

**Univerzita Pardubice**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Experimentování s jízdními dobami vlaků  
v rámci simulačního modelu**

**Bc. Martin Kořínek**

**Diplomová práce  
2016**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Kořínek**  
Osobní číslo: **I14262**  
Studijní program: **N2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Název tématu: **Experimentování s jízdními dobami vlaků v rámci  
simulačního modelu**  
Zadávající katedra: **Katedra softwarových technologií**

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

Cílem diplomové práce je provést sérii experimentů s jízdními dobami vlaků v rámci simulačního modelu za účelem správné volby parametrů pro potřeby snížení jízdních dob o stanovené procentuální hodnoty. Úpravy jízdních dob budou spočívat zejména v parametrizaci výkonu hnacího vozidla, volby maximální rychlosti vlaku apod.

V rámci diplomové práce budou tyto experimenty provedeny s různými typy vlaků na několika různých infrastrukturách, které odraží různé sklonové i směrové poměry.

Předpokladem pro řešení diplomové práce je využití vhodného frameworku, který umožňuje provádět simulaci jízdy vlaků.

Výstupem diplomové práce budou také záznamy jízdy vlaků v podobě grafů vhodného typu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50-60 normostran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. Kavička A. Přednášky z předmětu Pokročilé techniky modelování a simulace. Pardubice, 2015.

2. Kavička A., Klima V., Adamko N. Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov. EDIS Žilina, 2005. ISBN 80-8070-477-5.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michael Bažant, Ph.D.

Katedra softwarových technologií

Datum zadání diplomové práce: 31. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 13. května 2016



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



prof. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2015

# Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 25. 4. 2016

Martin Kořínek

# Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Michaelu Bažantovi Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při vytváření této práce. Dále děkuji Ing. Romanu Divišovi za poskytnutí simulačního nástroje MesoRail a za proškolení práce s ním. V neposlední řadě děkuji také své rodině za podporu nejen během studia.

# Anotace

Práce se zabývá experimentováním s jízdními dobami vlaků. Experimenty jsou prováděny v rámci simulačního nástroje MesoRail. Teoretická část práce se zabývá problematikou vytváření vstupů do simulátorů, analýzou výstupů ze simulátorů, dále problematikou hnacích vozidel, vozů a trakčních charakteristik. V praktické části je popsán postup vytváření konkrétních vstupů do simulátoru, určení nutného počtu replikací a popis provádění samotných experimentů. Stěžejní částí práce je statistická analýza získaných výsledků, jejímž výstupem bude sada tabulek závislosti jízdní doby na parametrech vlaku, popř. stanovení rovnic popisujících trend závislosti mezi jízdní dobou a zvoleným parametrem vlaku. Kromě toho bude výstupem práce i sada tachogramů popisujících průběh jízdy vlaku.

## Klíčová slova

hnací vozidlo, korelace, regrese, simulace, tachogram, železniční doprava

## Title

Experimenting with driving times of trains within simulation model

## Annotation

Thesis deals with experimenting with driving times of trains. Experiments are carried within simulation tool MesoRail. Theoretical part deals with creation of inputs for simulator, analysis of outputs from simulator, locomotives, wagons and traction characteristics. In practical part is described procedure of creation of concrete inputs for simulator, determining number of required replications and description of experiments. Pivotal part of thesis is statistical analysis of results, which output is set of tables describing relationship between driving time of train and given parameter or determining equations describing trend of relationship between driving time and given parameter. Moreover one output of thesis is set of tachograms that are describing train drive.

## Keywords

locomotive, correlation, regression, simulation, tachogram, railway transport

# Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratk	11
Úvod	12
<b>1 Techniky vytváření vstupů do simulátoru</b>	<b>14</b>
1.1 Nástroje pro zkoumání souboru vstupních dat	14
1.1.1 Histogram	14
1.1.2 Regresní model	16
1.1.3 Klouzavý průměr	17
1.2 Statistické testy	17
1.3 Specializované nástroje	20
1.4 Generátory pseudonáhodných čísel	23
1.4.1 Vlastnosti generátorů pseudonáhodných čísel	23
1.4.2 Typy generátorů pseudonáhodných čísel	25
1.4.3 Matematická definice generátoru pseudonáhodných čísel	25
1.4.4 Příklad generátoru pseudonáhodných čísel	26
1.5 Scénáře	27
<b>2 Techniky zpracování výstupů ze simulátoru</b>	<b>28</b>
2.1 Replikace	28
2.2 Stochastický proces	28
2.3 Typy simulací podle podmínek ukončení	28
2.3.1 Simulace s ukončením	28
2.3.2 Simulace bez ukončení	29
2.4 Výpočet statistických ukazatelů výstupního souboru dat	29
2.4.1 Simulace s ukončením	29
2.4.2 Simulace bez ukončení	32
<b>3 Hnací vozidla</b>	<b>33</b>
3.1 Elektrická hnací vozidla	33
3.1.1 Lokomotivní řada ES 499.1 (363)	33
3.1.2 Lokomotivní řada 471	35
3.2 Motorová hnací vozidla	37
3.2.1 Lokomotivní řada 742	37
3.2.2 Lokomotivní řada 754	40
3.3 Vozy	42
3.3.1 Vůz řady Bdmpee <sup>233</sup>	42
3.3.2 Vůz řady 054.2 bdtm	43
3.3.3 Nákladní vůz řady Eas	44

<b>4</b>	<b>Trakční charakteristiky</b>	<b>46</b>
4.1	Důležité parametry trakčních charakteristik . . . . .	48
4.2	Úplná trakční charakteristika . . . . .	51
4.3	Základní typy trakčních charakteristik . . . . .	51
4.3.1	Stejnoměrná elektrická vozidla . . . . .	52
4.3.2	Střídavá elektrická vozidla . . . . .	53
4.3.3	Motorová hnací vozidla . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Simulátor</b>	<b>58</b>
5.1	Popis simulátoru . . . . .	58
5.2	Popis infrastruktury . . . . .	59
5.3	Dynamika jízdy vlaku . . . . .	59
5.3.1	Vozidlové odpory (Resistance) . . . . .	61
5.3.2	Traťové odpory . . . . .	63
5.3.3	Odpor zrychlení . . . . .	64
5.3.4	Ostatní parametry . . . . .	65
5.4	Tachogram . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Praktická část</b>	<b>67</b>
6.1	Úpravy Zdrojového kódu . . . . .	67
6.2	Popis infrastruktury . . . . .	69
6.3	Zkoumané parametry . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Tvorba vstupů do simulátoru</b>	<b>71</b>
7.1	Tvorba hnacích vozidel . . . . .	71
7.2	Tvorba vlaků . . . . .	72
7.3	Zjištění počtu replikací . . . . .	75
7.4	Simulační scénáře . . . . .	76
<b>8</b>	<b>Analýza výsledků experimentů</b>	<b>81</b>
8.1	Korelační analýza . . . . .	81
8.2	Analýza jízdních dob referenčních vlaků . . . . .	84
8.2.1	Referenční vlak 363_O_HZB . . . . .	84
8.2.2	Referenční vlak 363_O_BZH . . . . .	86
8.2.3	Referenční vlak 754_O_BZH . . . . .	88
8.2.4	Referenční vlak 471_O_BZH . . . . .	90
8.3	Tachogramy . . . . .	92
<b>9</b>	<b>Vyhodnocení simulačních experimentů</b>	<b>99</b>
9.1	Shrnutí výsledků experimentů . . . . .	99
9.2	Stanovení rovnic trendu závislosti jízdní doby na daném parametru . . . . .	100
9.3	Stanovení parametrů vlaku podle jízdní doby . . . . .	101
9.4	Potvrzení správnosti rovnice trendu . . . . .	103
9.5	Kombinace parametrů . . . . .	104
	<b>Závěr</b>	<b>110</b>
	<b>Literatura</b>	<b>112</b>



# Seznam obrázků

1	Ukázka histogramu [1]	15
2	Ukázka regrese [1]	16
3	Ukázka klouzavého průměru [1]	17
4	Vytvoření datového souboru	20
5	Zobrazení dat	20
6	Výběr rozdělení	21
7	Proložená data	21
8	Výstup z nástroje Input Analyzer	22
9	Počet replikací	31
10	Trakční charakteristika lokomotivní řady 363. Zdroj [13]	34
11	Rychlík R 612 Jan Palach s HV řady 363. Zdroj [16]	35
12	Trakční charakteristika HV řady 471. Zdroj [13]	37
13	Elektrická jednotka 471. Zdroj [17]	37
14	Trakční charakteristika HV řady 742. Zdroj [12]	39
15	Nákladní vlak s HV řady 742. Zdroj [18]	39
16	Trakční charakteristika HV řady 754. Zdroj [12]	41
17	Osobní vlak Os 7412 s HV řady 754. Zdroj [19]	41
18	Nově zrekonstruovaný vůz řady Bdmpee <sup>233</sup> . Zdroj [21]	43
19	Přípojný vůz řady 054.2 bdtm. Zdroj [20]	44
20	Vůz Eas 31 54 597 7 357-0 po provedené revize v OOS. s. r. o. Zdroj [24]	45
21	Ideální trakční hyperbola. Zdroj [14]	46
22	Obecný tvar trakční charakteristiky a její omezení. Zdroj [14]	47
23	Spřáhlo. Zdroj [28]	48
24	Průběh součinitele adheze. Zdroj [14]	50
25	Základní tvar trakční charakteristiky stejnosměrných HV. Zdroj [14]	52
26	Základní tvar trakční charakteristiky střídavých HV. Zdroj [14]	53
27	Základní tvar tr. char. el. HV s plynulou pulzní regulací. Zdroj [14]	54
28	Základní tvar tr. char. HV s mech. přenosem výkonu. Zdroj [14]	55
29	Základní tvar tr. char. HV s hydrodynam. přenosem výkonu. Zdroj [14]	56
30	Základní tvar tr. char. HV s elektrickým přenosem výkonu. Zdroj [14]	57
31	Detail hnacího vozidla	60
32	Detail vlaku	60
33	Pohyb vozidla na sklonu. Zdroj [14]	63
34	Ukázka tachogramu	66
35	Ukázka části infrastruktury	69
36	Katalog vlaků	72
37	Detail vlaku: základní parametry	73
38	Detail vlaku: vozidla	74
39	Detail vlaku: příjezd	74
40	Detail vlaku: Interval	75
41	Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 363_O_HZB	85
42	Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 363_O_HZB	85
43	Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 363_O_BZH	87

44	Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 363_O_BZH . . .	87
45	Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 754_O_BZH	89
46	Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 754_O_BZH . . .	89
47	Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 471_O_BZH	91
48	Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 471_O_BZH . . .	91
49	Tachogram pro RV 363_O_HZB při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti	92
50	Tachogram pro RV 363_O_HZB při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti	93
51	Tachogram pro RV 363_O_HZB při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti	93
52	Tachogram pro RV 363_O_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti	94
53	Tachogram pro RV 363_O_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti	94
54	Tachogram pro RV 363_O_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti	95
55	Tachogram pro RV 754_O_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti	95
56	Tachogram pro RV 754_O_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti	96
57	Tachogram pro RV 754_O_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti	96
58	Tachogram pro RV 471_O_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti	97
59	Tachogram pro RV 471_O_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti	97
60	Tachogram pro RV 471_O_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti	98
61	Porovnání podrobných výsledků sim. experimentů s původními hodnotami	104

# Seznam tabulek

1	Technické údaje lokomotivní řady 363. Zdroj [16] . . . . .	34
2	Technické údaje elektrické jednotky řady 471. Zdroj [17] . . . . .	36
3	Technické údaje HV řady 471. Zdroj [17] . . . . .	36
4	Technické údaje vloženého vozu řady 071. Zdroj [17] . . . . .	36
5	Technické údaje řídicího vozu řady 971. Zdroj [17] . . . . .	36
6	Technické údaje lokomotivní řady 742. Zdroj [18] . . . . .	38
7	Technické údaje lokomotivní řady 754. Zdroj [19] . . . . .	40
8	Základní technické parametry vozu řady Bdmpee <sup>233</sup> . Zdroj [21] . . . . .	42
9	Základní technické parametry vozu 054.2 bdtm . . . . .	43
10	Základní technické parametry vozu řady Eas. Zdroj [24] . . . . .	44
11	Alternativní nástroje k simulátoru MesoRail. Zdroj [9] . . . . .	58
12	Přehled typů pojezdu a příslušných koef. součinitele voz. odporu. Zdroj [14]	62
13	Ukázky označení pojezdů. Zdroj [22] . . . . .	62
14	Hodnoty přídatného sklonu jako náhrady odporu oblouku. Zdroj [14] . . .	64
15	Hodnoty součinitele rotujících hmot. Zdroj [14] . . . . .	64
16	Význam křivek v rámci tachogramu . . . . .	66
17	Tabulkové hodnoty trakčních charakteristik hnacích vozidel. Zdroj [12] . .	71
18	Přehled simulačních scénářů (1/5) . . . . .	76
19	Přehled simulačních scénářů (2/5) . . . . .	77
20	Přehled simulačních scénářů (3/5) . . . . .	77
21	Přehled simulačních scénářů (4/5) . . . . .	78
22	Přehled simulačních scénářů (5/5) . . . . .	78
23	Přehled parametrů referenčních vlaků . . . . .	79
24	Přehled referenčních vlaků . . . . .	80
25	Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdní dobou pro směr HZB .	82
26	Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdní dobou pro směr BZH .	82
27	Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdní dobou pro RV . . . . .	83
28	Výsledky experimentů pro referenční vlak 363_O_HZB . . . . .	84
29	Výsledky experimentů pro referenční vlak 363_O_BZH . . . . .	86
30	Výsledky experimentů pro referenční vlak 754_O_BZH . . . . .	88
31	Výsledky experimentů pro referenční vlak 471_O_BZH . . . . .	90
32	Koeficienty polynomu pro RV 363_O_HZB . . . . .	100
33	Koeficienty polynomu pro RV 363_O_BZH . . . . .	100
34	Koeficienty polynomu pro RV 754_O_BZH . . . . .	101
35	Koeficienty polynomu pro RV 471_O_BZH . . . . .	101
36	Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 363_O_HZB	102
37	Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 363_O_BZH	102
38	Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 754_O_BZH	103
39	Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 471_O_BZH	103
40	Hodnoty koeficientů x a y pro RV 363_O_HZB . . . . .	106
41	Hodnoty koeficientů x a y pro RV 363_O_BZH . . . . .	107
42	Hodnoty koeficientů x a y pro RV 754_O_BZH . . . . .	108
43	Hodnoty koeficientů x a y pro RV 471_O_BZH . . . . .	109

# Seznam zkratek

<b>AEG</b>	Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft
<b>BZH</b>	směr jízdy vlaku Beroun-Zdice-Hořovice
<b>ČD</b>	České dráhy
<b>ČKD</b>	Českomoravská-Kolben-Daněk
<b>ČR</b>	Česká republika
<b>ČSD</b>	Československé státní dráhy
<b>ES</b>	elektrická vícesystémová lokomotiva
<b>HV</b>	hnací vozidlo
<b>HZB</b>	směr jízdy vlaku Hořovice-Zdice-Beroun
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>LCG</b>	Linear Congruential Generator
<b>MLCG</b>	Multiplicative Linear Congruential Generator
<b>MRG</b>	Multiple-recursive generator
<b>MS</b>	Microsoft
<b>Os</b>	osobní vlak
<b>R</b>	rychlík
<b>RV</b>	referenční vlak
<b>SW</b>	software

# Úvod

Železniční doprava představuje v dnešní době stále velké procento veškerého objemu přepravy, ať už se jedná o přepravu nákladů nebo osob. Je kladen velký důraz na jízdní doby vlaků, přičemž je snahou tyto doby pokud možno minimalizovat. Jaké parametry a do jaké míry ovlivňují tyto jízdní doby, je předmětem zkoumání této práce. Vzhledem k tomu, že samotný provoz vlaků je finančně nákladná záležitost, často je v praxi využívána technika simulace. Právě pomocí simulace jsou vztahy mezi různými parametry vlaků a jejich jízdní dobou zjišťovány. Celá práce je rozdělena do dvou částí - teoretické a praktické. Každá část práce je navíc rozdělena do několika kapitol, přičemž každá kapitola se zabývá specifickou tematikou.

