebo podzemní dráhy v Praze se diskutovalo již na přelomu 19. a 20. století. První návrh týkající se stavby podzemní dráhy podal v roce 1898 Ladislav Rott. V roce 1912 jej následoval Ing. Bohuslav Vondráček se svým projektem podpovrchové tramvaje. Pro velké finanční náklady však byly oba návrhy zamítnuty. Další studie týkající se vybudování podzemní dráhy vznikaly i v meziválečném období a tu nejvýznamnější předložili v roce 1926 Ing. Vladimír List a Ing. Bohumil Belada. Ani tento návrh, stejně jako několik dalších, nebyl realizován (2).

Až v roce 1965 vláda rozhodla o vybudování podpovrchové tramvaje a v lednu následujícího roku byla zahájena stavba. V roce 1967 se původní záměr vybudovat systém podpovrchové tramvaje změnil a stavba pokračovala s novým cílem – vybudovat podzemní dráhu (metro). V roce 1971 byla zprovozněna část depa Kačerov včetně zkušební tratě a 2. ledna 1974 byl zahájen zkušební provoz prvního úseku metra, který byl součástí linky C (3, 4).

Síť linek pražského metra se v průběhu let postupně rozšiřovala. První postavené úseky se nacházely v centru Prahy a jednotlivé tratě se pak dále rozšiřovaly směrem

k obydleným zónám na okraji města. Dnes má pražské metro tři linky označené A, B a C o celkové délce přesahující 65 km. Původní konečné stanice, na které později navázaly nové úseky, jsou i nadále užívány k obrátům souprav nebo k jejich odstavení přes noc při přepravní výluce. Ta probíhá od 1 do 4 hodin a v této době se provádí údržba infrastruktury. Tyto stanice, ve kterých se nachází koleje pro obrat nebo odstavení souprav, je možné využít i v běžném provozu ke zkrácení tras některých spojů (pásmový provoz) a při výlukách, kdy je na části linky provoz přerušen např. z důvodu opravy tratě.

U některých stanic, které jsou umístěné zpravidla na okraji města, jsou zbudována záchytná parkoviště systému Park and Ride (P+R). Slouží obyvatelům ze vzdálenějších míst, kteří využijí individuální automobilovou dopravu pro přiblížení se ke stanici metra, zde svůj automobil zaparkují a do centra města pokračují veřejnou hromadnou dopravou. Tento systém přispívá k omezení počtu osobních automobilů ve městě a tím ke zlepšení kvality životního prostředí. Umístění záchytných parkovišť je vyznačeno na obrázku 1.



Obrázek 1 Plán sítě metra

Zdroj: (5), úprava autor

Tato kapitola je dále zaměřena na analýzu linky C. V první části je popsáno postupné otevírání jednotlivých úseků. Jsou uvedena jejich označení, délka a stanice, mezi kterými byly úseky tratě vybudovány. V druhé části jsou zmíněny způsoby výstavby tunelů a stanic. Třetí část se zabývá staničním, traťovým a vlakovým zabezpečovacím zařízením. Je zde popsán systém pro automatizaci řízení vlaků včetně jednotlivých režimů, ve kterých pracuje. V poslední části této kapitoly je uvedeno, jaké soupravy zajišťovaly provoz na lince C od zahájení provozu do současnosti. U nyní nasazovaných souprav jsou uvedeny parametry potřebné k vytvoření simulačního modelu.

## 1.1 Historie linky C

Prvním úsekem pražského metra uvedeným do provozu 9. 5. 1974 je část linky C, která vede mezi stanicemi Sokolovská (v roce 1990 přejmenována na Florenc) a Kačerov. Tento úsek s označením I.C má 9 stanic a je dlouhý 6,6 km. V roce 1978 následovalo zprovoznění úseku linky A mezi stanicemi Leninova (dnes Dejvická) a Náměstí Míru s přestupní stanicí Muzeum pro přestup mezi linkami A a C.

Dne 7. 11. 1980 byl otevřen úsek II.C se čtyřmi stanicemi dlouhý 5,3 km, který vedl ze stanice Kačerov do stanice Kosmonautů (dnes Háje). V prosinci téhož roku došlo i k prodloužení trasy A z Náměstí Míru do stanice Želivského.

Další úsek linky C (úsek III.C) se dvěma novými stanicemi byl uvedený do provozu 3. 11. 1984. Úsek III.C dlouhý 2,2 km vedl ze stanice Sokolovská (Florenc) do stanice Fučíkova (dnes Nádraží Holešovice). V dalších letech docházelo k otevření nového úseku linky A a k postupnému zprovoznění celé trasy B. Dne 22. 2. 1990 bylo přejmenováno celkem 13 provozovaných stanic metra, z toho 8 jich bylo na trase C. Nové i původní názvy stanic jsou uvedeny na obrázku 2.

Až po téměř dvaceti letech je znovu prodloužena linka C o další 4 km. Úsek IV.C1 se dvěma stanicemi, který vede z Holešovic do stanice Ládví, byl otevřen 25. 6. 2004. V roce 2006 byla na lince A zprovozněna stanice Depo Hostivař.

Dne 8. 5. 2008 byl uveden do provozu poslední úsek linky C ze stanice Ládví do stanice Letňany. Úsek označovaný jako IV.C2 je dlouhý 4,6 km a má tři stanice. Nejnovější úsek pražského metra je na trase A ze stanice Dejvická do stanice Nemocnice Motol otevřený v roce 2015 (4, 6).



Obrázek 2 Schéma trasy C

Zdroj: (4), zpracování autor

## 1.2 Infrastruktura linky C

Celá trasa C pražského metra je dlouhá 22,4 km a je na ní zbudováno 20 stanic, z toho dvě jsou přestupní. Všechny stanice jsou uvedeny na obrázku 2. Ve stanici Florenc je možné přestoupit na linku B a ve stanici Muzeum na linku A. Přestup cestujících je umožněn pomocí chodeb, které spojují oba tunely tras metra křížících se v různých hloubkách.

Stanice Letňany, Ládví, Nádraží Holešovice, Florenc, Pražského povstání a Háje umožňují obrat souprav nebo jejich odstavení. Ze stanice Kačerov navíc odbočuje trať do depa Kačerov, kde probíhá pravidelná údržba souprav.

Linka C je traťovými spojkami propojena s ostatními linkami. S linkou B je propojena tunelem spojujícím obratové koleje obou přestupních stanic Florenc C a Florenc B. Před stanicí I. P. Pavlova ze směru od stanice Vyšehrad odbočují dva tunely, pro každý směr zvlášť, vedoucí ke stanici Náměstí Míru na lince A.

V běžném provozu není možné traťové spojky využít. Vzhledem k různým zabezpečovacím zařízením na jednotlivých trasách pražského metra jsou soupravy metra vybaveny mobilní částí zabezpečovače té jedné linky, ke které jsou přiřazeny, a nemohou obsluhovat jinou linku. Traťové spojky mohou být využity k manipulačním jízdám nebo jízdám pracovních strojů v době přepravní výluky.

Stanice na lince C byly vybudované pomocí různých technologií. Dvě stanice jsou povrchové (stanice Vyšehrad je umístěná v předmostí Nuselského mostu a stanice Střížkov je založená v jámě), jedna je ražená (stanice Kobylisy v hloubce 31,5 m) a ostatní stanice jsou hloubené. Kromě stanic Pražského povstání, Kačerov a Opatov jsou všechny bezbariérově přístupné. Stanice Hlavní nádraží, Vyšehrad, Střížkov a Prosek mají boční nástupiště, ostatní mají nástupiště ostrovní.

Tunely jsou dvoukolejné nebo jednokolejné pro každý směr zvlášť. Většina tunelů je ražená, menší část je hloubená a na dvou místech trať vede uvnitř mostu. Jedním je Nuselský most překonávající Nuselské údolí a druhým je most přes železniční trať a zkušební trať metra na Kačerově. V mezistaničních úsecích Kobylisy – Nádraží Holešovice a Vltavská – Florenc vede trasa metra pod dnem řeky Vltavy (4, 6).

Maximální podélný sklon koleje, který se na trati nachází, je 40 ‰ a minimální sklon je zpravidla 3 ‰ kvůli odvodnění tunelů. Tyto mezní hodnoty sklonu na trati v tunelu na dráze speciální jsou určeny vyhláškou Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších předpisů (7). Vyhláška dále nařizuje pro koleje ve stanici podélný jednostranný sklon 3 ‰. Výjimkou je stanice Vyšehrad,

kde první kolej ve směru do stanice Letňany stoupá se sklonem 0,117 ‰ a druhá kolej je vodorovná. Nejmenší poloměr oblouku na lince C je 350 m (8).

Základní rychlost, která se nesmí v běžném provozu překročit, je 80 km/h. Ve všech stanicích je traťová rychlost 60 km/h. V některých obloucích prvního stavebního úseku je traťová rychlost 65 km/h. Tato omezení vyplývají ze směrového vedení tunelů původně projektovaných pro trasu podzemní tramvaje (9).

Před stanicí Ládví ve směru do stanice Háje je přes výhybky zavedena pomalá jízda 40 km/h. Rychlost je omezena z důvodu nařízení hygienické stanice kvůli snížení hluku šířícího se do bytových domů, které stojí v blízkosti stanice Ládví. Ta byla vybudována v hloubce 7 metrů pod úrovní terénu (10).

### 1.3 Zabezpečovací zařízení linky C

Na lince C je v současnosti instalovaný liniový vlakový zabezpečovač (LVZ) a zařízení automatického vedení vlaku (AVV) Pilotage automatique PA 135 od francouzské společnosti Matra Transport International, která se v roce 2001 stala součástí společnosti Siemens Transport Systems. Tento zabezpečovač nahradil původní sovětský vlakový zabezpečovač ARS. Zařízení PA 135 zastává funkce systémů ATP – automatic train protection (LVZ) a ATO – automatic train operation (AVV).

Pro činnost zařízení PA 135 jsou nezbytné tři součásti.

**Stacionární část** přijímá informace ze staničního a traťového zabezpečovacího zařízení o stavu kolejových obvodů, absolutních návěstidel, výhybek a informace ze zařízení dálkového ovládání zabezpečovacího zařízení týkající se pokynů pro jízdu vlaků. Na základě těchto informací vyšle stacionární část systému signál pro řízení nebo kontrolu jízdy vlaku do programového pásu.

**Programový pás** je anténní systém umístěný mezi kolejnicemi po celé délce tratě včetně obratových a odstavných kolejí. Programový pás má za úkol nepřetržitě přenášet signál do mobilní části systému umístěné na čelních vozech souprav. To je zajištěno dvěma vodiči napájenými elektrickým proudem o frekvenci 135 kHz, které se po určitých vzdálenostech kříží. Z požadované rychlosti jízdy pak vyplývá vzdálenost těchto překřížení, která mají být projeta vždy za stejnou dobu. Základní časový interval stanovený programovým pásem je 300 ms. Vzdálenost křížení vodičů např. při rychlosti 80 km/h je pak 6,66 m. Informace ze stacionární části jsou přenášeny pomocí fázové modulace nosné vysoké frekvence 135 kHz nízkými frekvencemi v pásmu 1 až 2,6 kHz.