V teoretické části je kladen důraz zejména na popsání principů vytváření vstupů do simulátorů a analýzu výstupů ze simulátorů. Kapitola zabývající se vstupy popisuje statistické nástroje, jako je např. histogram, které lze použít pro určení rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, která představuje vstupní proud dat. Dále je zde detailně popsán specializovaný nástroj Input Analyzer. Dále se tato kapitola zabývá statistickými testy a pro zajímavost je zde také uveden princip generátorů pseudonáhodných čísel, které tvoří nedílnou součást simulátorů. Na závěr kapitoly je uvedena definice simulačního scénáře.

Kapitola zabývající se zpracováním výstupů ze simulátoru pokrývá problematiku replikací a určení jejich počtu, dále uvádí nejvýznamnější statistické ukazatele, jako je např. střední hodnota nebo směrodatná odchylka.

Další kapitola se zabývá problematikou hnacích vozidel. V rámci této kapitoly jsou popsány 4 typy hnacích vozidel, které jsou použity při experimentování. U každého typu vozidla je uvedena stručná historie vývoje, jeho technické parametry, fotografie a trakční charakteristika. Problematikou trakčních charakteristik se zabývá následující kapitola. Kromě hnacích vozidel je tato kapitola věnována i vozům, které jsou rovněž v rámci simulačního modelu použity.

Na pomezí mezi teoretickou a praktickou částí je umístěna kapitola týkající se samotného simulátoru a simulačního modelu. V rámci této práce nebyl simulátor vytvářen, ale byl použit aktuálně vyvíjený simulační nástroj s názvem MesoRail. Tento simulátor je vyvíjen Ing. Romanem Divišem jako jeho disertační práce. Samotná kapitola se zabývá popisem simulátoru, popisem dynamiky jízdy vlaku a parametry, které ovlivňují výpočet této dynamiky. Závěrem kapitoly je stručně představena problematika tachogramů.

V praktické části jsou nejprve popsány úpravy zdrojového kódu simulátoru. Cílem těchto úprav byla možnost ukládání jízdní doby vlaků do textového souboru. Z tohoto souboru byly následně výsledky přeneseny do aplikace MS Excel, kde byly analyzovány. Kromě těchto úprav je v úvodní kapitole praktické části popsána železniční infrastruktura, na které byly experimenty prováděny. Také zde byly uvedeny parametry vlaků, které byly testovány, do jaké míry ovlivňují jízdní dobu vlaků.

Další kapitola se zabývá vytvářením vstupů do simulátoru. Je zde popsána tvorba hnacích vozidel, vozů a celých vlaků. Dále následuje stanovení počtu replikací pomocí grafu ustalování hodnot. Poté jsou představeny jednotlivé simulační scénáře a je popsána problematika tzv. referenčních vlaků, tedy vlaků, které reprezentují danou skupinu vlaků.

Stěžejní kapitola praktické části se zabývá analýzou získaných výsledků. Nejprve byla

provedena tzv. korelační analýza, pomocí které byly stanoveny hypotézy o významu daných parametrů pro jízdní doby vlaků. Samotná korelační analýza byla také popsána teoreticky. Následně byly analyzovány výsledky experimentů s referenčními vlaky. Kromě analýzy výsledků je součástí této kapitoly také sada tachogramů, pomocí které je vyjádřen průběh jízdy vybraných vlaků.

Výsledky experimentů jsou na závěr vyhodnoceny. Jsou stanoveny rovnice, které popisují trend závislosti jízdní doby na daném parametru. Přesnost vybraných rovnic je následně otestována pomocí poslední sady experimentů, u kterých je daný parametr vlaku snižován po 2 procentech. Dále jsou vyhodnoceny závislosti jízdní doby na kombinaci různých parametrů. Tyto závislosti byly stanoveny na základě regresní analýzy.

Na závěr jsou shrnuty možnosti uplatnění této práce v praxi a také možnosti rozšíření simulačních experimentů o další hnací vozidla, vozy a infrastruktury.

# 1 Techniky vytváření vstupů do simulátoru

Tato kapitola vychází z [1, 3].

Simulátor pro svou činnost vyžaduje množinu vstupních dat, se kterou jsou následně prováděny simulační experimenty. Množinu vstupních dat lze získat různými způsoby. Jednou z možností je použít skutečná historická data (např. příchody zákazníků do obchodu, které jsou sledovány po určitý čas). Vstupní data také mohou být vytvářena na základě plánování určitých činností. Příkladem může být jízdní řád nebo pracovní rozvrh. Vstupy je také možno generovat pomocí softwarových generátorů, které jsou založeny na deterministických předpisech.

Výše zmíněné postupy získání vstupních dat jsou označovány jako tzv. deterministické. To znamená, že pro svou činnost nepoužívají náhodné vlivy. Naproti tomu stochastické metody získávání množiny vstupních dat náhodnost uplatňují. Jedná se zejména o generátory pseudonáhodných čísel. Tyto generátory jsou vytvářeny buď na základě skutečných historických dat, nebo na základě expertního doporučení.

Deterministické a stochastické techniky modelování vstupů do simulátoru se často kombinují. Základní množina vstupních dat je obvykle vytvořena na základě deterministické metody a následně je do této množiny zanesena náhodnost pomocí stochastické metody. Příkladem může být generátor vstupů např. do simulace železniční stanice. Cílem tohoto generátoru je vytvářet příjezdy vlaků do dané stanice. Tyto příjezdy se řídí daným jízdním řádem. Aby se simulátor více blížil realitě, ve které mohou vlaky nabírat zpoždění, je toto zpoždění generováno pomocí stochastické metody generování vstupů.

## 1.1 Nástroje pro zkoumání souboru vstupních dat

V této části jsou popsány 3 nástroje, pomocí kterých je možné popsat chování proudu vstupních dat. Cílem je nalézt takové rozdělení pravděpodobnosti, které bude dobře odpovídat realitě. V podstatě se jedná o transformaci skutečného proudu dat na dané rozdělení pravděpodobnosti, ze kterého jsou následně generovány vstupy do simulátoru.

### 1.1.1 Histogram

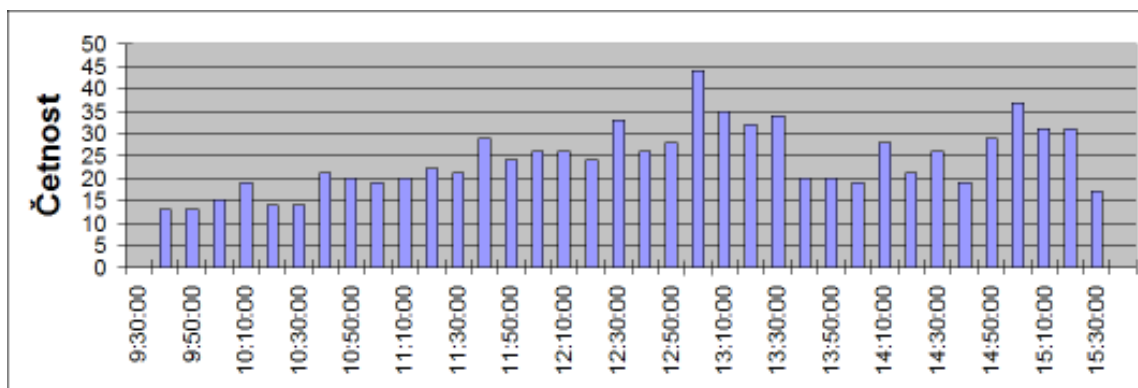
Histogram představuje jednoduchý způsob, jak zobrazit tvar rozdělení pravděpodobnosti dat. Nejdůležitějším parametrem histogramu je šířka třídy. Volba šířky třídy je kritická pro správnou interpretaci dat. Nejčastěji se používají histogramy s konstantní šířkou třídy. Poté je celkový soubor dat rozdělen na  $M$  stejně širokých tříd. Při zpracování dat je vhodné vytvořit více histogramů pro stejná data, které se liší šířkou třídy. Tímto způsobem lze získat různé pohledy na daná data. Zatímco histogram s nižším počtem tříd vystihuje obecný trend rozdělení dat, tak histogram s vyšším počtem tříd více zohledňuje detaily množiny dat. Počet tříd lze odvodit pomocí následujících 2 vztahů.

$$l = \text{int}(2 \ln N) \quad (1)$$

$$l = \text{int}(2\sqrt{(N)}) \quad (2)$$

Kde  $l$  je počet tříd,  $\text{int}$  představuje funkci pro získání celého čísla, a  $N$  je celkový počet tříd.

Graficky lze histogram znázornit jako sloupcový graf, přičemž jednotlivé sloupce reprezentují dané třídy a jejich výška četnost dané třídy. Ukázka histogramu je zobrazena na následujícím obrázku.

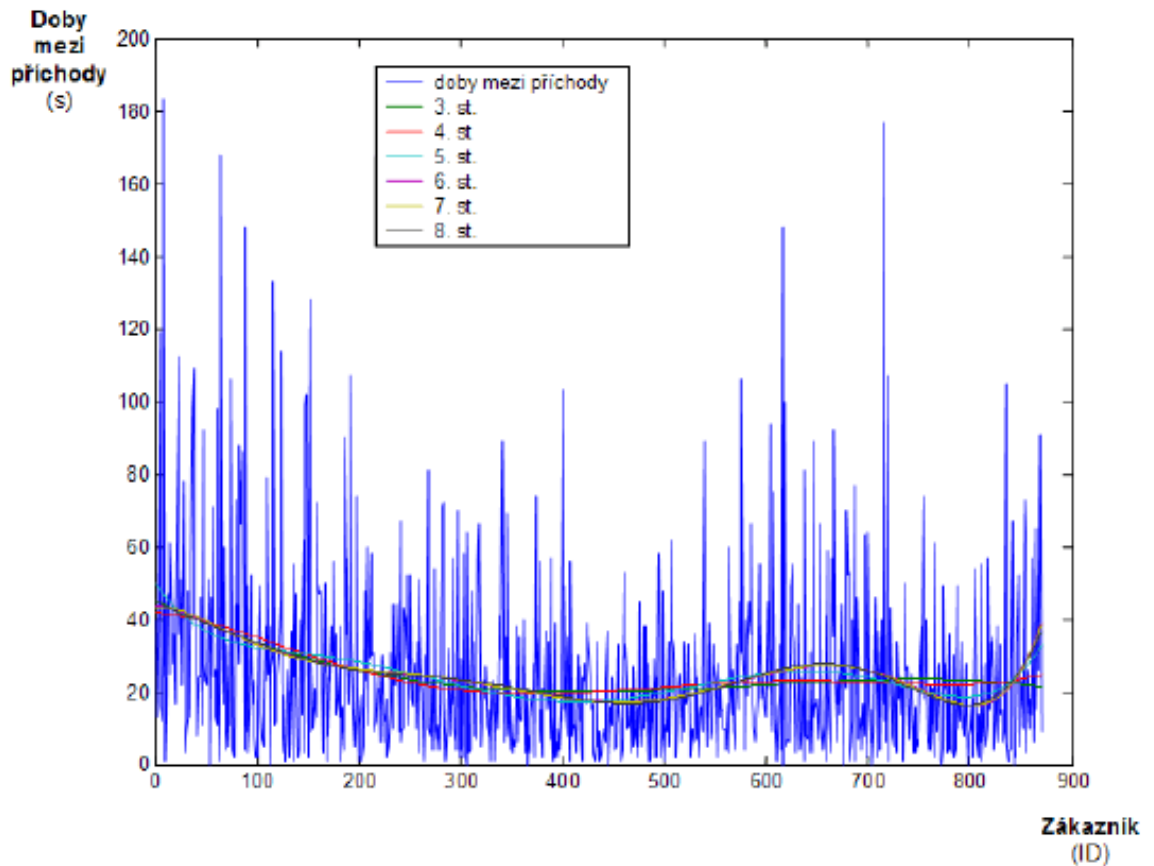


Obrázek 1: Ukázka histogramu [1]



### 1.1.2 Regresní model

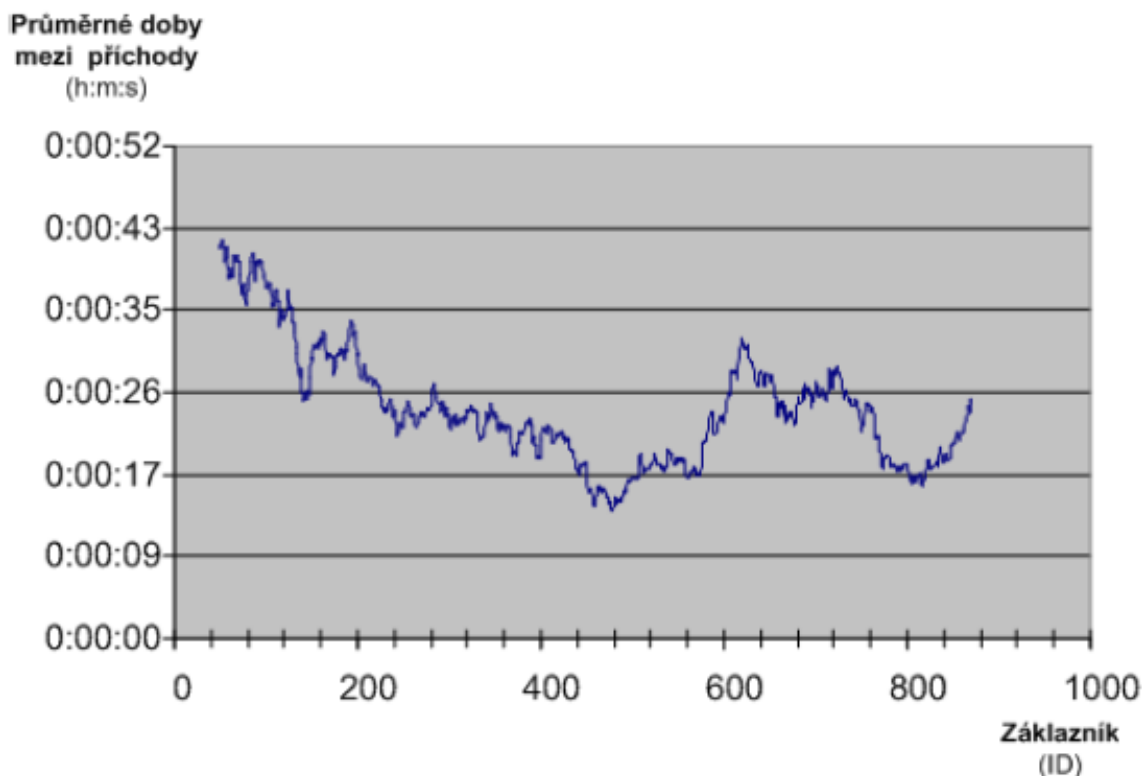
Regresní modely obvykle slouží pro předpověď hodnoty tzv. vysvětlované proměnné na základě hodnoty proměnné vysvětlující. Obecně regresní model slouží k vyhlazení množiny dat. Regresní funkce se obvykle volí co nejjednodušší. Lze použít např. lineární nebo exponenciální funkci, popř. také polynomy nízkých stupňů. Při použití regrese pomocí polynomu je kritickým parametrem stupeň polynomu. Obecně platí, že čím je stupeň polynomu vyšší, tím více daná funkce reaguje na změny v datech. Ukázka použití regrese je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 2: Ukázka regrese [1]

### 1.1.3 Klouzavý průměr

Klouzavý průměr slouží stejně jako regresní model k vyrovnání datové řady. Původní posoupnost dat je nahrazena řadou průměrů. Tyto průměry se počítají vždy z  $k$  po sobě jdoucích hodnot původní datové řady. Hodnota  $k$  se nazývá pozorovací okno. Stanovení šířky pozorovacího okna obvykle vychází z vlastností sledovaného jevu. Platí zde pravidlo, že čím je šířka okna menší, tím více klouzavý průměr reaguje na změny v datech. Naproti tomu, čím je šířka pozorovacího okna větší, tím více dochází k přehlazení dat. Ukázka použití klouzavého průměru je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 3: Ukázka klouzavého průměru [1]

Pomocí těchto nástrojů je tedy možné přibližně určit typ rozdělení pravděpodobnosti datového souboru. Parametry daného rozdělení jsou spočítány pomocí popisné statistiky. Těmito parametry se rozumí např. střední hodnota nebo rozptyl. Podrobnější vysvětlení uvedených nástrojů lze nalézt v [2].

## 1.2 Statistické testy

Nejvhodnějším nástrojem pro určení teoretického rozdělení pravděpodobnosti je histogram. Po jeho vytvoření se z jeho tvaru odhadne daný typ rozdělení pravděpodobnosti. Následně po výpočtu parametrů tohoto rozdělení je zformulována statistická hypotéza o tvaru rozdělení pravděpodobnosti. Tato tzv. nulová hypotéza může být testována celou řadou

statistických testů. Nejčastěji se používají 2 testy a to Kolmogorovův-Smirnovův test a  $\chi^2$  test. Výhodou prvního zmíněného testu je, že není vyžadováno velké množství hodnot pro potvrzení hypotézy. Níže následuje stručný popis obou testů.

### $\chi^2$ test

U tohoto testu je testovacím kritériem statistika

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} \quad (3)$$

Kde  $k$  je počet tříd,  $m_i$  je pozorovaná četnost  $i$ -té třídy,  $n$  je počet všech pozorování a  $p_i$  je teoretická pravděpodobnost výskytu pozorované hodnoty v  $i$ -té třídě.

Bývá požadováno, aby v 80 % tříd platilo  $np_i > 5$ . Pokud toto není splněno, jsou třídy sdružovány.

Nulovou hypotézu zamítáme, pokud hodnota testovacího kritéria přesáhne hodnotu  $1 - \alpha$  % kvantilu rozdělení  $\chi^2$  s  $k - r - 1$  stupni volnosti, kde  $k$  je počet tříd a  $r$  je počet odhadovaných parametrů daného rozdělení pravděpodobnosti. Hodnotu daného kvantilu  $\chi^2$  rozdělení lze získat ze statistických tabulek [6].

### Kolmogorovův-Smirnovův test

Tento test je vhodné použít, pokud je třeba testovat statistický soubor s omezeným počtem dat. Na rozdíl od  $\chi^2$  testu, který sčítá odchylky od předpokládaného stavu v jednotlivých třídách, Kolmogorovův-Smirnovův test porovnává hodnoty empirické a teoretické distribuční funkce v daných bodech a nulová hypotéza je zamítnuta, překročí-li kritickou hodnotu největší ze zjištěných odchylek. Obecně platí, že tento test má menší sílu k zamítnutí nulové hypotézy než  $\chi^2$  test. Kritickou hodnotu pro tento test je opět možné nalézt ve statistických tabulkách [5]. Výpočty provedené v rámci tohoto testu jsou následující:

$$F_{e1}(x) = \frac{i - 1}{n} \quad (4)$$

$$F_{e2}(x) = \frac{i}{n} \quad (5)$$

Kde  $F_e$  představuje hodnotu empirické distribuční funkce,  $i$  je pořadí hodnoty ve výběru a  $n$  je počet hodnot.

Pro každou třídu jsou spočítána 2 testovací kritéria, přičemž jako konečné kritérium je bráno maximum z těchto hodnot.

$$K_1 = |F(x) - F_{e1}(x)| \quad (6)$$

$$K_1 = |F(x) - F_{e2}(x)| \quad (7)$$

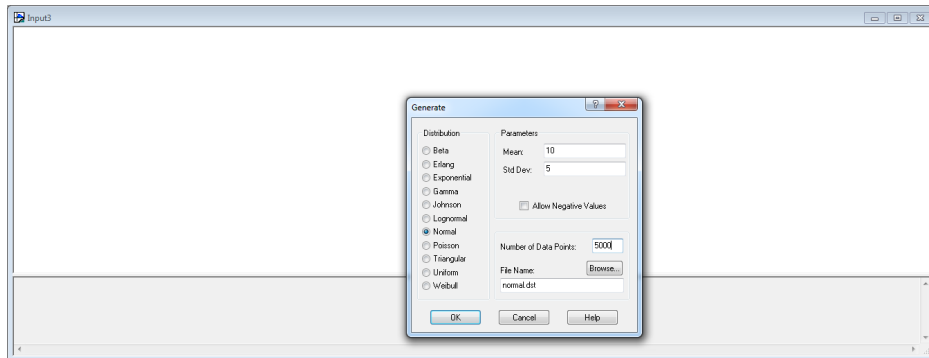
Kde  $F(x)$  je teoretická hodnota distribuční funkce v daných bodech.

Obecný postup tohoto testu spočívá v setřídění hodnot výběru od nejmenší k největší. Následně tyto hodnoty obdrží číslo svého pořadí ( $i$ ). Poté jsou provedeny výpočty  $F_{e1}$  a  $F_{e2}$  a je stanovena teoretická hodnota distribuční funkce v daném bodě. Poté jsou spočítány testovací statistiky  $K1$  a  $K2$ . Vyšší hodnota je následně porovnána s kritickou hodnotou. Pokud alespoň jedna testovací statistika převýší kritickou hodnotu, je nulová hypotéza zamítnuta.

## 1.3 Specializované nástroje

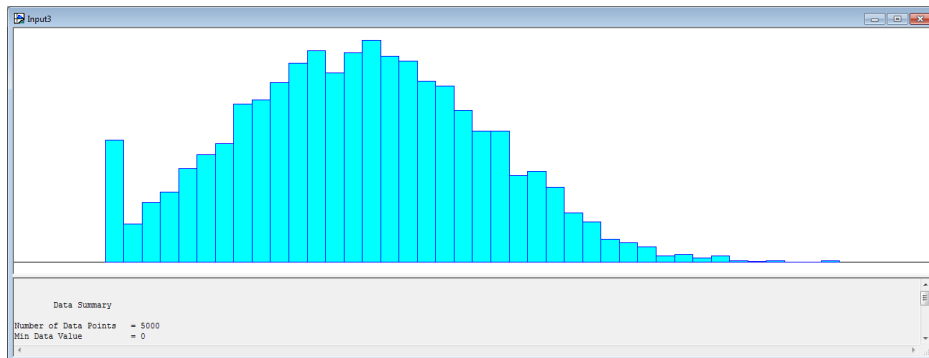
Kromě těchto klasických postupů je možné využít i specializované nástroje pro určení rozdělení pravděpodobnosti dané množiny vstupních dat. Jedním z těchto nástrojů je Input Analyzer, který je poskytován simulačním SW Arena od společnosti Rockwell Automation. Tento nástroj umožňuje datový soubor proložit celou řadou rozdělení pravděpodobnosti. Kromě toho jsou provedeny oba výše zmíněné testy, přičemž jejich výsledkem je tzv. p-hodnota. Obecně p-hodnota představuje nejmenší hladinu, na které je nulová hypotéza zamítnuta [4]. Postup práce s nástrojem Input Analyzer následuje. Pro zjednodušení jsou data vygenerována přímo tímto nástrojem.

### 1. Vytvoření datového souboru



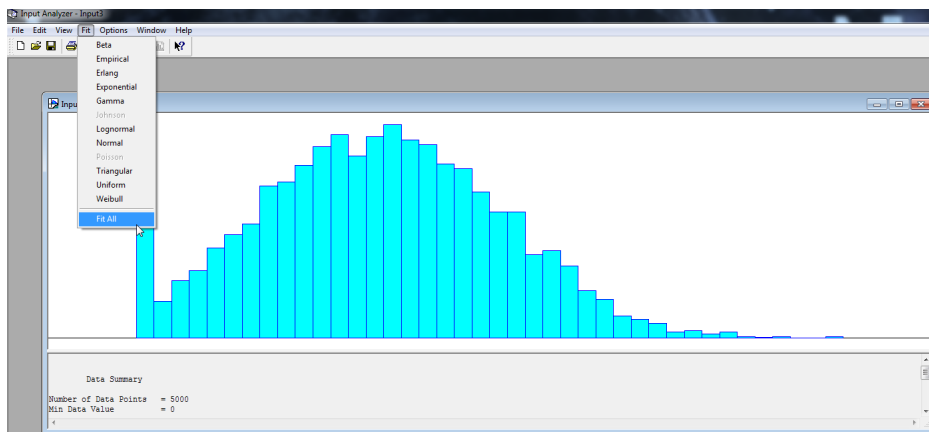
Obrázek 4: Vytvoření datového souboru

### 2. Zobrazení dat



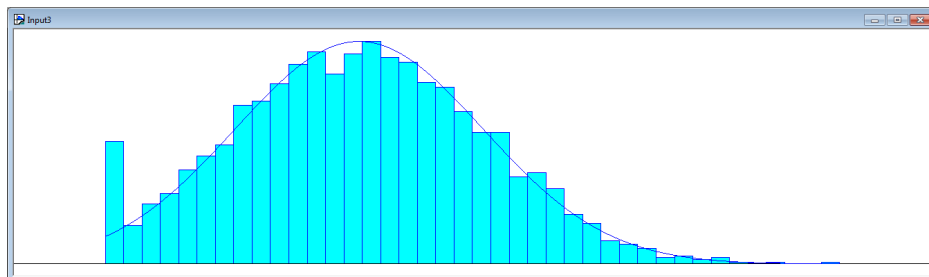
Obrázek 5: Zobrazení dat

### 3. Výběr rozdělení



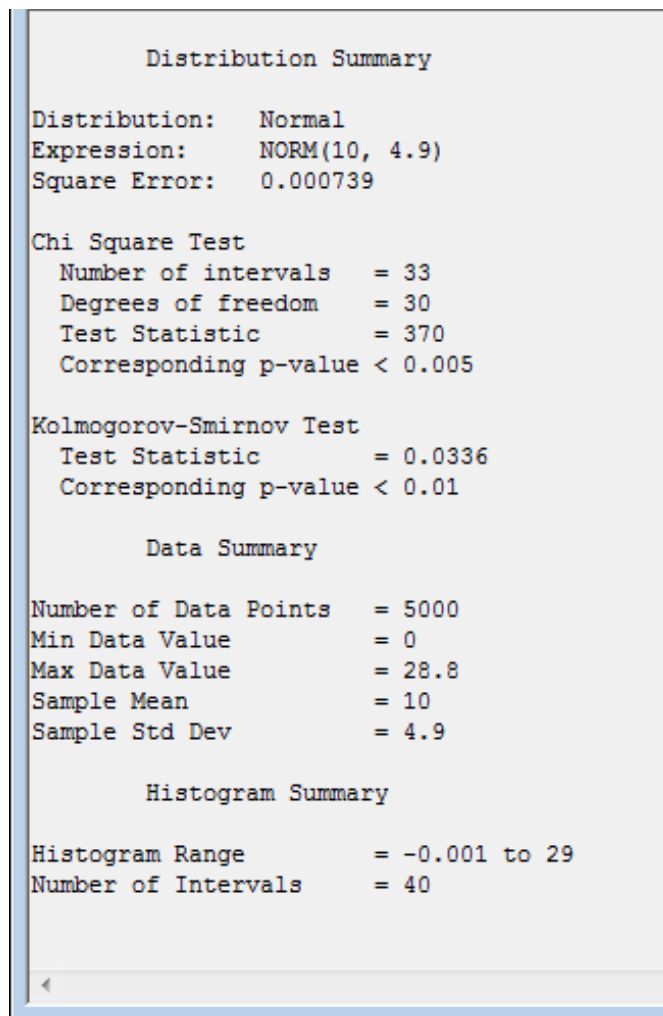
Obrázek 6: Výběr rozdělení

### 4. Proložení datového souboru křivkou hustoty rozdělení pravděpodobnosti



Obrázek 7: Proložená data

## 5. Výstup v podobě numerických hodnot



Obrázek 8: Výstup z nástroje Input Analyzer

Jak z obrázků vyplývá, uživatel tohoto nástroje není nucen ani odhadovat typ rozdělení pravděpodobnosti. Pokud je zvolena volba „Fit All“, je automaticky vybráno takové rozdělení pravděpodobnosti, které nejlépe odpovídá danému datovému souboru.