**Mobilní část** pomocí vysokofrekvenčních snímačů umístěných na čelních vozech souprav přijímá signál z programového pásu a sleduje interval mezi překříženími vodičů, podle kterého zjišťuje požadovanou rychlost. Se zvětšující se vzdáleností překřížení se rychlost zvyšuje a naopak. Na základě informací získaných z programového pásu zajišťuje mobilní část zařízení PA 135 funkce liniového vlakového zabezpečovače a automatického vedení vlaku.

Systém LVZ zajišťuje pomocí kontroly směru a rychlosti pohybu vozidel rozestupy mezi jednotlivými vlaky. V případě možného ohrožení bezpečnosti provozu automaticky zastaví jedoucí vlak bez potřeby zásahu strojvedoucího. Dále zabráňuje otevření dveří ve stanici na opačnou stranu, než je nástupiště, nebo mimo místo vyhrazené pro zastavení vlaku ve stanici s rozmezím 5 metrů.

Systém AVV zajišťuje automatické řízení rychlosti vlaku a cílové brzdění. Jízda vlaku je možná v jednom ze čtyř režimů.

Režim automatického vedení PA (Pilotage automatique) zajišťuje zabezpečení (ATP) i automatizaci (ATO) jízdy vlaku. Úkolem strojvedoucího pak je pouze stisknutím tlačítka dát pokyn k odjezdu ze stanice, ve stanici otevřít a zavřít dveře a spustit hlášení informačního systému.

Režim vlakového zabezpečovače CMC (Conduite manuelle controlee) ponechá v činnosti pouze vlakový zabezpečovač a strojvedoucí řídí jízdu vlaku ručně.

Režim tlačítek bdělosti CMP (Conduite manuelle plafonee) omezuje rychlost jízdy na 30 km/h a vyžaduje stisknutí tlačítek bdělosti strojvedoucím. Ten řídí vlak ručně a bez kontroly systémem LVZ.

Při režimu CML (Conduite manuelle libre) je zařízení pro zabezpečení a automatizaci jízdy vypnuto a strojvedoucí řídí vlak samostatně bez jakékoliv kontroly (11).

## **1.4 Vozidla linky C**

Od otevření prvního úseku linky C v roce 1974 byl provoz zajištěn soupravami typu Ečs vyrobenými v Mytiščínském strojírenském závodě v bývalém Sovětském svazu. Od roku 1990 byly již zastaralé soupravy postupně vyřazovány až do roku 1997, kdy byl jejich provoz ukončen.

Do doby, než byly dodány nové soupravy, provoz na lince dočasně zajišťovaly soupravy typu 81-71 též vyrobené v Mytiščínském strojírenském závodě. Po modernizaci, kterou soupravy procházely v letech 1996–2011 ve Škodě Transportation v Plzni, jsou označovány jako typ 81-71M.

Nové soupravy označované M1 vznikly v konsorciu ČKD Dopravní systémy, později jako Siemens Kolejová vozidla. První soupravy byly vyrobeny v roce 1998 a cestující se s nimi mohou svézt od roku 2000. Od roku 2005 linku C obsluhují pouze soupravy typu M1. Do roku 2006 bylo dodáno 48 souprav a v roce 2011 bylo zařazeno do provozu dalších 5 souprav. Celkem je tedy k dispozici 53 souprav M1 pro linku C. Soupravy typu 81-71M obsluhují linky A a B (4, 12).

Typ M1 je pětivozová v provozu nerozpojitelná souprava sestavená ze tří typů vozů. Jsou to dva čelní vozy M1.1 se stanovištěm strojvedoucího, vlakovým zabezpečovačem, vlakovými bateriemi a statickým měničem k transformaci stejnosměrného napětí 750 V pro dobíjení baterií, napájení palubní sítě a pohonu asynchronních trakčních motorů, dva vozy M1.2 s kompresorem a jeden vůz M1.3 s centrálním řídicím počítačem (12). Všechny vozy v soupravě jsou hnací. V pražském metru je pro napájení souprav používána přívodní kolejnice se spodním odběrem a se jmenovitým napětím 750 V stejnosměrného proudu. Čelní vozy včetně spřáhel jsou dlouhé 19 521 mm a vložené vozy 19 206 mm. Délka celé pětivozové soupravy přes spřáhla je 96 660 mm. Prázdná souprava má hmotnost 133,2 t a maximální zátěž je 109,8 t při 8 stojících cestujících na m<sup>2</sup> a hmotnosti jednoho cestujícího 75 kg. Celková hmotnost maximálně obsazené soupravy je 243 t. Další údaje o soupravě týkající se především trakční charakteristiky a jízdních odporů jsou uvedeny v příloze A: Tabulka garantovaných parametrů M1 (4, 13).

Soupravy typu M1 jsou vybaveny systémem korekce zátěže. Pomocí měření stlačení primárního vypružení zjišťuje zatížení vozů. Na základě toho systém korekce zátěže reguluje tažnou a brzdou sílu tak, aby každý jednotlivý vůz soupravy jel i při různém zatížení se stejným zrychlením či odrychlením. Tabulkou udávaná křivka maximální garantované trakční síly je tak závislá kromě rychlosti i na zatížení soupravy, respektive jednotlivých vozů. Při rychlostech od 0 do 30 km/h se maximální garantovaná trakční síla pohybuje v rozmezí od 208,67 kN u prázdné soupravy do 356,66 kN při plném obsazení soupravy (tj. 8 os/m<sup>2</sup>). Se zvyšující se rychlostí garantovaná trakční síla i zrychlení klesá. Zatížení soupravy tak díky korekci tažné i brzdě síly nemá vliv na zrychlení a odrychlení (10, 13).

Další funkcí systému korekce zátěže je udržování podlahy vozidla ve stále stejné výšce. Jako sekundární vypružení jsou použity vzduchové pružiny. Ty umožňují tlakem vzduchu regulovat jejich výšku a tím udržovat podlahu vozu v jedné rovině s nástupištěm i při měnícím se zatížení vozu (10).

## 2 METODY ZJIŠŤOVÁNÍ JÍZDNÍ DOBY

Tato bakalářská práce se věnuje třem metodám, pomocí kterých je možné výpočtem nebo měřením zjistit jízdní dobu vlaku (soupravy metra). Za účelem ověření, že pomocí softwaru OpenTrack lze simulovat provoz na lince C pražského metra, je jízdní doba vypočtená tímto způsobem porovnávána s dalšími dvěma způsoby zjišťování jízdní doby. Jedním je výpočet pomocí matematického modelu pohybu vlaku s použitím pohybové rovnice vlaku tak, jak ji popisuje studijní opora Mechanika dopravy od autorů Jaromíra Zelenky, Tomáše Michálka a Martina Kohouta (14). Další metodou, se kterou je simulace porovnávána, je záznam skutečné jízdy vlaku v režimu automatického vedení vlaku. Požadavkem je, aby průběh jízdy vlaku simulovaný softwarem OpenTrack byl co nejvíce podobný skutečné jízdě vlaku.

### 2.1 Matematický model pohybu vlaku

Pro potřeby výpočtu jízdní doby se uvažuje pohyb vozidla (vlaku) s jedním stupněm volnosti. S vozidlem se při tom pracuje jako s hmotným bodem. V úvahu pak připadají síly tíhové a síly, které na vozidla působí ve směru nebo proti směru pohybu. Těmi jsou síly tažné, brzdné a odporové. Vliv sil na pohyb vozidel je vyjádřen pohybovou rovnicí vlaku (14).

#### 2.1.1 Pohybová rovnice vlaku

Základní tvar pohybové rovnice vlaku můžeme vyjádřit takto:

$$m_{vl} \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl}, \quad (1)$$

kde:

$m_{vl}$  je celková hmotnost vlaku [kg],

$\ddot{x}$  je zrychlení vlaku ve směru jízdy [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$F_{ok}$  je celková tažná síla vlaku na obvodu kol [N],

$B_{vl}$  je celková brzdná síla vlaku na obvodu kol [N],

$O_{vl}$  je celkový jízdní (vozidlový a traťový) odpor vlaku [N] (14).

Některé části vozidel vykonávají během jízdy také pohyb rotační. Při jízdě vlaku se projeví moment setrvačnosti rotačních těles, jako jsou dvojkolí, rotory trakčních motorů a další součásti pohonu hnacích vozidel. Hmotnost vlaku je proto potřeba nahradit setrvačnou (redukovanou) hmotností vlaku. Základní tvar pohybové rovnice (1) se tím upraví na obecný tvar pohybové rovnice takto:

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl}, \quad (2)$$

kde:

$\rho_{vl}$  je součinitel rotačních (rotujících) hmot (14).

V případě soupravy M1 je tabulkou garantovaných parametrů (příloha A) přímo udána hodnota hmotnosti rovnající se rotačním hmotám, která je 19 360 kg. Redukovaná hmotnost vlaku se pak vypočítá sečtením hmotnosti vlaku a hmotnosti rovnající se rotačním hmotám. Vztah (2) je možné přepsat do následující podoby:

$$(m_{vl} + m_{rh}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B_{vl} - O_{vl}, \quad (3)$$

kde:

$m_{rh}$  je hmotnost rovnající se rotačním hmotám [kg] (14).

### 2.1.2 Jízdní odpory

Proti směru pohybu vlaku působí odporové síly. Jejich velikost závisí zejména na charakteristice vozidla a trati, po které se pohybuje. Jízdní odpory se proto dělí do dvou skupin na vozidlové jízdní odpory a traťové jízdní odpory.

**Vozidlové jízdní odpory** jsou závislé na konstrukci a technickém stavu kolejového vozidla, resp. vlakové soupravy (14). Jsou tři druhy vozidlových odporů:

- odpor z valení,
- odpor v ložiskách,
- odpor prostředí (aerodynamický odpor).

Součtem těchto vozidlových odporů získáme celkový vozidlový odpor. Tento odpor se často udává v měrném tvaru (14). Fyzikální jednotkou měrného vozidlového odporu je [N/kN] a pro jeho výpočet platí vztah:

$$o_v = \frac{O_v}{M_v \cdot g}, \quad (4)$$

kde:

$o_v$  je měrný vozidlový odpor [N/kN],

$O_v$  je celkový vozidlový odpor [N],

$M_v$  je hmotnost vozidla [t],

$g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] (14).

Pro účely mechaniky dopravy je možné použít přibližnou hodnotu tíhového zrychlení  $g \doteq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Vzhledem k tomu, že závislost celkového vozidlového odporu na rychlosti

jízdy vozidla nelze stanovit výpočtem, ale pouze odhadnout, je tato přibližná hodnota tíhového zrychlení dostačující. Závislost měrného vozidlového odporu na rychlosti je na základě výpočtu z dat získaných tzv. výběhovou zkouškou dána empirickým vztahem:

$$o_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2, \quad (5)$$

kde:

$a$  je člen nezávislý na rychlosti, který představuje odpor z valení a odpor v ložiskách,

$b$  je odpor z neklidné jízdy,

$c$  je aerodynamický odpor,

$V$  je rychlost [km/h] (14).

Souprava M1 má stanoveny dva vztahy pro výpočet vozidlového jízdního odporu. První pro jízdu výběhem:

$$o_v = 1,16 + 0,0088 \cdot V + \frac{0,222 \cdot V^2}{m}, \quad (6)$$

a druhý pro jízdu trakcí nebo brzdou:

$$o_v = 1,16 + 0,0088 \cdot V + \frac{0,156 \cdot V^2}{m}, \quad (7)$$

kde:

$m$  je celková hmotnost vlaku se zátěží [t].

Díky tomu, že je provoz na lince zajištěn jedním typem souprav, jsou vozidlové jízdní odpory pro každý vlak téměř stejné. Systém korekce zátěže navíc zajišťuje, že se změnou zátěže vlaku je regulována tažná a brzdná síla a výsledné zrychlení i odrychlení zůstává stejné. Pro všechny vlaky tak lze použít stejnou brzdnou křivku a toho využívá zabezpečovací zařízení na lince C, kdy je programovým pásem pevně stanovena požadovaná rychlost v konkrétním místě na trati.

**Traťové jízdní odpory** jsou ovlivněny železniční infrastrukturou, tedy traťovými poměry (14). Jsou tři druhy traťových odporů:

- odpor ze sklonu koleje,
- odpor z jízdy obloukem,
- odpor z jízdy tunelem.

Součtem těchto traťových odporů získáme celkový traťový odpor.

Odpor ze sklonu koleje vzniká při jízdě vlaku do stoupání a může nabývat i záporných hodnot při jízdě na spádu. Odpor tak závisí na velikosti sklonu koleje a hmotnosti vozidel. Měrný odpor ze sklonu koleje lze vyjádřit takto:

$$o_s = \frac{O_s}{M_v \cdot g} = s, \quad (8)$$

kde:

$o_s$  je měrný odpor ze sklonu koleje [N/kN],

$O_s$  je odpor ze sklonu koleje [N],

$M_v$  je hmotnost vlaku [t],

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

$s$  je sklon [‰] (14).

Odpor z jízdy obloukem vzniká při průjezdu vozidla obloukem koleje, při kterém dochází ke vzniku skluzových a řídicích sil mezi koly a kolejnicemi. Odpor z jízdy obloukem je velmi proměnlivý, a proto je prakticky nemožné určit jej exaktně (14). Měrný odpor jízdy obloukem je vyjádřen empirickým vztahem:

$$o_R = \frac{a}{R - b}, \quad (9)$$

kde:

$o_R$  je měrný odpor jízdy obloukem [N/kN],

$R$  je poloměr oblouku [m],

$a$  je konstanta nabývající hodnot  $a = 650$  pro  $R \geq 500$  m,  $a = 500$  pro  $R < 500$  m,

$b$  je konstanta nabývající hodnot  $b = 55$  pro  $R \geq 500$  m,  $b = 30$  pro  $R < 500$  m (14).

Odpor z jízdy tunelem vzniká změnou proudění vzduchu kolem vozidel při jízdě vlaku v tunelu. Měrný odpor z jízdy tunelem je stanoven empirickými vztahy na 2 N/kN při jízdě jednokolejným tunelem a 1 N/kN při jízdě dvoukolejným tunelem (14).

Mezi poměrně velkými prostory stanic je trasa vedena v uzavřených jednokolejných nebo dvoukolejných tubusech, a to i v případě, že trať nevede pod povrchem, ale je vedena uvnitř mostu. Pouze zkušební trať a kolejíště depa jsou umístěné na povrchu mimo tunely. Odpor z jízdy tunelem tak působí na soupravu téměř po celé trase. Naopak výhodou vedení tratě tunely je, že do provozu nezasahují nepříznivé povětrnostní vlivy a nejsou ovlivněny adhezní vlastnosti. Voda ovlivní provoz metra pouze při povodních, když dojde k zatopení tunelů skrz přístup do stanic. V takovém případě následuje úplné zastavení provozu v postiženém úseku.

## 2.2 Software OpenTrack

Software OpenTrack umožňuje vytvořit model pro simulaci železničního provozu. Vznikl v polovině 90. let 20. století jako výzkumný projekt Švýcarského spolkového technologického institutu v Curychu (15).

K vytvoření simulačního modelu je potřeba zadat vstupní data, která lze rozdělit do tří kategorií: data o infrastruktuře, data o vozidlech a data jízdního řádu. Na základě zadaných vstupních dat aplikace vytvoří simulaci jízdy vozidel po železniční síti dle jízdního řádu v požadovaném časovém úseku a zobrazí animaci, na níž je možné pohyb vlaků a činnost zabezpečovacího zařízení sledovat.

Výstupy jsou v grafické nebo textové podobě zaměřené na vlak, stanici či dopravní síť celkově. Využití nachází při potřebě analyzovat železniční infrastrukturu, vozidla a zabezpečovací systémy. OpenTrack se tak stává cenným nástrojem při konstrukci jízdního řádu a při testování, jaký mají vliv poruchy vozidel, infrastruktury a zpoždění vlaků. Pomáhá zjistit propustnost tratí a stanic nebo určit spotřebu energie při jízdě vlaku.

### 2.2.1 Parametry infrastruktury

Prvním druhem vstupních dat, která se musí do aplikace OpenTrack zadat, jsou data o infrastruktuře. Ta se zadávají prostřednictvím speciálního dvoubodového grafu.

Každý vrchol grafu, tzv. dvoubod, představuje místo na trati, kde dochází ke změně některého z parametru popisujícího trať. Tyto body také umožňují umístit zde návěstidlo, začátek a konec nástupiště, nebo je využít pro připojení dvou kolejí pro vytvoření výhybky. Využívány jsou i v případě potřeby vymezení kolejových obvodů pro účely činnosti zabezpečovacího zařízení. Ke každému dvoubodu je nutné přiřadit jednu kilometrickou polohu nebo dvě různé v případě potřeby změny staničení.

Vrcholy grafu jsou propojené hranami, které představují jednotlivé úseky koleje. Podle kilometrických poloh přiřazených dvoubodům, které kolej spojuje, je vypočítána její délka. U každé hrany se zadává sklon koleje, poloměr oblouku a traťová rychlost. Pokud je trať vedena tunelem, zadává se, zda je tunel jednokolejný nebo dvoukolejný a další jeho parametry (16).

Zdrojem dat pro zadání parametrů infrastruktury je Nákrešný přehled trasy C (8).

### **2.2.2 Parametry vozidel**

Dalším druhem vstupních dat jsou parametry vozidel. Nejdříve se zadávají informace o jednotlivých hnacích vozidlech či jednotkách. Těmi jsou délka, hmotnost, součinitel rotačních hmot, druh trakce a trakční charakteristika, tj. závislost tažné síly na rychlosti jízdy.

V druhé fázi se zadávají data týkající se vlaku. V první řadě je potřeba vybrat již zadané hnací vozidlo a zadat celkovou hmotnost a délku tažených vozidel. V našem případě byla souprava metra zadána jako celek již na začátku, a proto místo pro zadání informací o tažených vozidlech zůstane prázdné. Následuje výběr rovnice pro výpočet vozidlového jízdního odporu a doplnění hodnot, vyplnění brzdové charakteristiky vlaku a dalších parametrů ovlivňujících zrychlení a odrychlení (16).

Zdrojem vstupních dat pro zadání parametrů soupravy je Tabulka garantovaných parametrů M1 (13).

### **2.2.3 Jízdní řád**

Třetím druhem vstupních dat jsou informace o tom, kudy má vlak jet a v jaký čas. Nejdříve se zadává jízdní cesta. Vzhledem k tomu, že vlak metra jede pořád po jedné koleji určené pro daný směr jízdy a kromě obratu na konci trasy nikde neodbočuje, není potřeba definovat další variantní cesty. Zadávání jízdní cesty se tím výrazně zjednodušuje. Po zvolení trasy a přiřazení soupravy je již možné zadat jednotlivé časy příjezdů a odjezdů. Pro každou stanicí je možné zadat minimální požadovanou dobu pobytu, po kterou musí vlak ve stanici stát a až po jejím uplynutí může pokračovat v jízdě (16).

Po zadání všech výše popsaných údajů je možné spustit simulaci. Po ukončení simulace software OpenTrack automaticky uloží výstupní data ve formátu textového dokumentu do předem zvolené složky.

## **2.3 Záznam jízdy vozidla**

Podle vyhlášky Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, ve znění pozdějších předpisů (17), musí být každé stanoviště strojvedoucího vybaveno registračním rychloměrem. Oba čelní vozy každé soupravy typu M1 jsou proto vybaveny tachografem RRM-9. Ten zaznamenává čas, rychlost, zrychlení a signály vycházející ze stavu řídicích kontrolérů, přepínačů, tlačítek, řídicího systému vlaku a zabezpečovacího zařízení zapisované pomocí binárního kódu jako stav 0 nebo 1. Zaznamenané signály vyjadřují např. zvolený režim zabezpečovacího zařízení, povel trakce, povel brzda, otočení přepínačem



„výběh“, povolení otevření dveří vpravo nebo vlevo, zmáčknutí tlačítka „otevření dveří vpravo“ nebo „otevření dveří vlevo“ apod.

Ke zjištění rychlosti a směru jízdy se používají magnetické snímače otáček a směru. Ty fungují na principu snímání magnetické indukce, kterou vytváří otáčející se ozubené kolo. Pro zjištění směru otáčení se používá více navzájem fázově posunutých snímačů.

Záznam registračního rychloměru se pořizuje především pro potřeby šetření případných mimořádných událostí. Dále je možné záznam využít např. ke hledání závad vzniklých na vozidle (9).

### 3 VÝSLEDKY ZJIŠŤOVÁNÍ JÍZDNÍ DOBY

V této kapitole jsou uvedeny výsledky použitých metod popsanych v předchozí kapitole. Získaná data jsou zapsaná v tabelární formě, kde je zaznamenána rychlost jízdy spolu s časem nebo ujetou vzdáleností. Data je možné dále zpracovat a využít například pro vytvoření grafu. Ten umožňuje přehledné zobrazení průběhu jízdy vlaku a v případě vložení křivek z více jízd do jednoho grafu jejich snadné porovnání.

#### 3.1 Výsledky výpočtu pomocí matematického modelu pohybu vlaku

Pro příklad výpočtu jízdní doby autor zvolil úsek Letňany – Prosek. Výpočet byl proveden pro jízdu vlaku po druhé koleji ze stanice Letňany do stanice Prosek. Stanice jsou od sebe vzdáleny 1 827 m a mezi nimi se nachází sklon koleje až 39,28 %. Ve výpočtu jsou použity hodnoty zrychlení, které udávají statické charakteristiky trakce/brzda soupravy M1, snížené či zvýšené o jízdní odpory. Obsazenost soupravy M1 byla zvolena 8 os/m<sup>2</sup>.