Dalším nástrojem, který umožňuje komplexní analýzu datového souboru je např. SW Statistica vyvíjený společností StatSoft.

## 1.4 Generátory pseudonáhodných čísel

Generátory pseudonáhodných čísel slouží v oblasti simulací k vytváření skutečných vstupů do simulátoru. Kromě toho tyto generátory slouží ke generování i jiných hodnot než pouze vstupů. Jedná se např. o doby obsluhy v rámci simulátoru. Obecným požadavkem na tyto generátory je, aby vytvářely takové náhodné proměnné, které jsou sekvencí nezávislých a rovnoměrně rozdělených hodnot, typicky z intervalu  $(0,1)$ . Tyto hodnoty jsou následně transformovány do intervalu, který odpovídá danému rozdělení pravděpodobnosti. Ve skutečnosti ovšem tyto generátory často vytvářejí taková čísla, která jsou deterministicky odvozena a pouze se jako náhodná „tváří“. V tomto případě se jedná právě o výše zmíněná pseudonáhodná čísla.

### 1.4.1 Vlastnosti generátorů pseudonáhodných čísel

#### Nepředvídatelnost a „pravá“ náhodnost

Cílem generátoru pseudonáhodných čísel by mělo být vytváření takové sekvence náhodných proměnných, aby žádný statistický test ani počítačový program nemohl určit ani jeden bit následujícího čísla s pravděpodobností vyšší než  $\frac{1}{2}$ . To je bohužel nerealizovatelný problém, protože každá sekvence pseudonáhodných čísel může být determinována dostatečným sledováním. To je dáno tím, že tato sekvence je periodická. Proto je také možné vždy zkonstruovat test, pokud existuje dostatečné množství času, který vždy pro danou sekvenci skončí zamítnutím nulové hypotézy.

#### Délka periody

Jak již bylo zmíněno výše, generátor pseudonáhodných čísel vytváří pseudonáhodnou sekvenci, která je periodická. Stěžejním parametrem tedy je délka periody dané sekvence. Pokud se uvažuje, že simulátor pro svou činnost vyžaduje  $N$  náhodných čísel z pseudonáhodné sekvence o délce  $\rho$ , pak by mělo platit  $\rho \gg N$ . Pro lineární kongruentní generátor platí dokonce  $\rho \gg N^2$ . Perioda délky  $2^{32}$ , dokonce i  $2^{64}$  je považována za nedostatečnou. Sekvence s nízkou délkou periody může být vyčerpána v rámci minut. Proto se v dnešní době používají generátory s délkou periody vyšší než  $2^{200}$ .



## **Efektivita**

Efektivitou se rozumí zejména časové a paměťové nároky na generátor. Většinou platí, že vytvoření pseudonáhodného čísla trvá pouze zlomek simulačního času. Proto se vyskytují takové názory, že rychlost generování není pro simulace příliš důležitá. Naproti tomu, v některých případech je rychlé vytváření pseudonáhodných čísel kritické pro celou simulaci, protože simulační výpočet netrvá příliš velkou dobu, simulátor zato pracuje s velkým množstvím vstupních dat. Příkladem může být například rozsáhlý simulátor v oblasti částicové fyziky nebo intenzivní používání metody Monte Carlo ke stanovení distribuční funkce dat ze statistického souboru, přičemž je kladen důraz na přesnost výpočtu. Dalším důvodem k zamyšlení se nad rychlostí generátoru je fakt, že pokud vytváření vstupů do simulátoru trvá 5 % celkového simulačního času, tak při použití jiného, 20× pomalejšího generátoru bude vést k navýšení celkového simulačního času na dvojnásobek. To je závažný důsledek, zejména pokud se vezme v potaz, že některé simulační výpočty mohou probíhat v řádech hodin.

Paměťová náročnost generátoru pseudonáhodných čísel je také velice důležitá, obzvláště pokud je třeba generovat obrovské množství čísel.

## **Reprodukovatelnost**

Reprodukovatelností se rozumí schopnost replikovat stejnou sekvenci pseudonáhodných čísel. Tato vlastnost je velkou výhodou pseudonáhodných sekvencí oproti sekvencím generovaným fyzickými zařízeními. Tyto sekvence samozřejmě mohou být uloženy v paměti nebo na pevném disku a použity, když jsou potřeba, to je ovšem méně vyhovující než dobrý generátor pseudonáhodných čísel napsaný v několika řádcích vyššího programovacího jazyka. Jedná se zejména o paměťovou náročnost, která je v případě velice dlouhá sekvence obrovská.

Mezi další vlastnosti generátoru pseudonáhodných čísel patří také potlačení nežádoucí korelace mezi jednotlivými vygenerovanými čísly a možnost generovat různá pseudonáhodná čísla při použití různé násady pro generátor.

## 1.4.2 Typy generátorů pseudonáhodných čísel

- Lineární kongruentní generátor (LCG)
- Multiplikativní lineární kongruentní generátor (MLCG)
- Multiple-recursive generátor (MRG)
- Kombinovaný LCG a MRG
- Inverzní kongruentní generátor
- Kvadratický kongruentní generátor

## 1.4.3 Matematická definice generátoru pseudonáhodných čísel

Generátor pseudonáhodných čísel je struktura  $\mathcal{G} = (S, s_0, T, U, G)$ , kde  $S$  je konečná množina stavů,  $s_0$  je počáteční stav (násada), platí  $s_0 \in S$ , přechod  $T : S \rightarrow S$  se nazývá přechodová funkce,  $U$  je konečná množina výstupních symbolů a  $G : S \rightarrow U$  je výstupní funkce.

Stav generátoru je na počátku je roven  $s_0$  a dále se rozvíjí podle rekurence  $s_n = T(s_{n-1})$  pro  $n = 1, 2, 3, \dots$ . V kroku  $n$  je výstupem generátoru číslo  $u_n = G(s_n)$ . Čísla  $u_n$ , kde  $n > 0$  představují pozorování, se také nazývají náhodná čísla vytvořená generátorem. Vzhledem k tomu, že stavový prostor  $S$  je konečný, sekvence stavů  $s_n$  je periodická. To znamená, že existují taková  $i$  a  $j$ , že platí  $s_j = s_i$  pro  $j > i \geq 0$ . Stejně tak platí  $s_{j+n} = s_{i+n}$  a  $u_{j+n} = u_{i+n}$  pro všechna  $n \geq 0$ . Délka periody je takové nejmenší celé číslo  $\rho > 0$ , pro které platí, že všechna  $n \geq \tau$ ,  $s_{\rho+n} = s_n$ , kde  $\tau \geq 0$ . Nejmenší číslo  $\tau$  s touto vlastností se nazývá přechod. Pokud  $\tau = 0$ , poté se výstupní sekvence nazývá čistě periodická. Délka periody nemůže přesáhnout mohutnost stavového prostoru  $S$ . Dobré generátory mají  $\rho$  velmi blízko této mohutnosti. Pokud tomu tak není, dochází k plýtvání počítačovou pamětí.

#### 1.4.4 Příklad generátoru pseudonáhodných čísel

Nejznámější a nejčastěji používaný generátor pseudonáhodných čísel je lineární kongruentní generátor. Stav v kroku  $n$  je celé číslo  $x_n$  a přechodová funkce  $T$  je definována jako

$$x_n = (ax_{n-1} + c) \bmod m \quad (8)$$

Kde  $m > 0$ ,  $a > 0$  a  $c$  jsou celá čísla nazývaná modul, multiplikátor a aditivní konstanta.

Tento vzorec představuje vynásobení  $x_{n-1}$  hodnotou  $a$ , přičtení  $c$  a získání zbytku po dělení číslem  $m$ . V tomto případě je  $s_n$  rovno  $x_n$  a stavový prostor  $S$  je množina  $\{0, \dots, m-1\}$ . Pokud je výstupní funkce  $G$  definována jako  $u_n = G(x_n) = \frac{x_n}{m}$ , budou vytvářeny hodnoty z intervalu  $[0, 1]$ .

Pokud je  $c = 0$ , pak se tento generátor nazývá multiplikativní lineární kongruentní generátor. Maximální délka periody je obecně rovna  $m$ . Často se používají hodnoty  $m = 2^{31-1}$  a  $m = 2^{32}$ . Ty jsou dnes ovšem již nedostatečné, jak bylo zmíněno výše.

Následuje ukázka činnosti generátoru.

$$m = 2^{31-1} = 2\,147\,483\,647$$

$$c = 0$$

$$a = 16\,807$$

$$x_1 = 16\,807 \cdot 12\,345 \bmod 2\,147\,483\,647 = 207\,482\,415$$

$$u_1 = \frac{207\,482\,415}{2\,147\,483\,647} = 0,0966165285$$

$$x_2 = 16\,807 \cdot 207\,482\,415 \bmod 2\,147\,483\,647 = 1\,790\,989\,824$$

$$u_2 = \frac{1\,790\,989\,824}{2\,147\,483\,647} = 0,8339946274$$

$$x_3 = 16\,807 \cdot 1\,790\,989\,824 \bmod 2\,147\,483\,647 = 2\,035\,175\,616$$

$$u_3 = \frac{2\,035\,175\,616}{2\,147\,483\,647} = 0,9477024977$$

a tak dále.

## 1.5 Scénáře

Scénář v rámci simulačního modelu definuje dynamické chování tohoto simulačního modelu během provádění simulačního experimentu. Scénář je určen:

- Scénou
- Pravidly vstupů, pravidly výstupů a vznikem a zánikem temporárních prvků
- Chováním procesů obsluhy

### Scéna

Scénou se rozumí množina všech permanentních prvků včetně jejich atributů.

Permanentní prvek je takový prvek, který je zachován v rámci celého simulačního experimentu. Jedná se zejména o procesy obsluhy, které mohou být představovány např. pokladnou v obchodě nebo výrobní linkou v podniku. Obecně permanentní prvky mohou být označeny jako infrastruktura simulačního modelu.

Jak bylo zmíněno výše, simulační model disponuje také prvky, které jsou temporární. Těmito prvky jsou zejména entity, které do simulátoru vstupují, jsou simulátorem ovlivněny a následně z něho mohou vystupovat. Jedná se např. o zákazníky nebo součástky.

Atributy představují množinu vlastností daného prvku. Hodnoty atributů se v rámci času mohou měnit. Proto platí, že stav simulátoru v daném časovém okamžiku je stanoven všemi prvky, které se v tomto čase v simulátoru vyskytují a hodnotami jejich atributů.

Pomocí různých scénářů je možné provádět různé simulační experimenty v rámci jednoho simulátoru. Tímto způsobem se vytvářejí různé varianty výsledků, které je možné mezi sebou porovnávat. Cílem provádění simulačních experimentů může být např. stanovení parametrů simulátoru tak, aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Těmito parametry se rozumí např. počet obslužných míst nebo účinnost obsluhy popř. její doba trvání.

## 2 Techniky zpracování výstupů ze simulátoru

Zatímco předchozí kapitola byla zaměřena na tvorbu vstupních dat do simulátoru, tato kapitola se zabývá statistickou analýzou výstupů ze simulátoru. Stejně jako předchozí kapitola i tato vychází zejména z [1, 3].

Jak bylo popsáno výše, vstupy do simulátoru jsou definovány jako pseudonáhodná čísla. Proto i výstupy ze simulátoru jsou náhodné. Tyto výstupy jsou typicky ukládány pro pozdější zpracování. Tím se rozumí provedení statistické analýzy a získání hodnot relevantních statistických ukazatelů. Tyto ukazatele vypovídají o charakteru zkoumaného objektu. Příkladem může být sledování doby obsluhy zákazníka v obchodě. Sledované statistické znaky mohou být např. střední hodnota nebo rozptyl.

### 2.1 Replikace

Replikace představuje běh simulátoru, který je nezávislý na ostatních bězích. Veškeré parametry jsou stejné pro všechny replikace. Liší se pouze násady pro generátory pseudonáhodných čísel a tedy i vstupní proudy dat do simulátoru. Replikace tedy představuje realizaci simulačního scénáře.

### 2.2 Stochastický proces

Výstupní data ze simulátoru jsou realizací stochastického procesu. Stochastický proces je pravděpodobnostní model systému, který se vyvíjí náhodně. Formálněji lze stochastický proces definovat jako sekvenci náhodných veličin uspořádaných podle času od počátku simulace. Jednotlivé náhodné veličiny v rámci jedné replikace nejsou na sobě nezávislé. Naproti tomu, náhodné veličiny zjištěné v různých replikacích, ale ve stejném okamžiku jsou na sobě nezávislé.