Z výsledků výpočtu je zřejmé, že po odjezdu ze stanice Letňany dosáhne souprava rychlosti 80 km/h za 23 s po ujetí 282 m. Dále pokračuje stálou rychlostí po dobu 61 s a urazí dráhu 1 360 m. Souprava poté snižuje rychlost a ve stanici Prosek zastaví po ujetí 185 m za 15 s. Jízda ze stanice Letňany do stanice Prosek, při které souprava urazí dráhu 1 827 m, pak trvá 1 min 39 s. Výsledkem výpočtu je nejkratší jízdní doba mezi těmito stanicemi s využitím největšího možného zrychlení či odrychlení a nejvyšší rychlosti.

Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce 1, kde  $s$  je sklon,  $r$  je poloměr oblouku,  $o_{tun}$  je měrný odpor z jízdy tunelem,  $x$  je poloha na trati,  $l$  je dráha,  $V$  je rychlost,  $a$  je zrychlení,  $t$  je čas.

Tabulka 1 Výpočet jízdní doby v úseku Letňany – Prosek

stanice	s	r	O <sub>tun</sub>	x	l	Σ l	V	a	t	Σ t
	‰	m	N/kN	m	m	m	km·h <sup>-1</sup>	m·s <sup>-2</sup>	s	s
Letňany	-3,00	0	1	9 973	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
	-3,00	0	1	9 973	0,19	0,19	2,5	1,30	0,54	0,54
	-3,00	0	1	9 974	0,56	0,74	5	1,30	0,54	1,07
	-3,00	0	1	9 976	2,23	2,98	10	1,30	1,07	2,14
	-3,00	0	1	9 980	3,72	6,70	15	1,30	1,07	3,21
	-3,00	0	1	9 985	5,22	11,92	20	1,29	1,07	4,29
	-3,00	0	1	9 992	6,72	18,64	25	1,29	1,07	5,36
	-3,00	0	1	10 000	8,22	26,86	30	1,29	1,08	6,44
	-3,00	0	1	10 011	11,32	38,18	35	1,11	1,25	7,69
	-3,00	0	1	10 026	14,99	53,17	40	0,97	1,44	9,13
	-3,00	0	1	10 045	19,24	72,42	45	0,85	1,63	10,76
	-3,00	0	1	10 069	23,84	96,25	50	0,77	1,81	12,57
	-3,00	0	1	10 089	19,76	116,01	53,4	0,69	1,38	13,94
	-37,09	500	2	10 096	6,84	122,85	55	0,98	0,45	14,40
	-37,09	500	2	10 120	24,00	146,85	60	0,92	1,50	15,90
	-37,09	500	2	10 148	27,71	174,55	65	0,87	1,60	17,50
	-37,09	500	2	10 179	31,53	206,08	70	0,83	1,68	19,18
	-37,09	500	2	10 215	35,81	241,89	75	0,78	1,78	20,96
	-37,09	500	2	10 255	40,07	281,96	80	0,75	1,86	22,82
		-37,09	500	2	10 286	31,04	313,00	80	0,00	1,40
-5,03		500	1	10 390	104,00	417,00	80	0,00	4,68	28,90
-5,03		600	1	10 650	260,00	677,00	80	0,00	11,70	40,60
-5,03		0	1	10 703	53,00	730,00	80	0,00	2,39	42,98
5,01		0	1	10 863	160,00	890,00	80	0,00	7,20	50,18
5,02		0	1	10 880	17,00	907,00	80	0,00	0,77	50,95
5,02		500	1	10 967	87,00	994,00	80	0,00	3,92	54,86
5,04		500	1	11 335	368,00	1362,00	80	0,00	16,56	71,42
39,28		500	1	11 615	279,76	1641,76	80	0,00	12,59	84,01
Prosek		39,28	500	1	11 636	21,70	1663,46	75	-1,47	0,95
	39,28	500	1	11 656	19,51	1682,97	70	-1,53	0,91	85,86
	39,28	500	1	11 673	17,40	1700,37	65	-1,61	0,86	86,73
	39,28	500	1	11 689	15,47	1715,84	60	-1,68	0,82	87,55
	39,28	500	1	11 697	7,95	1723,79	57	-1,79	0,47	88,02
	3,00	0	1	11 720	22,74	1746,53	50	-1,44	1,35	89,37
	3,00	0	1	11 734	14,13	1760,66	45	-1,43	0,97	90,34
	3,00	0	1	11 746	12,81	1773,47	40	-1,43	0,97	91,31
	3,00	0	1	11 758	11,48	1784,95	35	-1,43	0,97	92,28
	3,00	0	1	11 768	10,15	1795,10	30	-1,43	0,97	93,26
	3,00	0	1	11 777	8,81	1803,91	25	-1,42	0,98	94,23
	3,00	0	1	11 784	7,46	1811,37	20	-1,42	0,98	95,21
	3,00	0	1	11 790	6,11	1817,48	15	-1,42	0,98	96,19
	3,00	0	1	11 795	4,76	1822,24	10	-1,42	0,98	97,17
	3,00	0	1	11 799	3,40	1825,64	5	-1,42	0,98	98,15
	3,00	0	1	11 799	0,85	1826,49	2,5	-1,42	0,49	98,63
	3,00	0	1	11 800	0,51	1827,00	0	-1,42	0,49	99,12

Zdroj: autor

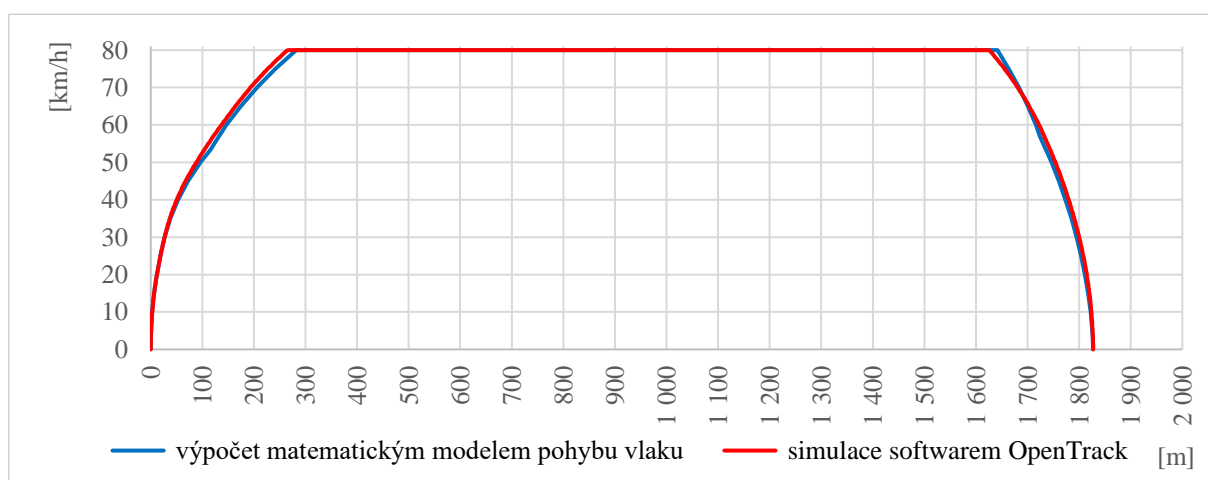
### 3.2 Výsledky simulace softwarem OpenTrack

V softwaru OpenTrack byl vytvořen simulační model linky C zahrnující 2. kolej pro jízdu ve směru ze stanice Letňany do stanice Háje. Sledována je pouze jízda spoje v úseku s přepravou cestujících bez manipulačních přejezdů v obratových stanicích. Jako plánované odjezdy a příjezdy vlaku jsou zadány skutečné odjezdy a příjezdy získané ze záznamu jízdy vozidla. Údaje z jízdního řádu spoje nejsou použity, protože výsledky simulace softwarem OpenTrack budou porovnávány právě se záznamem jízdy vozidla.

Po ukončení simulace software OpenTrack sestavil výstupy s údaji o ujeté vzdálenosti, čase, rychlosti, zrychlení, trakční síle, spotřebované energii a další statistická data. V této bakalářské práci jsou dále využívány dvě tabulky s výstupními daty. Jedna tabulka obsahuje zaznamenanou rychlost jízdy vlaku v místě a čase, druhá tabulka obsahuje časy příjezdů a odjezdů v jednotlivých stanicích spolu s odchylkami od plánovaných příjezdů a odjezdů.

Výsledkem simulace softwarem OpenTrack je celková doba jízdy na lince bez pobytu na zastávkách a konečných 23 min 40 s. V úseku Letňany – Prosek, který je použit pro porovnání s výpočtem podle předchozí metody, je jízdní doba 1 min 42 s. Z toho 22 s trvá zrychlování na rychlost 80 km/h, během kterého souprava ujede 266 m. Dále jede touto rychlostí 1 358 m za 62 s a za dalších 18 s, během kterých souprava rychlost snižuje, po ujetí 203 m zastaví ve stanici.

Na následujícím obrázku 3 je zobrazen tachogram pro úsek Letňany – Prosek vyjadřující vztah rychlosti vlaku k ujeté vzdálenosti. Modrou barvou je zakreslena křivka představující průběh jízdy vypočtený pomocí matematického modelu jízdy vlaku a červenou barvu má křivka reprezentující výsledky simulace softwarem OpenTrack. Výsledky obou metod jsou velmi podobné a křivky se proto téměř překrývají.