### 2.3 Typy simulací podle podmínek ukončení

Simulace se podle podmínek ukončení dělí na 2 typy:

#### 2.3.1 Simulace s ukončením

Simulace s ukončením jsou takové simulace, ve kterých při výskytu události  $U$  již nemá význam provádět další simulační experimenty. Informace získané po výskytu události  $U$  jsou již nepotřebné nebo nezajímavé. Zásadní roli v tomto typu simulací hrají počáteční podmínky. Po ukončení simulace se neočekává, že bude dosaženo stabilního stavu výstupních

dat. Událostí, která ukončí simulační běh, může být např. uplynutí stanoveného časového kvanta pro běh simulace nebo stav, kdy se v simulátoru již nenalézají žádné entity, které by jej mohli ovlivnit. V praxi to může představovat např. uplynutí směny v podniku nebo dojezd závodníků do cíle závodu. Počáteční podmínky představují takový stav simulátoru, který je nastaven před začátkem simulace. Může se jednat např. o počet obslužných míst.

### 2.3.2 Simulace bez ukončení

V rámci tohoto typu simulace nelze jednoznačně určit událost, která ukončuje běh simulátoru. Účelem takových simulací je pozorování chování simulovaného systému při dlouhodobé činnosti. Výstupní data takových simulátorů mohou dosáhnout 3 stavů:

- Ustálený stav
- Ustálený cyklický stav
- Neustálený stav

Tento stav představuje ustálení pravděpodobnostních rozdělení jednotlivých výstupních parametrů. Příkladem tohoto typu simulátoru může být simulace kontinuálně pracujícího komunikačního systému, kde cílem je určení střední hodnoty zpoždění datového paketu.

## 2.4 Výpočet statistických ukazatelů výstupního souboru dat

Výpočet statistických ukazatelů se liší podle typu simulace. Zatímco pro simulace s ukončením se do výpočtu zahrnují všechny získané hodnoty daného statistického znaku, v rámci simulace bez ukončení se použijí pouze hodnoty dosažené po ustálení simulátoru. Proto je tato podkapitola rozdělena na 2 samostatné části, přičemž první je zaměřena na simulace s ukončením a druhá na simulace bez ukončení.

### 2.4.1 Simulace s ukončením

Jak bylo zmíněno výše, v tomto typu simulací se pro výslednou statistickou analýzu používají všechny hodnoty daného výstupního statistického znaku ze simulátoru. Určeny jsou typicky tyto statistické ukazatele: střední hodnota, směrodatná odchylka, modus, medián, minimum a maximum. Výpočet je ovlivněn počtem replikací.

#### Střední hodnota

Vztah pro určení střední hodnoty je následující:

$$\bar{X}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (9)$$

Kde  $X_i$  je náhodná proměnná spojená s  $i$ -tou replikací a která je dána následujícím vztahem a  $n$  je počet replikací

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^m T_j}{m} \quad (10)$$

Kde  $m$  je počet událostí v rámci replikace, a  $T_j$  je sledovaná hodnota v rámci této události.

### Směrodatná odchylka

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}(n)]^2} \quad (11)$$

### Modus, medián, minimum a maximum

Modus představuje takovou hodnotu, která se ve statistickém souboru vyskytuje nejčastěji.

Medián je definován jako prostřední hodnota utříděného statistického souboru.

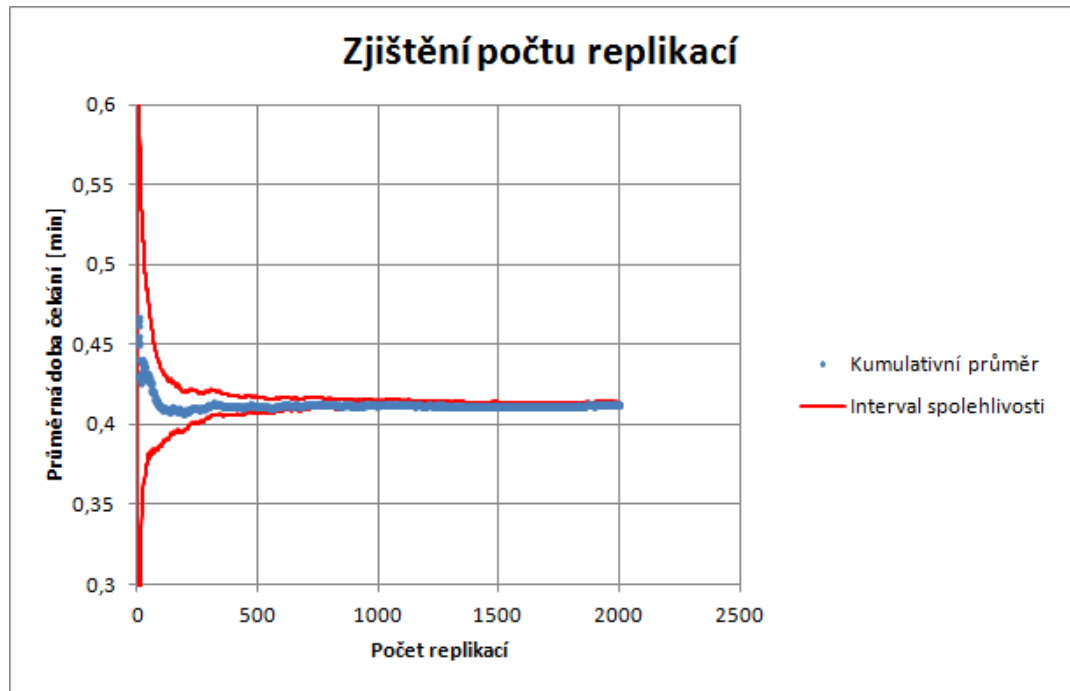
Minimum a maximum není třeba rozsáhleji definovat, jedná se o nejnižší a nejvyšší hodnotu ze statistického souboru.

### Volba počtu replikací

Počet replikací je kritická hodnota pro každý simulátor. Pokud není proveden dostatečný počet replikací, nemůže být dosaženo přesných výsledků. Obecně platí, čím větší počet replikací, tím přesnější výsledky. Cílem je tedy určit nejmenší nutný počet replikací, aby bylo dosaženo výsledků s požadovanou přesností. Jednou z možností, jak určit počet replikací je využití grafu ustalování hodnot. Tento graf znázorněný na následujícím obrázku představuje sledování kumulativního průměru hodnot. Vztah pro výpočet kumulativního průměru je uveden níže.

$$\bar{X}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{pro každé } k = 1, \dots, n \quad (12)$$

Kde  $n$  je počet replikací a  $T$  je hodnota sledovaného statistického znaku na konci replikace, resp. průměrná hodnota sledovaného statistického znaku na konci replikace.



Obrázek 9: Počet replikací

Z obrázku je patrné, že se zohledňuje také interval spolehlivosti. Vztah je uveden níže.

$$\bar{X}(n) \pm \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \quad (13)$$

Kde  $t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1}$  představuje  $1 - \frac{\alpha}{2}$  % kvantil studentova t-rozdělení o  $n - 1$  stupních volnosti.

Interval spolehlivosti představuje takovou hodnotu, která není překročena s pravděpodobností  $\alpha$  %. Tento vztah pro výpočet intervalu spolehlivosti platí pouze pro normální rozdělení pravděpodobnosti. Pro ostatní rozdělení platí pouze přibližně. Lze ovšem použít i přesnější metody.

Odhad nutného počtu replikací je také možné vypočítat pomocí tohoto vztahu:

$$N = \left( \frac{s_{\bar{x}} t_{1-\frac{\alpha}{2};N-1}}{\Delta} \right)^2 \quad (14)$$

Kde  $\Delta$  je určeno následovně

$$\Delta = \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{\alpha}{2};N-1} \quad (15)$$

Zde se předpokládá, že bylo provedeno  $N$  replikací a byly získány jednotlivé hodnoty náhodné veličiny  $X$ . Při prvním odhadu ovšem neexistuje představa o  $N$ , proto musí být kvantil studentova rozdělení nahrazen kvantilem normálního rozdělení  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ . Všechny tyto kvantily je možné nalézt ve statistických tabulkách [6].



## 2.4.2 Simulace bez ukončení

U tohoto typu simulací se obvykle očekává ustálení hodnot všech sledovaných statistických znaků. Klíčovým bodem je stanovení takového indexu  $k$ , že všechny hodnoty po tomto indexu jsou již ustálené. Statisticky se zpracovávají pouze hodnoty, které jsou již ustálené. Fáze simulace, kdy hodnoty ustáleny nejsou, se nazývá náběh nebo zahřívání. Cílem této fáze je eliminace přechodových stavů. Odhad parametru  $k$  je proveden na základě hodnot sledovaného statistického znaku  $Y_{k+1}, Y_{k+2}, \dots, Y_m$ . Tento odhad lze vyjádřit například:

$$\bar{Y}(m, k) = \frac{\sum_{j=k+1}^m Y_j}{m - k} \quad (16)$$

Další možností, jak určit hodnotu  $k$ , je použít Welchovu metodu, která používá výpočty klouzavých průměrů pro různá pozorovací okna. Tato metoda je detailně popsána v [7].

Jak bylo uvedeno výše, kromě ustálených hodnot je možné se setkat s tzv. ustálenými cyklickými hodnotami výstupních proměnných. Pokud je zjištěno, že výstupní hodnoty nejsou ustáleny, je možné se pokusit stanovit, jestli výstupy nejsou cyklické. Cykličnost může být způsobena cyklickým chováním simulátoru. Tím se rozumí např. směnový provoz v rámci podniku. Cykličnost je v tomto případě např. způsobena střídáním směn a případným náběhem a výběhem. Statistické ukazatele jsou poté vztaženy k daným cyklům.

## 3 Hnací vozidla

Již název diplomové práce vypovídá o tom, že stěžejní část představují vlaky. Tato práce za vlak označuje složení hnacího vozidla (lokomotivy) a vozů. Tato kapitola se zabývá popisem hnacích vozidel a vozů, které byly použity v rámci simulátoru. Kromě popisu a technických parametrů je uvedena také stručná historie každého hnacího vozidla a jeho trakční charakteristika formou obrázku. Problematikou trakčních charakteristik se zabývá následující kapitola. Kompletní popis velkého množství hnacích vozidel je uveden v [11].

Hnací vozidla jsou v rámci této práce rozdělena do dvou kategorií podle typu pohonu na elektrická a motorová.

### 3.1 Elektrická hnací vozidla

#### 3.1.1 Lokomotivní řada ES 499.1 (363)

Vzhledem k tomu, že dvousystémové lokomotivy Škoda řady ES 499.0 (350) nebyly svými parametry, které byly extrémní, plně využitelné, byl v roce 1976 zadán plzeňské lokomotivce požadavek na vývoj a výrobu nového typu univerzální lokomotivy. Tímto novým typem byla na svou dobu revoluční řada ES 499.1 (363). Tyto lokomotivy byly určeny jak pro stejnosměrnou, tak i pro střídavou napětovou soustavu a jako první na světě využívaly pulzní regulaci. První prototyp se začal vyrábět po dvou letech vývoje v roce 1978. Kromě podniku Škoda se na vývoji podílel i podnik ČKD Elektrotechnika, který dodával silovou a řídicí elektroniku. V roce 1980 byly dokončeny 2 prototypy označené ES 499.1001 a ES 499.1002. Po otestování byl druhý prototyp upraven zejména v elektrické části. Díky tomu se poté stal vzorem pro sériovou výrobu. Lokomotivy této řady se vyráběly v letech 1980 až 1990.

Jak bylo uvedeno výše, jedná se o typ lokomotivy, který má univerzální použití. Je tedy vhodný jak pro osobní, tak pro nákladní dopravu. Původně bylo plánováno těmito lokomotivami nahradit dosluhující lokomotivy první generace a také motorové lokomotivy díky postupující elektrifikaci. Tato řada lokomotiv se stala následně základem pro pozdější modifikace. Jednalo se o stejnosměrné lokomotivy řady E499.3 (163) a střídavé lokomotivy řady S 499.2 (263).

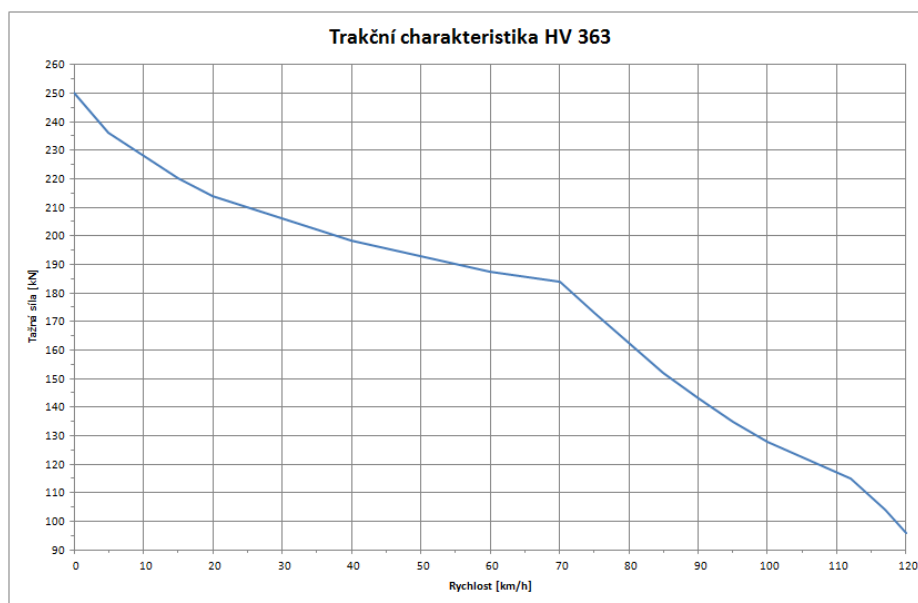
Některé lokomotivy této řady byly také rekonstruovány na řadu 362. Tato rekonstrukce spočívala ve zvýšení maximální rychlosti ze 120 km/h na 140 km/h. Důvodem rekonstrukce byla potřeba dvousystémových lokomotiv s rychlíkovým převodem.