Obrázek 3 Tachogram úseku Letňany – Prosek, výpočet a simulace

Zdroj: autor

### 3.3 Skutečný průběh jízdy vozidla

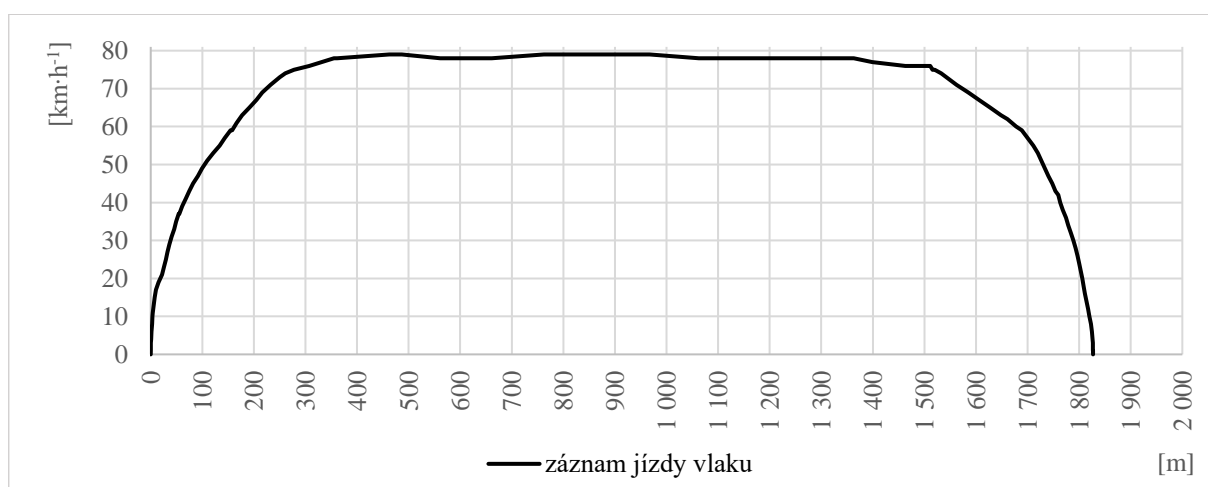
Záznam jízdy vozidla byl pro účely této bakalářské práce pořízen z jízdy vlaku v režimu automatického vedení vlaku. Výjimkou je úsek Střížkov – Ládví. Vzhledem k zavedené pomalé jízdě před stanicí Ládví není možné v tomto úseku automatické vedení vlaku použít. Pomalou jízdu nelze do zabezpečovacího zařízení jednoduše zadat. Znamenalo by to velký zásah do zabezpečovacího zařízení a výměnu programového pásu v daném úseku. Bez toho nemůže vlak svou rychlost automaticky přizpůsobit pomalé jízdě a je zde nutný zásah strojvedoucího. To lze řešit dvěma způsoby.

Prvním je přepnutí do režimu vlakového zabezpečovače, tj. ručního řízení jízdy vlaku. To je nutné provést již ve stanici Střížkov, když vlak stojí. Přejít na režim automatického vedení je možný opět ve stanici Ládví.

Druhým způsobem je zadání výběhu strojvedoucím při režimu automatického vedení vlaku. Souprava pak nevyvíjí tažnou sílu a může jen jet výběhem nebo brzdit. Strojvedoucí musí v tomto případě včas otočit přepínačem „výběh“, aby vlak v úseku se zavedenou pomalou jízdou nepřekročil požadovanou rychlost 40 km/h. Systém automatického vedení vlaku je nadále v činnosti a vlak samočinně zastaví na určeném místě ve stanici.

V případě zde použitého záznamu jízdy byla využita druhá možnost, tedy použití zadání výběhu při automatickém vedení vlaku. Celková doba jízdy na lince bez pobytů na zastávkách a konečných je 26 min 50 s. Doba spoje, tedy celková doba jízdy na lince včetně pobytů na zastávkách je potom 36 minut. Jízdní doba v úseku Letňany – Prosek pro porovnání s ostatními metodami je 1 min 50 s.

Na obrázku 4 je zobrazen tachogram pro úsek Letňany – Prosek znázorňující průběh jízdy vlaku tak, jak byl zaznamenán registračním rychloměrem.



Obrázek 4 Tachogram úseku Letňany – Prosek, záznam jízdy

Zdroj: autor

## 4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Následuje porovnání jízdních dob jednotlivých mezistaničních úseků zjištěných metodou simulace jízdy vlaku pomocí softwaru OpenTrack a metodou záznamu jízdy vlaku registračním rychloměrem. Jízdní doby a rozdíly mezi oběma metodami jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Jízdní doby Letňany – Háje

úsek	simulace bez úprav		simulace s úpravami		záznam
	jízdní doba	rozdíl	jízdní doba	rozdíl	jízdní doba
LT-PR	1:42	-0:08	1:46	-0:04	1:50
PR-SZ	1:06	-0:09	1:11	-0:04	1:15
SZ-LA	1:37	-0:21	1:57	-0:01	1:58
LA-KB	1:18	-0:15	1:31	-0:02	1:33
KB-NH	2:24	-0:22	2:44	-0:02	2:46
NH-VL	1:06	-0:08	1:10	-0:04	1:14
VL-FRC	1:13	-0:13	1:23	-0:03	1:26
FRC-HN	1:01	-0:06	1:05	-0:02	1:07
HN-MUC	0:40	-0:06	0:43	-0:03	0:46
MUC-IP	0:54	-0:06	0:58	-0:02	1:00
IP-VY	1:18	-0:07	1:23	-0:02	1:25
VY-PP	0:55	-0:11	1:06	0:00	1:06
PP-PN	0:57	-0:07	1:02	-0:02	1:04
PN-BD	1:07	-0:07	1:12	-0:02	1:14
BD-KC	0:59	-0:08	1:06	-0:01	1:07
KC-RO	1:21	-0:12	1:29	-0:04	1:33
RO-CH	1:18	-0:07	1:23	-0:02	1:25
CH-OP	1:25	-0:08	1:29	-0:04	1:33
OP-HA	1:19	-0:09	1:24	-0:04	1:28
součet	23:40	-3:10	26:02	-0:48	26:50

Zdroj: autor

Součet všech jízdních dob získaných ze simulace, tedy celková doba jízdy na lince bez pobytů na zastávkách, je 23 min 40 s. V porovnání se skutečnou celkovou dobou jízdy, která je 26 min 50 s, je to o 3 min 10 s méně. Do jednotlivých stanic vlak při simulaci přijížděl o 6 až 22 sekund dříve.

To je vzhledem k jízdnímu řádu, který se sestavuje s přesností na sekundy, příliš velká odchylka. Tyto rozdíly v jízdních dobách mezi základní simulací softwarem OpenTrack a záznamem skutečné jízdy vlaku jsou způsobeny především automatickým vedením vlaku, při kterém není využíváno nejvyšší možné rychlosti či maximálních hodnot zrychlení a odrychlení.

Proto byla provedena další simulace s upraveným simulačním modelem. Rozdíl oproti základní simulaci spočívá v přizpůsobení simulačního modelu jízdy v režimu automatického vedení vlaku. Z toho důvodu došlo k následujícím změnám. Nejvyšší hodnota zrychlení byla z  $1,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  omezena na  $1,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Odrychlení bylo sníženo o  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  a nejvyšší hodnota pak je  $1,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . V některých úsecích byla snížena rychlost nebo zavedena jízda výběhem.

Software OpenTrack však není vybaven funkcí pro jízdu výběhem v daném úseku nebo po dosažení určité rychlosti. Výběhu tak bylo dosaženo pomocí vypnutí trakčního napájení v požadovaných úsecích.

S upraveným simulačním modelem je celková doba jízdy na lince 26 min 2 s, tj. o 48 s méně než jízdní doba zaznamenaná tachografem, v jednotlivých úsecích to znamená maximálně o 4 sekundy méně.

Průběh jízdy vlaku v celé trase ze stanice Letňany do stanice Háje pro porovnání simulace bez úprav, simulace s provedenými úpravami a záznamu jízdy vlaku je uveden v příloze, kde graf zobrazující rychlost jízdy vlaku v závislosti na ujeté vzdálenosti je v příloze B a graf zobrazující rychlost jízdy vlaku v závislosti na čase je v příloze C.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za úkol zjistit, zda lze software OpenTrack využít pro simulaci provozu metra. To vyžaduje provést analýzu technické základny linky metra, získané údaje zadat do softwaru OpenTrack a jízdní doby vzešlé ze simulace porovnat se skutečností. Kromě vstupních dat nezbytných pro vytvoření simulačního modelu má velký význam i systém pro automatizaci řízení jízdy vlaků, kterému je potřeba simulační model přizpůsobit. To si vyžádalo individuální úpravy, které nelze univerzálně použít na jiných linkách s odlišným způsobem zabezpečení a řízení jízdy vlaku. Po provedení potřebných úprav lze rozdíly mezi simulací a skutečným provozem minimalizovat a provoz metra úspěšně simulovat.

Důležitý je proto účel simulace. Přizpůsobit simulační model provozovanému systému může být obtížné a málo využitelné. Větší možnost využití se naskýtá při testování návrhu nové trasy metra. Podle výsledků simulace by bylo možné změnit nevyhovující parametry infrastruktury včas před začátkem stavby nebo navrhnout jízdní profil pro systém automatizace jízdy vlaku. Software OpenTrack sice nedokáže během simulace optimalizovat jízdu vlaku tak, aby byla spotřeba trakční energie co nejnižší a vlak přitom dojel do následující stanice včas podle jízdního řádu. Simulaci je ale možné využít právě ke zjištění jízdní doby pro návrh automatizačního systému a najít tak optimální bod mezi minimální jízdní dobou a minimální spotřebou.

Těchto možností softwaru OpenTrack by se dalo využít při návrhu plánované nové trasy D pražského metra. Další možnost se naskýtá při případné výměně zabezpečovacího zařízení na stávajících linkách.



## SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- (1) DRDLA, Pavel. *Osobní doprava regionálního a nadregionálního významu*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-787-2.
- (2) KYNCL, Jan. *Historie dopravy na území České republiky*. Praha: Vladimír Kořínek, 2006. ISBN 80-903184-9-5.
- (3) Prehistorie metra sahá až do roku 1898. Podzemní tramvaj měla jezdit z Václaváku k Rudolfinu. *Metro* [online]. Praha: METRO Praha, 6. května 2014 [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: [www.metro.cz/prehistorie-metra-saha-az-do-roku-1898-podzemni-tramvaj-mela-jezdit-z-vaclavaku-k-rudolfinu-g79-/praha.aspx?c=A140506\\_113037\\_co-se-deje\\_jbs](http://www.metro.cz/prehistorie-metra-saha-az-do-roku-1898-podzemni-tramvaj-mela-jezdit-z-vaclavaku-k-rudolfinu-g79-/praha.aspx?c=A140506_113037_co-se-deje_jbs)
- (4) REJDAL, Tomáš. *Metroweb.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-01-02]. ISSN 1802-2820. Dostupné z: [www.metroweb.cz](http://www.metroweb.cz).
- (5) Ke stažení. *Pražská integrovaná doprava* [online]. Praha: ROPID, 2018 [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: [pid.cz/ke-stazeni/?type=mapy](http://pid.cz/ke-stazeni/?type=mapy).
- (6) C (linka metra v Praze). *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [cs.wikipedia.org/wiki/C\\_\(linka\\_metra\\_v\\_Praze\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/C_(linka_metra_v_Praze)).
- (7) *Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších předpisů*. Sbírka zákonů, 30. 6. 1995.
- (8) *Nákresný přehled trasy C*. 4. doplněné vydání. DP-METRO, 2005.
- (9) HUŠÁK, Petr. *Funkce zabezpečovače MATRA PA 135 a tachogramu soupravy M1*. Praha, 4. 5. 2018.
- (10) HAVLÍČEK, Petr. *Systém korekce zátěže*. Praha, 13. 2. 2018.
- (11) *Liniový vlakový zabezpečovač a zařízení automatického vedení vlaků typu „Pilotage automatique PA 135“*. 3. opravené vydání. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy a. s., METRO o. z., 1995.
- (12) Souprava metra M1. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: [cs.wikipedia.org/wiki/Souprava\\_metra\\_M1](http://cs.wikipedia.org/wiki/Souprava_metra_M1)
- (13) *Tabulka garantovaných parametrů M1*. DP-METRO, 2009.