Níže následuje tabulka obsahující základní technické údaje. Úplný přehled technických údajů a popis lokomotivy lze nastudovat z [16].

Tabulka 1: Technické údaje lokomotivní řady 363. Zdroj [16]

Výrobce	Škoda Plzeň
Sériová výroba	1984 - 1990
Vyrobeno kusů	181
Délka přes nárazníky	16 800 mm
Šířka	2 940 mm
Výška	4 625 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo'
Služební hmotnost	87 t
Maximální tažná síla	260 kN
Regulace výkonu	Pulzní tyristorová
Trvalý výkon (stejnoseměrný proud)	3 480 kW
Trvalý výkon (střídavý proud)	3 060 kW
Maximální rychlost	120 $\frac{km}{h}$

Trakční charakteristika této lokomotivní řady je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 10: Trakční charakteristika lokomotivní řady 363. Zdroj [13]

Dále následuje fotografie rychlíku R 612 Jan Palach, kde je hnacím vozidlem právě lokomotiva řady 363. Autorem fotografie je David Švestka a pořizena byla 28. 7. 2005.



Obrázek 11: Rychlík R 612 Jan Palach s HV řady 363. Zdroj [16]

### 3.1.2 Lokomotivní řada 471

V letech 1979 - 1983 končila ekonomická životnost elektrických jednotek řady 451. Proto byl v roce 1992 zahájen vývoj nástupce této řady. Vzhledem k tomu, že původní nástupce, řada 470, nebyl dodán, byl zahájen vývoj nové řady, 471, která na řadu 470 navazovala. Jedná se o třívozovou osobní dvoupodlažní jednotku. Vývoj měly na starosti společnosti MSV Studénka a AEG. Po privatizaci společnosti MVS Studénka byla odmítnuta nabídka společnosti AEG a místo ní se na vývoji podílela firma Škoda Dopravní technika (dnes Škoda Transportation). Tato společnost byla dodavatelem trakčních zařízení, hnacích podvozků a řídicího systému. Hliníkové profily byly dodávány společností Alusuisse Road & Rail (dnes Alcan). První trakční vůz byl vyroben v roce 1997, ale kompletní jednotka až v roce 2000. Výroba skončila v roce 2008.

Stejně jako její předchůdci, i tato řada je určena pro příměstskou osobní dopravu. Jedná se o spolehlivé vozy, které jsou srovnatelné se západoevropským standardem.

V základní sestavě tvoří elektrickou jednotku 3 dvoupodlažní vozy, které se shodují konstrukčním řešením a hlavními rozměry. Hnací vůz je označen jako 471. Dále je elektrická jednotka tvořena vloženým vozem označeným 071 a řídicím vozem řady 971. Celková kapacita jednotky tvoří 643 míst, z nichž 310 je určeno k sezení.

Níže následuje tabulka se základními technickými parametry jednotlivých vozů, dále trakční charakteristika a fotografie jednotky.

Tabulka 2: Technické údaje elektrické jednotky řady 471. Zdroj [17]

Výrobce	ČKD Vagonka, Škoda Transportation
Sériová výroba	1997 - 2008
Vyrobeno kusů	30
Délka přes nárazníky	79 200 mm
Výška se staženými sběrači	4 635 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo' + 2'2' + 2'2'
Služební hmotnost	155,4 t
Trvalý výkon	2 000 kW
Maximální rychlost	140 km/h
Počet míst (sezení + stání)	643

Tabulka 3: Technické údaje HV řady 471. Zdroj [17]

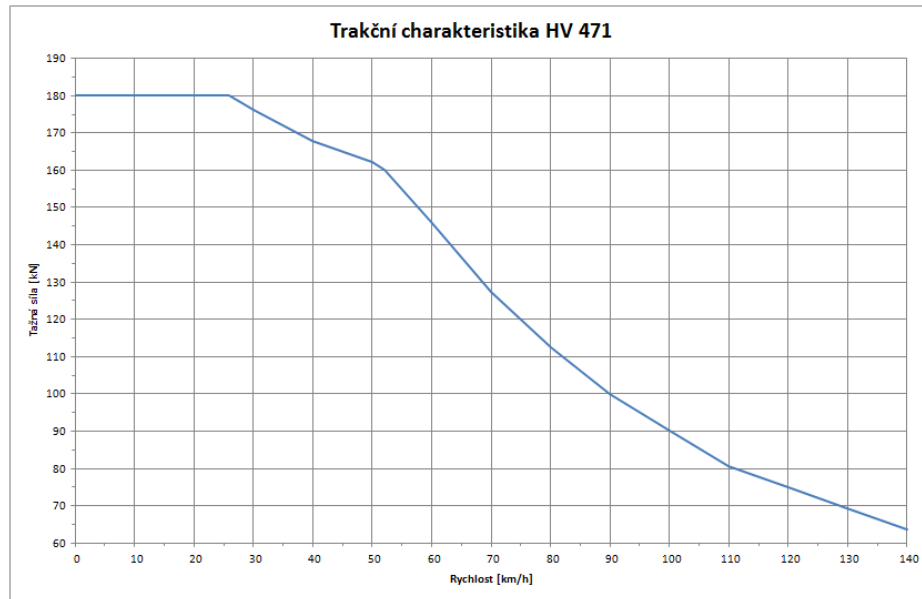
Délka přes nárazníky	26 400 mm
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo'
Služební hmotnost	62,7 t
Maximální tažná síla	180 kN
Regulace výkonu	IGBT tranzistory
Trvalý výkon	2 000 kW
Maximální rychlost	140 km/h

Tabulka 4: Technické údaje vloženého vozu řady 071. Zdroj [17]

Délka přes nárazníky	26 400 mm
Uspořádání pojezdu	2'2'
Služební hmotnost	45,4 t

Tabulka 5: Technické údaje řídicího vozu řady 971. Zdroj [17]

Délka přes nárazníky	26 400 mm
Uspořádání pojezdu	2'2'
Služební hmotnost	47,3 t



Obrázek 12: Trakční charakteristika HV řady 471. Zdroj [13]



Obrázek 13: Elektrická jednotka 471. Zdroj [17]

## 3.2 Motorová hnací vozidla

### 3.2.1 Lokomotivní řada 742

Tato, dnes již téměř historická, přesto používaná, řada lokomotiv byla vytvořena ve druhé polovině 70. let minulého století z důvodu náhrady parních lokomotiv a sjednocení dopravního parku lokomotiv. Kromě lehčí traťové služby měla nová řada lokomotiv zastat

zejména středně těžkou až těžkou službu posunovací.

První prototypy byly sestrojeny v roce 1970. Jednalo se o lokomotivy řady 744.5. Oba prototypy byly odmítnuty, přestože oba odpovídaly potřebám ČSD. Nejvýznamnějším důvodem k odmítnutí byla konstrukce kabiny, která přiléhala k zádi lokomotivy, a strojvůdce neměl dostatečný výhled při jízdě.

Po odmítnutí řady 744.5 byla v roce 1972 ve slovenském Martině započata výroba řady 735. Tyto lokomotivy byly v provozu ovšem velmi nespolehlivé a jejich výroba byla stále zpoždována. Navíc bylo plánováno přeorientovat výrobu závodu v Martině na zbrojní.

Tím se situace ve vozovém parku ČSD stala neúnosnou. Proto bylo přistoupeno k rychlému a nouzovému řešení. V roce 1976 bylo u ČKD objednáno 60 lokomotiv řady 742. Tento nový typ lokomotivy měl vzniknout z právě vyráběné řady 740.5, která byla již 3 roky s dobrými výsledky provozována. Byla požadována celá řada úprav, zejména redukce hmotnosti nebo úprava trakčního převodu. Prakticky ihned po dodání bylo všech 60 lokomotiv nasazeno do provozu. Celkem bylo vyrobeno 453 lokomotiv v 9 sériích. V rámci jednotlivých sérií docházelo k dalším úpravám, jejichž důsledkem bylo např. snížení spotřeby.

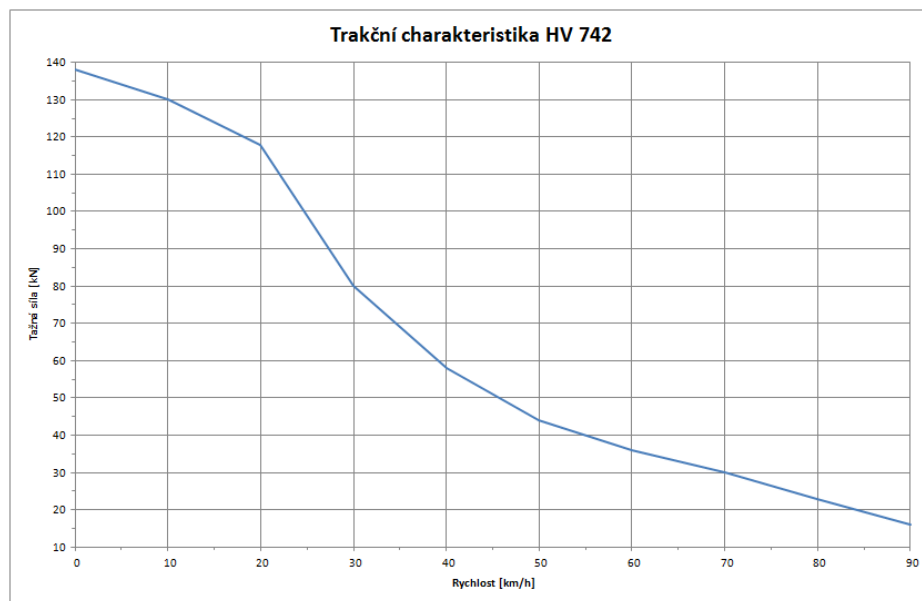
V provozu se lokomotivy řady 742 velmi osvědčily, zejména díky své nadčasovosti, spolehlivosti a robustní konstrukci. Dnes všechny tyto lokomotivy tvoří základ nákladní dopravy společnosti ČD Cargo.

Níže následuje tabulka obsahující základní technické parametry této lokomotivní řady.

Tabulka 6: Technické údaje lokomotivní řady 742. Zdroj [18]

Výrobce	ČKD Praha
Sériová výroba	1977 - 1986
Vyrobeno kusů	453
Délka přes nárazníky	13 580 mm
Šířka	3 130 mm
Výška	4 472 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo'
Služební hmotnost	64 t
Maximální tažná síla	192 kN
Trvalý výkon	883 kW
Maximální rychlost	90 km/h

Dále je uvedena trakční charakteristika této lokomotivní řady.



Obrázek 14: Trakční charakteristika HV řady 742. Zdroj [12]

Následuje fotografie nákladního vlaku, jehož hnacím vozidlem je lokomotiva řady 742. Fotografie byla pořízena Davidem Švestkou v Mladé Boleslavi 4. 7. 2005.



Obrázek 15: Nákladní vlak s HV řady 742. Zdroj [18]



### 3.2.2 Lokomotivní řada 754

S modernizací vozového parku bylo v 70. letech minulého století rozhodnuto o ukončení výroby osobních vozů s parním vytápěním. Tento typ vytápění byl nahrazen vytápěním elektrickým. Tento typ vytápění ovšem vyžadoval použití lokomotivy s topným alternátorem. Nová lokomotivní řada měla vzniknout odvozením z řady 753, která již byla několik let dodávána. Při vývoji nové řady lokomotiv byly zároveň uplatněny znalosti a zkušenosti získané díky prototypům lokomotivní řady 759, která byla určena jako rychlíková. Tyto zkušenosti se týkaly zejména elektrické a elektronické části lokomotivy. Nová řada dostala označení 754 a disponovala progresivní řídicí částí, ve které se zmíněná elektronika velmi dobře uplatnila.

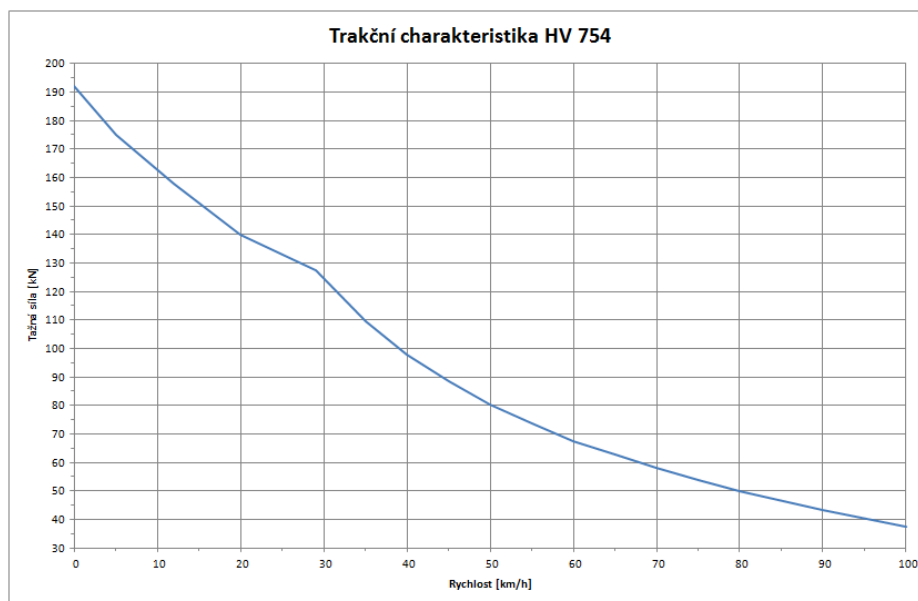
První 2 prototypy byly vyrobeny koncem roku 1975. Následovala ověřovací série 24 vozidel, která byla vyráběna v letech 1978 - 1979. První výrobní série čítala 60 lokomotiv a byla dodána postupně ve 2 částech. Jedna třetina v prosinci 1979 a druhé 2 třetiny v červnu 1980. Tato série zůstala dodána jako jediná, přestože byly naplánovány další 2 série s celkovým počtem 96 vozidel. K uskutečnění výroby ovšem z důvodu rozsáhlého požáru v létě 1980 podniku ČKD Naftové motory, který lokomotivy vyráběl, nedošlo. Tento požár způsobil definitivní ukončení výroby řady 754.

Lokomotivní řada 754 byla navržena pro dopravu těžších osobních vlaků a rychlíků na neelektrifikovaných tratích. Na počátku provázelo provoz lokomotiv velké množství závad, zejména v elektrické části. Tyto závady a problémy s nimi způsobené byly ovšem odstraněny. To vedlo ke zvýšení spolehlivosti a oblíbenosti této lokomotivní řady.

Níže následuje tabulka základních technických parametrů této lokomotivní řady a její trakční charakteristika.

Tabulka 7: Technické údaje lokomotivní řady 754. Zdroj [19]

Výrobce	ČKD Praha
Sériová výroba	1978 - 1980
Vyrobeno kusů	86
Délka přes nárazníky	16 540 mm
Šířka	3 074 mm
Výška	4 335 mm
Minimální poloměr oblouku	100 m
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo'
Služební hmotnost	74,4 t
Maximální tažná síla	245 kN
Trvalý výkon	1 460 kW
Maximální rychlost	100 km/h



Obrázek 16: Trakční charakteristika HV řady 754. Zdroj [12]

Níže následuje fotografie osobního vlaku s označením Os 7412 s lokomotivou řady 742. Autorem fotografie, která byla pořízena 2. 8. 2005 v Nýřanech, je opět David Švestka.



Obrázek 17: Osobní vlak Os 7412 s HV řady 754. Zdroj [19]

### 3.3 Vozy

Kromě hnacích vozidel jsou v této práci popsány také 3 typy vozů, které jsou použity v simulátoru. Jedná se typově o vozy nákladní, osobní a motorové. Všechny 3 typy jsou opět krátce popsány a u každého je přiložena tabulka základních technických parametrů a fotografie. Vzhledem k tomu, že tyto vozy nedisponují trakčním motorem, není u nich uvedena trakční charakteristika.

#### 3.3.1 Vůz řady Bdmpee<sup>233</sup>

Tento typ vozu se používá v osobní dopravě. Jedná se o modernizovaný vůz řady Bmee<sup>248</sup>. Vozy této starší řady se vyráběly v letech 1986 - 1987 ve východoněmecké vagónce v Budyšíně. Modernizaci prováděla šumperské společnost Pars. Upraveno bylo zejména technické vybavení vozů a také interiér. Tyto vozy jsou také speciálně upraveny pro převoz jízdnicích kol. Dnes jsou tyto vozy nasazeny zejména do souprav EuroCity a Expres mezi Prahou a moravskými městy. Více se lze dočíst v [21].

Níže následuje tabulka se základními technickými parametry tohoto vozu řady Bdmpee<sup>233</sup>. Poté ještě následuje fotografie nově zrekonstruovaného vozu této řady.

Tabulka 8: Základní technické parametry vozu řady Bdmpee<sup>233</sup>. Zdroj [21]

Dodavatel rekonstrukce	Pars nova Šumperk
Počet kusů	40
Délka přes nárazníky	26 400 mm
Šířka	2 824 mm
Minimální poloměr oblouku	150 m
Konstrukční hmotnost	43,4 t
Maximální rychlost	160 km/h
Počet míst (sezení + stání)	102



Obrázek 18: Nově zrekonstruovaný vůz řady Bdmpee<sup>233</sup>. Zdroj [21]

### 3.3.2 Vůz řady 054.2 bdtm

Tento typ přípojného vozu vznikl modernizací vozů třídy 053. Důvodem k modernizaci byl zejména fakt, že vůz třídy 053 nemohl být zařazen mezi motorový vůz řady 854 a řídicí vůz 954, protože neumožňoval jejich komunikaci. Modernizace byla provedena firmou Krnovské opravny a strojírny, a.s. Krnov.

Kromě výše zmíněné úpravy byla provedena celá řada dalších modifikací. Nejvíce byl změněn interiér vozu. Ten byl do velké míry unifikován s interiérem motorových vozů řady 854. Dále byl vytvořen prostor pro přepravu jízdnicích kol. Celý článek lze najít v [20].

Níže následuje tabulka se základními technickými parametry vozu.

Tabulka 9: Základní technické parametry vozu 054.2 bdtm

Dodavatel rekonstrukce	Krnovské opravny a strojírny, a.s. Krnov
Počet kusů	7 + další plánované
Délka přes nárazníky	24 500 mm
Typ pojezdu	2'2'
Konstrukční hmotnost	38 t
Maximální rychlost	120 km/h
Počet míst k sezení	88



Obrázek 19: Přípojný vůz řady 054.2 bdt. Zdroj [20]

### 3.3.3 Nákladní vůz řady Eas

Tento typ vozu, který byl zrekonstruován v roce 2006, se používá zejména pro přepravu hromadných a sypkých substrátů a také paletizovaného zboží. Jedná se o vůz, který nedisponuje krytým ložným prostorem. Vhodný je zejména pro transport uhlí, koksu, železné rudy nebo surového dřeva. Oproti původní řadě, která se označovala jako Uae se tento typ liší zejména provedením stupaček a madel. Zdroj [24, 25].

Tabulka 10: Základní technické parametry vozu řady Eas. Zdroj [24]

Délka přes nárazníky	14 040 mm
Šířka	3 040 mm
Výška	3 275 mm
Konstrukční hmotnost	23,5 t
Maximální rychlost	120 km/h
Ložná hmotnost	56 t

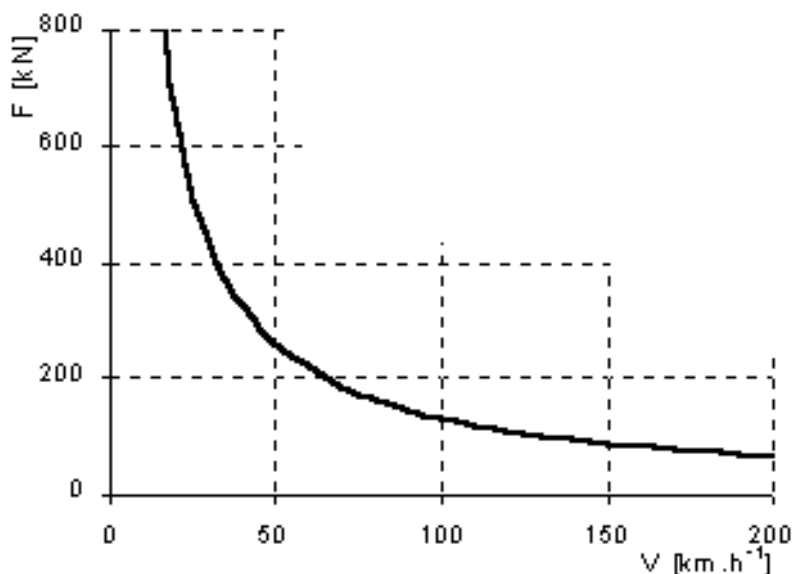


Obrázek 20: Vůz Eas 31 54 597 7 357-0 po provedené revizy v OOS. s. r. o. Zdroj [24]

## 4 Trakční charakteristiky

Vzhledem k tomu, že pro simulační výpočet simulátoru jsou důležité parametry hnacích vozidel včetně jejich trakčních charakteristik, je tato kapitola zaměřena právě na problematiku trakčních charakteristik. Celá kapitola vychází z [14].

Trakční charakteristika představuje závislost tažné síly  $F$  na rychlosti jízdy hnacího vozidla. Graficky se znázorňuje pomocí souřadného systému  $F-V$ , kde  $F$  je tažná síla, která je vynášena na svislé ose a  $V$  je rychlost hnacího vozidla, která je vynášena na vodorovné ose. V ideálním případě představuje grafická reprezentace rovnoosou hyperbolu, která se asymptoticky blíží k osám. Tento stav se nazývá ideální trakční hyperbola a v praxi je nedosažitelný. Ukázka ideální trakční hyperboly je zobrazena na obrázku 21.



Obrázek 21: Ideální trakční hyperbola. Zdroj [14]

Jak bylo výše uvedeno, tento stav je v praxi nedosažitelný. Je to způsobeno několika omezeními, jejichž výčet a popis následuje.

### Adheze

Tažná síla je při nízké rychlosti hnacího vozidla omezena hodnotou adhezní tažné síly  $F_a$ . Proto při této rychlosti není možné využít instalovaného výkonu hnacího vozidla.

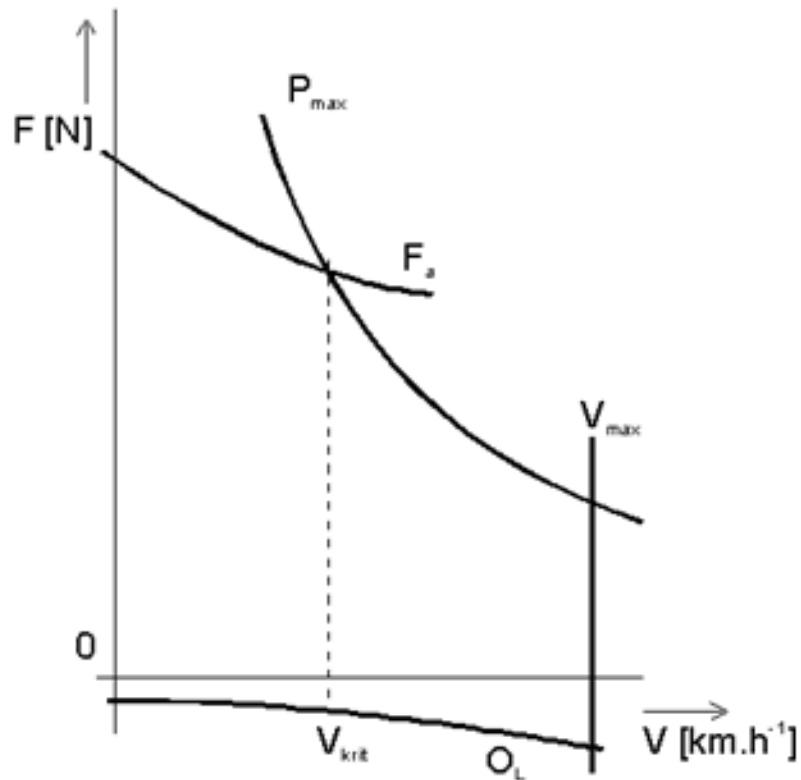
### Výkonnost zdroje výkonu

V okamžiku, kdy vozidlo překročí tzv. kritickou rychlost  $V_{krit}$  se začíná projevovat toto omezení. Kritické rychlosti odpovídá průsečík křivek  $F_a$  a  $P_{max}$  na obrázku 22.  $P_{max}$  představuje křivku konstantního výkonu, jejíž průběh se přibližuje průběhu ideální trakční hyperboly. Právě touto křivkou se v dané oblasti řídí trakční charakteristika.

## Maximální rychlost hnacího vozidla $V_{max}$

### Vozidlový odpor

Vozidlový odpor  $O_L$ , jinak také výběhová křivka, omezuje trakční charakteristiku v oblasti záporných hodnot tažných sil. Křivka znázorňující vozidlový odpor je také zobrazena na obrázku 22. Jednotkou vozidlového odporu je stejně jako u tažné síly Newton.



Obrázek 22: Obecný tvar trakční charakteristiky a její omezení. Zdroj [14]

Z hlediska fyzikálních principů platí u trakční charakteristiky vztah

$$P = \frac{F V}{3,6} [kW] \quad (17)$$

Kde  $P$  je výkon,  $F$  je tažná síla [N] a  $V$  je rychlost [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ].



## 4.1 Důležité parametry trakčních charakteristik

Jak bylo výše zmíněno, trakční charakteristika závisí na tažné síle. Tažná síla je příčinou pohybu vlaku a je projevem silového působení mezi kolem vlaku a kolejnicí. U hnacích vozidel se rozlišují 3 typy působení tažné síly. Tyto typy jsou popsány níže.

### Indikovaná tažná síla $F_i$

Tento typ tažné síly lze stanovit z práce na prvotním zdroji mechanické energie, kterým může být např. spalovací motor nebo elektromotor. Tento typ tažné síly se obvykle nepoužívá pro stanovení trakční charakteristiky.

### Tažná síla na obvodu kol $F_o$

Tato síla působí v místě styku mezi kolem a kolejnicí. Představuje reakci na sílu na obvodu kola. Tato síla je důsledkem kroutícího momentu přenášeného na kolo a je součtem všech reakcí, vznikajících na styku mezi kolem a kolejnicí, u kterých působí obvodová síla. Vztah pro výpočet  $F_o$  je následující:

$$F_o = F_i \eta_M \eta_{PV} [N] \quad (18)$$

Tažná síla na obvodu kol je tedy indikovaná tažná síla snižená o ztráty na prvotním zdroji  $\eta_M$  a přenosu výkonu  $\eta_{PV}$ .

### Tažná síla na spřáhle $F_{sp}$

Touto silou působí hnací vozidlo na ostatní tažená vozidla. Působíštěm této síly je místo spojení mezi jednotlivými vozidly, tzv. spřáhlo. Jeden z typů spřáhel, tzv. šroubovka, je zobrazen na obrázku 23.



Obrázek 23: Spřáhlo. Zdroj [28]

Vztah pro výpočet tažné síly na spřáhle je následující:

$$F_{sp} = F_o - O_L [N] \quad (19)$$

Jedná se tedy o tažnou sílu na obvodu kol zmenšenou o vozidlový odpor  $O_L$ .

Pro stanovení trakční charakteristiky jsou používány 2 z těchto typů tažných sil a to tažná síla na obvodu kol a tažná síla na spřáhle.

### **Adhezní tažná síla $F_a$**

Adhezní tažná síla představuje maximální sílu, kterou je možné realizovat za relativního klidu dotykových ploch na styku mezi kolem a kolejnicí při působení adheze. Adheze v tomto případě představuje součinitel tření. Velikost adhezní tažné síly je dána kvalitou styku mezi kolem a kolejnicí a také svislou silou působící v tomto styku. Vztah pro výpočet této síly je následující:

$$F_a = \mu_a G_a \varepsilon [N] \quad (20)$$

Kde  $\mu_a$  je součinitel adheze,  $G_a$  představuje adhezní tíhu vozidla a  $\varepsilon$  je součinitel využití adheze. Oba součinitele představují bezrozměrné veličiny. Jednotkou adhezní tíhy je Newton.