- (14) ZELEŇKA, Jaromír, Tomáš MICHÁLEK a Martin KOHOUT. *Mechanika dopravy: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Dislokované pracoviště Česká Třebová, 2013. ISBN 978-80-7395-739-1.
- (15) *OpenTrack Railway Technology – Simulace železnice* [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [www.opentrack.cz/opentrack\\_cz.html](http://www.opentrack.cz/opentrack_cz.html).
- (16) HUERLIMANN, Daniel, Andrew B. NASH. *OpenTrack: Simulation of Railway Networks. Version 1.3*. Zurich: ETH Zurich, Institute for Transport Planning and Systems, 2003.
- (17) *Vyhláška Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, ve znění pozdějších předpisů*. Sbírnka zákonů, 22. 6. 1995.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A: Tabulka garantovaných parametrů M1

Příloha B: Graf závislosti rychlosti jízdy na ujeté vzdálenosti

Příloha C: Graf závislosti rychlosti jízdy na čase

# Příloha A: Tabulka garantovaných parametrů M1

Č.j.:Tabulka garantovaných parametrů M1.doc  
Datum: 15.7.2009.

## Tabulka parametrů nových vozů metra typu M1, garantovaných DP-METRO

Zdroj: DPM/11222/DW0057K.DOC/00 Edice 2.01

Číslo Param.	Parametr	Hodnota	Jednotka	Tolerance	Funkční/Bezpečnostní
<b>2</b>	<b>Parametry spojené s ovládním</b>				
2.1	<b>Délky a vzdálenosti (viz příloha č.1 na straně 5)</b>				
2.1.1	Délka soupravy 5-ti vozů (v příloze č.1 rozměr ①)	96 660	mm	±150	Funkční
	Vzdálenost snímačů HF od:				
	čela spráhla čelního vozu (v příloze č.1 součet rozměrů : ② + ③)	17 855	mm	±30	Funkční
	Čela vlaku (v příloze č.1 rozměr ②)	17 555	mm	±5	Funkční
2.2	<b>Hmotnosti</b>				
2.2.1	Hmotnosti naprázdno a se standardní zátěží				Funkční
		naprázdno	6 os/m <sup>2</sup>	8 os/m <sup>2</sup>	
	Zátěž vlaku [kg]:	---	86 550	109 800	
	Celková hmotnost vlaku se zátěží [kg]:	133 200	219 750	243 000	
	Tolerance:	+3% ; -1%	+3% ; -1%	+3% ; -1%	
2.2.2	Hmotnost rovnající se rotačním hmotám	19 360	kg	± 15%	Funkční
2.3.	<b>Jízdní odpor</b>				
2.3.1	Jízdní odpor v přímé trati: a) Při jízdě výběhem $W_{ov} = 1,16 + 0,0088 \times V + \frac{0,222 \times V^2}{m}$ [N/kN; km/h; t] b) Při jízdě trakci nebo brzdou $W_{ot} = 1,16 + 0,0088 \times V + \frac{0,156 \times V^2}{m}$ [N/kN; km/h; t]		N/kN	±10%	Funkční
2.3.2	Jízdní odpor $W_r$ [N/kN] v oblouku o poloměru R[m]: $W_r = \frac{C}{R - D}$		N/kN	±10%	Funkční
	C =	650,00	m*N/kN		
	D =	55,00	m		
2.4	<b>Statické charakteristiky trakce/brzda</b>				
2.4.1	Elektrická trakce (tažná síla)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 2		±5%	Funkční
2.4.2	Elektrická brzda (brzdná síla)			±5%	Funkční
2.4.3	Poměrná brzdná síla pneumatické brzdy při rychlosti < 0,5 km/hod Obecně: Síla pneumatické brzdy při V < 0,5 km/hod = 70% maximální brzdné síly elektrodynamicke brzdy (do roku 2008 byla tato hodnota 100%)				
	Prázdná souprava M1	1,35	m/s <sup>2</sup>	±10%	Funkční
	Souprava M1 obsazená 6 os/m <sup>2</sup>	1,35	m/s <sup>2</sup>	±10%	Funkční
	Souprava M1 obsazená 8 os/m <sup>2</sup>	1,35	m/s <sup>2</sup>	±10%	Funkční
2.4.4	Maximální rychlost aplikace pneumatické brzdy	10	km/h	-3km/h	Funkční
2.5	<b>Limitace jerku</b>				
	Limit jerku na úrovni řídicího systému soupravy	0,85	m/s <sup>3</sup>	-0;+5%	Funkční

Strana: 1/10

2.6		Doba přechodu			
Obecně K Bodu 2.6	<p><b>Doby přechodů:</b>  Výběh (0%P<sub>IT</sub>) → Trakce (100%P<sub>IT</sub>)  Trakce(100%P<sub>IT</sub>) → Výběh (0% P<sub>IB</sub>)  Výběh (0%P<sub>IB</sub>) → Brzda (100%P<sub>IB</sub>)  Brzda(100% P<sub>IB</sub>) → Výběh (0% P<sub>IB</sub>)</p>	<p>Pro výpočet doby přechodu se používá obecně pro bod 2.6 vzorec:  <math display="block">t_p [s] = \frac{F(V)_{max}}{(m + m_{rot}) \times r} + Tx</math> kde:  t<sub>p</sub> [s] = doba přechodu=doba odezvy+doba náběhu  F(V)<sub>max</sub> = maximální hodnota tažné/brzdě síly při dané rychlosti  m [t] = hmotnost vlaku (prázdný + zátěž)  m<sub>rot</sub> [t] = hmotnost ekvivalentní rotujícím hmotám  r [m/s<sup>2</sup>] = da/dt  Tx [s] = reakční doba řídicího systému, tzv. čisté zpoždění  Tx pro povel Výběh → Trakce  Tx pro povel Výběh → Brzda (EDB)  Tx pro povel Trakce → Výběh  Tx pro povel Brzda (EDB) → Výběh</p>			Funkční
2.6.1	<b>Výběh → Trakce</b>				
2.6.1.1	Výběh → Trakce [0 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 3			
2.6.1.2	Výběh → Trakce [6 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 3			
2.6.1.3	Výběh → Trakce [8 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 3			
2.6.2	<b>Trakce → Výběh</b>				
2.6.2.1	Trakce → Výběh [0 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 4			
2.6.2.2	Trakce → Výběh [6 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 4			
2.6.2.3	Trakce → Výběh [8 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 4			
2.6.3	<b>Výběh → Elektrická brzda</b>				
2.6.3.1	Výběh → Elektrická brzda [0 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 5			
2.6.3.2	Výběh → Elektrická brzda [6 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 5			
2.6.3.3	Výběh → Elektrická brzda [8 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,20	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 5			

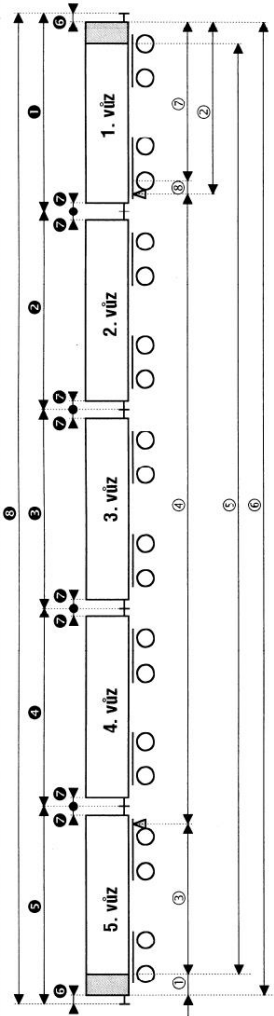
<b>2.6.4</b>	<b>Elektrická brzda → Výběh</b>				
2.6.4.1	Elektrická brzda → Výběh [0 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 6			
2.6.4.2	Elektrická brzda → Výběh [6 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 6			
2.6.4.3	Elektrická brzda → Výběh [8 os/m <sup>2</sup> ]				
	Doba čistého zpoždění	0,10	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu (lineární průběh)	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 6			
<b>2.6.5</b>	<b>Doba přechodu „Není“ pneumatická brzda → Pneumatická brzda (63%)</b>				
	Doba zpoždění	0,5	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [0 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [6 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [8 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
<b>2.6.6</b>	<b>Doba přechodu Pneumatická brzda → „Není“ pneumatická brzda (37%)</b>				
	Doba zpoždění	0,5	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [0 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [6 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
	Doba náběhu [8 os/m <sup>2</sup> ]	1	s	±10%	Funkční
2.6.7	Minimální doba aplikace výběhu při přechodu trakce/brzda	0,10	s	±10%	Funkční
2.6.8	Doba udržování pneumatické brzdy při rozjezdu do stoupání	0,9 (není řízeno PA135)	s	±15% (není řízeno PA135)	Funkční
<b>2.7</b>	<b>Dynamické charakteristiky trakce/brzda</b>				
2.7.1	Doba přechodu mezi 2 režimy trakce	0,2	s	±10%	Funkční
2.7.2	Doba přechodu mezi 2 režimy brzdy	0,2	s	±10%	Funkční

<b>3 Parametry spojené s bezpečností</b>					
3.1	TRFU	2,00	s	žádná	Bezpečnostní
3.2	Minimální odrychlení nouzová brzda $\gamma_{min}$ FU:				
	$\gamma_{min}$ FU v tunelu	0,94	ms <sup>-2</sup>	žádná	Bezpečnostní
	$\gamma_{min}$ FU na povrchu	0,94	ms <sup>-2</sup>	žádná	Bezpečnostní
3.3	TRDIST	0,4	s	žádná	Bezpečnostní
3.4	Délka vozů se spřáhly:				
	čelního vozu (v příloze č.1 rozměry: ❶ nebo ❷)	19 521	mm	±30	Bezpečnostní
	Vloženého vozu (v příloze č.1 rozměry: ❶, ❷ nebo ❸)	19 206	mm	±30	Bezpečnostní
3.5	Délka soupravy 5-ti vozů (spřáhlo-spřáhlo) (v příloze č.1 rozměr: ❸)	96 660	mm	±150	Bezpečnostní
3.6	Délka mezi koncem vlaku a poslední nápravou (v příloze č.1: rozměr ❶ + ❷)	2 568	mm	±10	Bezpečnostní
3.7	Poloha snímačů HF oproti čelu vlaku (čelo čelního vozu) (v příloze č.1 rozměr: ❷)	17 555	mm	±15	Bezpečnostní
3.8	Minimální hmotnost prázdné soupravy				
	čelní vůz (M1.1)	27 900	kg	+3%;-1%	Bezpečnostní
	2. a 4. Vložený vůz (M1.2)	25 900	kg	+3%;-1%	Bezpečnostní
	3. vložený vůz (M1.3)	25 600	kg	+3%;-1%	Bezpečnostní
	vlak M1s 5-ti vozy	133 200	kg	+3%;-1%	Bezpečnostní
3.9	Maximální zátěž (při 8 stojících cestujících na m <sup>2</sup> při hmotnosti jednoho cestujícího 75 kg)				
	čelní vůz (M1.1)	21 150	kg		Bezpečnostní
	vložený vůz (M1.1 i M1.2)	22 500	kg		Bezpečnostní
	vlak M1 s 5-ti vozy	109 800	kg		Bezpečnostní
3.10	Hmotnost rovnající se rotačním hmotám	19 360	kg	±15%	Bezpečnostní
3.11	Křivky maximální tažné síly v závislosti na rychlosti	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 12			Bezpečnostní
3.12	Jízdní odpor				
	Jízdní odpor $W_0$ [N/kN] v přímé koleji	Viz bod 2.3.1			Bezpečnostní
	Jízdní odpor $W$ [N/kN] v oblouku o poloměru $R$ [m]	Viz bod 2.3.2			Bezpečnostní
3.13	Maximální doba zpoždění rozeznání smyčky NT	Viz tabulka v Dodatku 1, bod 11			Bezpečnostní
3.14	Průměry kol				
	Minimální průměr kola	770	mm	-0;+2	Bezpečnostní
	Maximální (jmenovitý) průměr kola	850	mm	-0;+2	Bezpečnostní



Příloha č.1

**Charakteristické rozměry vlaků metra typu 81-71, 81-71M a M1 z hlediska zabezpečovacího zařízení MATRA PA135**



Klíč	Popis klíče	Velikost klíče pro jednotlivý typ vozu (mm)			Klíč	Popis klíče	Velikost klíče pro jednotlivý typ vozu (mm)		
		81-71	81-71M	M1			81-71	81-71M	M1
①	Vzdálenost osy poslední nápravy od zadního čela vlaku (def. M1 = 3175 mm)	2 055	2 055	2 268	①	Délka 1. vozu vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	19 206	19 398	19 521
②	Vzdálenost osy aktivních (předních) snímacích antén od předního čela vlaku (def. M1 = 17 555 mm)	17 555	17 555	17 555	②	Délka 2. vozu vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	19 206	19 210	19 206
③	Vzdálenost osy aktivních (předních) snímacích antén od osy první nápravy vlaku	15 500	15 500	15 287	③	Délka 3. vozu vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	19 206	19 210	19 206
④	Vzdálenost osy aktivních (předních) snímacích antén od osy neaktivních (zadních) snímacích antén	60 520	60 540	60 950	④	Délka 4. vozu vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	19 206	19 210	19 206
⑤	Vzdálenost osy první nápravy vlaku od osy poslední nápravy vlaku	91 520	91 540	91 524	⑤	Délka 5. vozu vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	19 206	19 398	19 521
⑥	Vzdálenost předního čela vlaku od zadního čela vlaku (celka vlaku)	95 630	95 650	96 060	⑥	Předsazení čelního spřáhla před čelo vlaku	200	388	300
⑦	Vzdálenost předního čela vlaku od osy poslední nápravy 1. vozu	16 755	16 755	16 968	⑦	Předsazení čela mezilehlého spřáhla před čelo vozu	200	200	135
⑧	Vzdálenost osy aktivních (předních) snímacích antén od osy poslední nápravy 1. vozu	800	800	587	⑧	Délka vlaku měřená přes spřáhla (spřáhlo-spřáhlo)	96 030	96 426	96 660



## Dodatek 1

### 1. Jízdní odpor na přímé vodorovné koleji

Jízdní odpor na přímé vodorovné koleji je uveden v bodě 2.3.1 předcházející tabulky

### 2. Statické charakteristiky trakce/brzda

v	Elektrická trakce			Elektrická brzda		
	$\gamma$ [m/s <sup>2</sup> ]			$\gamma$ [m/s <sup>2</sup> ]		
km/h	0 os/m <sup>2</sup>	6 os/m <sup>2</sup>	8 os/m <sup>2</sup>	0 os/m <sup>2</sup>	6 os/m <sup>2</sup>	8 os/m <sup>2</sup>
0	1.30	1.30	1.29	1.38 <sup>1)</sup>	1.38 <sup>1)</sup>	1.37 <sup>1)</sup>
2,5	1.30	1.30	1.29	1.38 <sup>1)</sup>	1.38 <sup>1)</sup>	1.37 <sup>1)</sup>
5	1.30	1.30	1.29	1.38 <sup>1)</sup>	1.38 <sup>1)</sup>	1.37 <sup>1)</sup>
10	1.30	1.30	1.29	1.38 <sup>1)</sup>	1.38 <sup>1)</sup>	1.37 <sup>1)</sup>
15	1.30	1.30	1.29	1.38	1.38	1.37
20	1.30	1.30	1.29	1.38	1.38	1.37
25	1.30	1.30	1.29	1.38	1.38	1.37
30	1.30	1.30	1.29	1.38	1.38	1.37
35	1.11	1.12	1.11	1.38	1.38	1.37
40	0.98	0.98	0.97	1.38	1.38	1.37
45	0.87	0.87	0.86	1.38	1.38	1.37
50	0.78	0.78	0.78	1.38	1.38	1.37
55	0.71	0.71	0.70	1.38	1.38	1.37
60	0.65	0.65	0.65	1.38	1.38	1.37
65	0.60	0.60	0.60	1.27	1.27	1.26
70	0.56	0.56	0.56	1.18	1.19	1.18
75	0.52	0.52	0.52	1.10	1.11	1.10
80	0.49	0.49	0.49	1.03	1.04	1.03

<sup>1)</sup> Brzdí se pneumaticky

### 3. Doba přechodu Výběh → Trakce

Při zadání maximální síly a zátěž vlaku 0os/m2 (vlak bez zátěže)

v	Přechod z výběhu na maximální zrychlení	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
0	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.533	±15%
10	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.533	±15%
20	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.533	±15%
30	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.533	±15%
40	0 → 0,98 m/s <sup>2</sup>	0.98	1.149	±15%
50	0 → 0,78 m/s <sup>2</sup>	0.78	0.920	±15%
60	0 → 0,65 m/s <sup>2</sup>	0.65	0.766	±15%
70	0 → 0,56 m/s <sup>2</sup>	0.56	0.658	±15%
80	0 → 0,49 m/s <sup>2</sup>	0.49	0.577	±15%

Při zadání maximální síly a zátěž vlaku 6os/m2

v	Přechod z výběhu na maximální zrychlení	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
0	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.535	±15%
10	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.535	±15%
20	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.535	±15%
30	0 → 1,30 m/s <sup>2</sup>	1.30	1.535	±15%
40	0 → 0,98m/s <sup>2</sup>	0.98	1.151	±15%
50	0 → 0,78 m/s <sup>2</sup>	0.78	0.921	±15%
60	0 → 0,65 m/s <sup>2</sup>	0.65	0.768	±15%
70	0 → 0,56 m/s <sup>2</sup>	0.56	0.659	±15%
80	0 → 0,49 m/s <sup>2</sup>	0.49	0.578	±15%

Při zadání maximální síly a zátěž vlaku 8os/m2

v	Přechod z výběhu na maximální zrychlení	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
0	0 → 1,29 m/s <sup>2</sup>	1.29	1.523	±15%
10	0 → 1,29 m/s <sup>2</sup>	1.29	1.523	±15%
20	0 → 1,29 m/s <sup>2</sup>	1.29	1.523	±15%
30	0 → 1,29 m/s <sup>2</sup>	1.29	1.523	±15%
40	0 → 0,97m/s <sup>2</sup>	0.97	1.142	±15%
50	0 → 0,78 m/s <sup>2</sup>	0.78	0.914	±15%
60	0 → 0,65 m/s <sup>2</sup>	0.65	0.762	±15%
70	0 → 0,56 m/s <sup>2</sup>	0.56	0.654	±15%
80	0 → 0,49 m/s <sup>2</sup>	0.49	0.573	±15%

#### 4. Doba přechodu Trakce → Výběh

Doby náběhu přechodu TRAKCE – VÝBĚH jsou stejné, jako doby náběhu přechodu VYBĚH-TRAKCE.

#### Doba přechodu Výběh → Brzda

Pro zátěž vlaku 0 os/m<sup>2</sup>

v	Přechod z výběhu na maximální brzdu	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
2,5	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
5	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
10	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
20	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.623</b>	±15%
30	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.623</b>	±15%
40	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.623</b>	±15%
50	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.623</b>	±15%
60	0 → 1.38m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.623</b>	±15%
70	0 → 1,18m/s <sup>2</sup>	<b>1.18</b>	<b>1.393</b>	±15%
80	0 → 1.03 m/s <sup>2</sup>	<b>1.03</b>	<b>1.217</b>	±15%

Pro zátěž vlaku 6os/m<sup>2</sup>

v	Přechod z výběhu na maximální brzdu	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
2,5	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
5	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
10	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<sup>1)</sup>	±15%
20	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.625</b>	±15%
30	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.625</b>	±15%
40	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.625</b>	±15%
50	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.625</b>	±15%
60	0 → 1,38 m/s <sup>2</sup>	<b>1.38</b>	<b>1.625</b>	±15%
70	0 → 1,19 m/s <sup>2</sup>	<b>1.19</b>	<b>1.395</b>	±15%
80	0 → 1,04 m/s <sup>2</sup>	<b>1.04</b>	<b>1.219</b>	±15%

Pro zátěž vlaku 8os/m<sup>2</sup>

v	Přechod z výběhu na maximální brzdu	Delta zrychlení	Doba náběhu	Tolerance
[km/h]		[m/s <sup>2</sup> ]	[s]	
2,5	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<sup>1)</sup>	±15%
5	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<sup>1)</sup>	±15%
10	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<sup>1)</sup>	±15%
20	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<b>1.613</b>	±15%
30	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<b>1.613</b>	±15%
40	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<b>1.613</b>	±15%
50	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<b>1.613</b>	±15%
60	0 → 1,37 m/s <sup>2</sup>	<b>1,37</b>	<b>1.613</b>	±15%
70	0 → 1,18 m/s <sup>2</sup>	<b>1.18</b>	<b>1.384</b>	±15%
80	0 → 1.03 m/s <sup>2</sup>	<b>1.03</b>	<b>1.210</b>	±15%

<sup>1)</sup> Brzdí se pneumaticky; platí hodnoty a definice dle bodu 2.65.

## 5. Doba přechodu Brzda → Výběh

Doby náběhu přechodu BRZDA → VÝBĚH jsou stejné, jako doby náběhu přechodu VÝBĚH → BRZDA.

Přechod Trakce ↔ Brzda

Minimální doba aplikace výběhu pro všechny přechody (elektrická trakce-elektrická brzda) jakož i tolerance pro tuto hodnotu. Tato hodnota odpovídá řádku 2.6.7 ve výše uvedené tabulce garantovaných parametrů.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Doba přechodu způsobená zařízením trakce/brzda a nezávislá na pravidlech řízení	bez omezení	
Doba přechodu vyplývající z pravidel řízení	100	ms

## 6. Doba udržování pneumatické brzdy při rozjezdu ve stoupání

Tolerance doby udržování pneumatické brzdy při rozjezdu ve stoupání je uvedena v tabulce garantovaných parametrů (parametr 2.6.8).

## 7. Doba přechodu mezi dvěma trakčními režimy

Tolerance doby přechodu mezi dvěma trakčními režimy (parametr 2.6.1: TR<sub>40%</sub>→TR<sub>50%</sub>) je uvedena v tabulce garantovaných parametrů (parametr 2.7.1).

## 8. Doba přechodu mezi dvěma brzdovými režimy

Tolerance doby přechodu mezi dvěma brzdovými režimy (parametr 2.6.2:EDB<sub>40%</sub>→EDB<sub>50%</sub>) je uvedena v tabulce garantovaných parametrů (parametr 2.7.2).

## 9. Vlakové parametry v souvislosti s informací NT

Parametr	Hodnota		Jednotka	Tolerance	
	EDB	PB		EDB	PB
$\gamma_{NT1}$ dolní práh odrychlení výskytu NT=TRUE	0,04	0,04	m/s <sup>2</sup>	±20%	±50%
$\gamma_{NT2}$ horní práh odrychlení výskytu NT=TRUE	0,05	0,15	m/s <sup>2</sup>	±20%	±20%
TNT1 zpoždění výskytu NT=TRUE	0,4	0,8 <sup>1)</sup>	s	±20%	±20%
TNT2 zpoždění výskytu NT=FALSE	0,1	0,8 <sup>2)</sup>	s	±20%	±20%

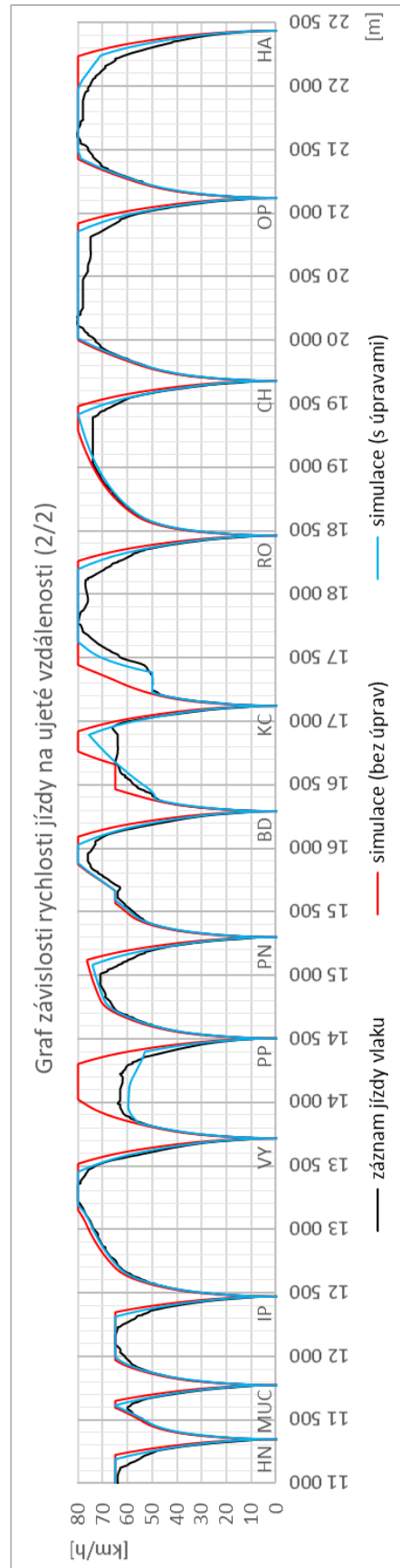
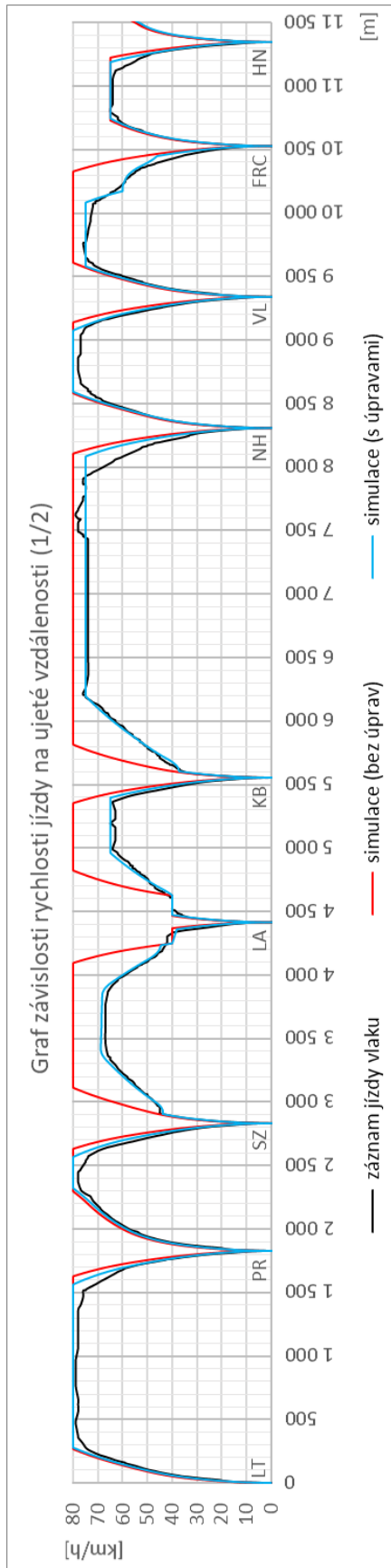
<sup>1)</sup> doba reakce vzhledem ke  $\gamma_{NT2}$

<sup>2)</sup> doba reakce vzhledem ke  $\gamma_{NT1}$

**Křivky maximální garantované trakční síly**

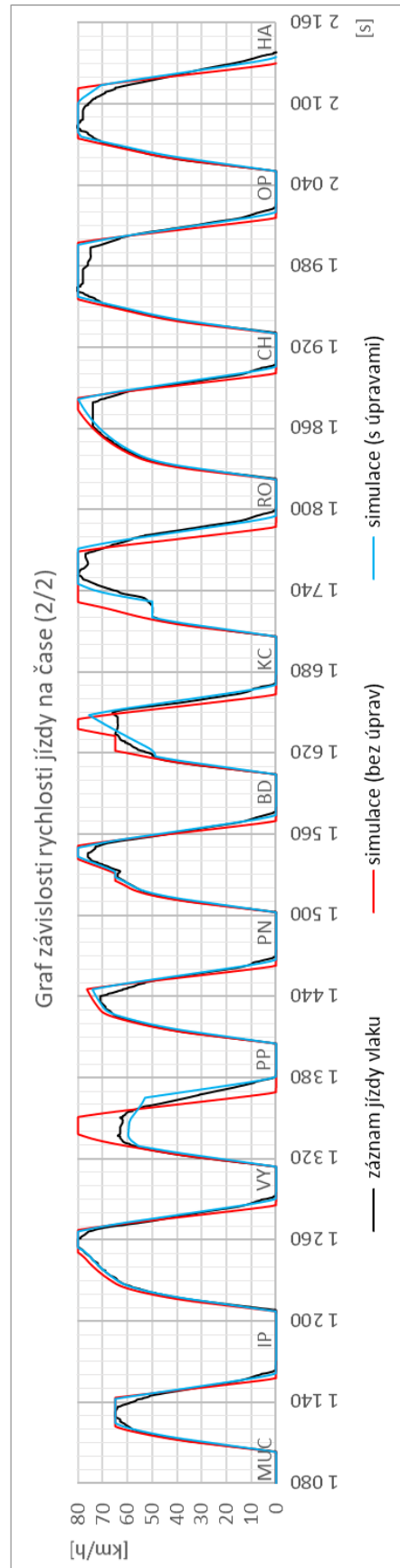
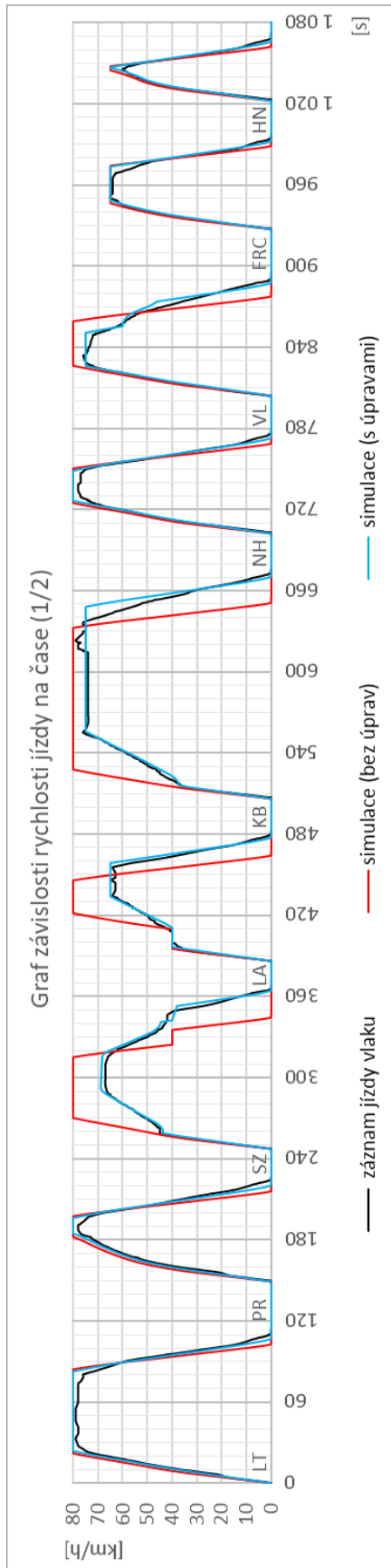
v km/h	F <sub>T</sub> [kN]	F <sub>T</sub> [kN]
	0 os/m <sup>2</sup>	8 os/m <sup>2</sup>
0	208.67	356.66
2,5	208.67	356.66
5	208.67	356.66
10	208.67	356.66
15	208.67	356.66
20	208.67	356.66
25	208.67	356.66
30	208.67	356.66
35	178.60	305.26
40	156.50	267.50
45	139.32	238.13
50	125.20	214.00
55	113.54	194.07
60	104.34	178.33
65	96.36	164.69
70	89.61	153.16
75	83.47	142.67
80	78.56	134.27

## Příloha B: Graf závislosti rychlosti jízdy na ujeté vzdálenosti



Zdroj: autor

## Příloha C: Graf závislosti rychlosti jízdy na čase



Zdroj: autor