### **Součinitel adheze $\mu_a$**

Tento součinitel nepředstavuje konstantní veličinu. Je závislý na mnoha faktorech, které jej velmi ovlivňují. Nejvíce je tento součinitel ovlivněn rychlostí vozidla a kvalitou povrchu stykových ploch. Dále následují experimentálně stanovené vztahy, které se používají v praxi.

Podle Kothera je součinitel adheze stanoven jako:

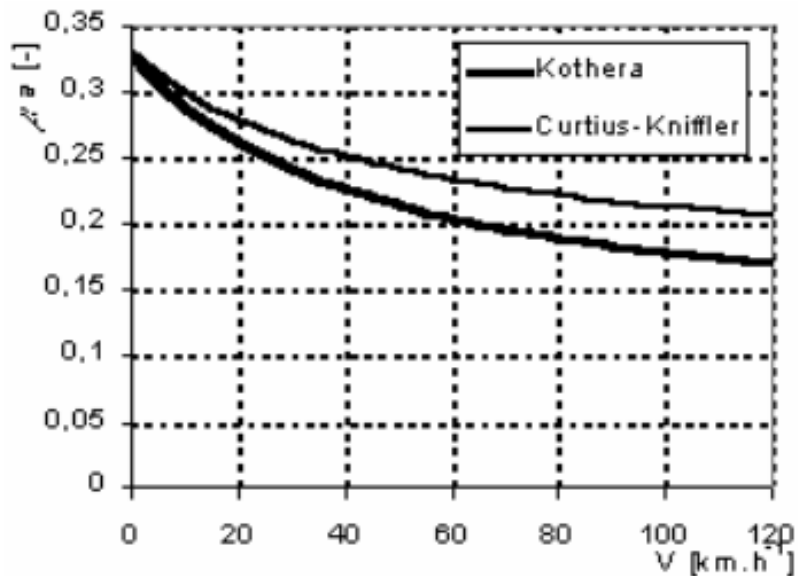
$$\mu_u = \left( \frac{9\,000}{V + 42} + 116 \right) 10^{-3} \quad (21)$$

Jiný vztah dle Curtius-Knifflera je definován jako:

$$\mu_a = \left( \frac{7\,500}{V + 44} + 161 \right) 10^{-3} \quad (22)$$

Kde  $V$  představuje rychlost pohybu vozidla v  $\frac{km}{h}$ .

Průběh podle obou vztahů je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 24: Průběh součinitele adheze. Zdroj [14]

### Adhezní tíha $G_a$

Adhezní tíhou se rozumí část tíhy vozidla, která připadá na hnací dvojkolí. Je závislá na uspořádání pojezdu a pohonu dvojkolí. Pokud má hnací vozidlo všechna dvojkolí hnací, potom je adhezní tíha rovna tíze vozidla. Pokud ovšem nejsou všechna dvojkolí hnací, potom platí  $G_a < G_V$ , kde  $G_V$  je tíha vozidla.

### Součinitel využití adheze $\varepsilon$

Tento součinitel, jinak také zvaný adhezní tíže, zmenšuje velikost adhezní tažné síly. Zahrnuje vlivy konstrukce na změnu rozložení tíhy na jednotlivá dvojkolí a kola. Těmito vlivy se rozumí:

- Klopný moment podvozků vlivem tažné síly na spřáhle
- Neodpružená hmotnost podvozku
- Zapojení trakčních motorů
- Způsob regulace výkonu
- Tvar charakteristiky trakčního motoru

Součinitel využití adheze může nabývat hodnot  $0 < \varepsilon < 1$ , v praxi se často volí hodnota z intervalu (0,9; 0,93).

## 4.2 Úplná trakční charakteristika

Základní grafické znázornění trakční charakteristiky lze rozšířit o další údaje. Tyto údaje jsou potřebné zejména pro posouzení vozidla v provozu a také pro trakční výpočty. Grafické znázornění doplněné o tyto údaje se nazývá úplná trakční charakteristika, která musí obsahovat následující údaje. Tyto údaje jsou ještě rozděleny na 2 části - grafickou a informační.

- Grafická část
  - Průběhy závislosti tažné síly na rychlosti pro všechny nebo stanovené regulační stupně
  - Adhezní omezení tažné síly
  - Křivka vozidlového odporu při výběhu
  - Charakteristiky spotřeby - ta je dána typem vozby
- Informační část
  - Označení řady hnacího vozidla, hmotnost a délka přes nárazníky
  - Průměr kol, pro které charakteristika platí
  - Hmotnost převodu mezi motorem a nápravou
  - U hnacího vozidla motorové vozby dále: typ a výkon spalovacího motoru, spotřeba paliva na jednotlivých regulačních stupních, typ přenosu výkonu, závislost proudu generátoru ( $I_g$ ) na tažnou sílu na obvodu kol
  - U hnacího vozidla elektrické vozby dále: napětí v troleji pro kterou platí, hodnotu trvalé a hodinové tažné síly a proudu trakčního motoru.

## 4.3 Základní typy trakčních charakteristik

Trakční charakteristiky lze podle typu hnacího vozidla rozdělit do 4 základních kategorií:

- Charakteristiky vozidel se stejnosměrnými trakčními motory
- Charakteristiky stejnosměrných vozidel se stupňovitou odporovou regulací
- Charakteristiky střídavých vozidel se stupňovitou odbočkovou regulací
- Charakteristiky vozidel se spalovacím motorem

U elektrických hnacích vozidel, jak stejnosměrných, tak střídavých, je tvar trakční charakteristiky dán vlastní charakteristikou trakčního motoru a regulací odporu. Stručný popis stejnosměrných i střídavých vozidel a způsobů regulací odporu následuje.

### 4.3.1 Stejnoměrná elektrická vozidla

#### Skoková změna napětí na trakčním motoru

Tato změna napětí je realizována změnou vzájemného řazení motorů. Motory mohou být řazeny sériově nebo paralelně. V případě paralelního řazení mohou být motory v rámci jedné paralelní větve zapojeny do série. V takovém případě se jedná o tzv. motorovou skupinu.

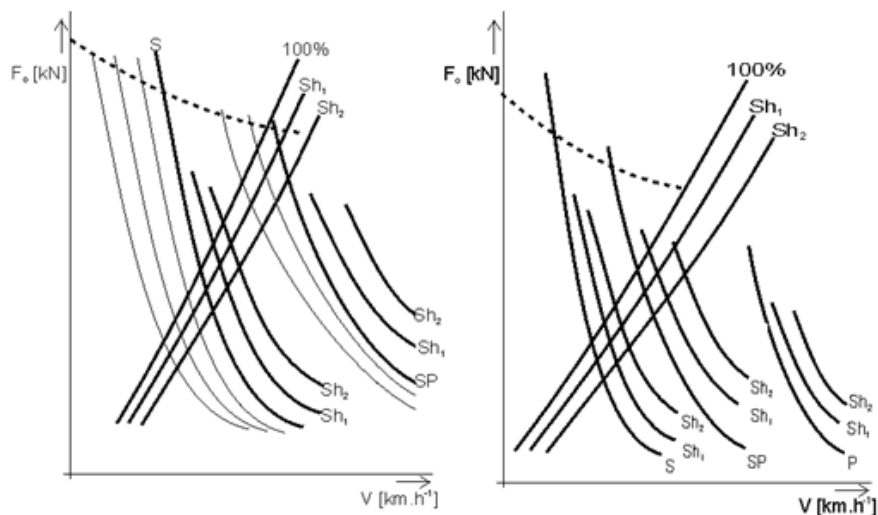
#### Změna napětí trakčního motoru v jednotlivých stupních pomocí předřadného rezistoru

Napětí a proud procházející trakčním motorem je závislý na odporu předřazeného rozjezdového rezistoru. Odpor rezistoru se při rozjezdu snižuje, čímž dochází ke zvyšování napětí na trakčním motoru.

#### Změna buzení trakčního motoru (šuntování)

Tento typ regulace využívá paralelní připojení šuntovacího rezistoru, kterým prochází proud k budicímu vinutí trakčního motoru. Na šuntovacím rezistoru je hodnota proudu snížena. Tím dochází ke změně otáček a momentu.

Obecně se způsoby regulace u stejnosměrných hnacích vozidel rozdělují na odporové a hospodárné. U odporových regulací dochází k přeměně části elektrické energie na teplo, zatímco u hospodárných regulací se většina energie mění na mechanickou práci. Mezi hospodárné regulace patří skoková změna napětí a šuntování. Pomocí všech možností regulace se vytvářejí tzv. skupiny stupňů. Počet těchto skupin je dán konstrukcí hnacího vozidla a počtem náprav. Čtyřnápravová vozidla disponují 2 skupinami, šestnápravová 3. Základní tvar trakčních charakteristik stejnosměrných vozidel je znázorněn na následujícím obrázku. Vlevo je zobrazena trakční charakteristika čtyřnápravového hnacího vozidla, vpravo šestnápravového.

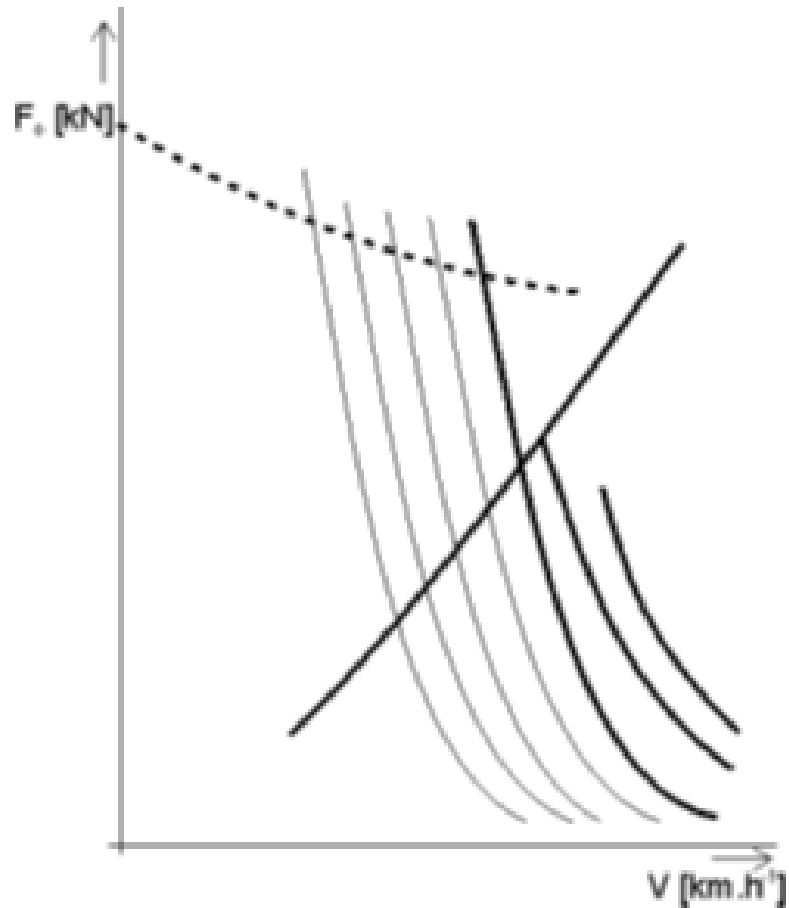


Obrázek 25: Základní tvar trakční charakteristiky stejnosměrných HV. Zdroj [14]

### 4.3.2 Střídavá elektrická vozidla

#### Změna počtu závitů na vinutí trakčního transformátoru

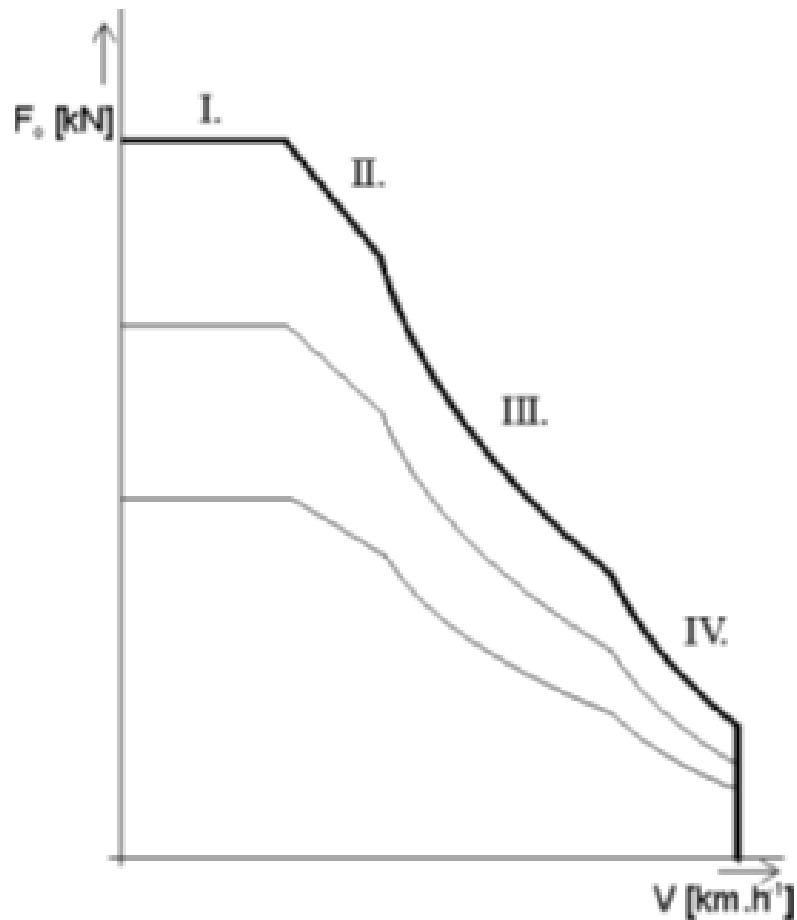
Změnou počtu závitů na vinutí trakčního transformátoru dochází ke změně napětí na svorkách trakčního motoru. U tohoto typu regulace se nemění elektrická energie na teplo. Základní tvar trakční charakteristiky elektrického střídavého hnacího vozidla je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 26: Základní tvar trakční charakteristiky střídavých HV. Zdroj [14]

### Elektrická hnací vozidla s plynulou pulzní regulací

U tohoto typu regulace se používají trakční motory, které jsou cize buzené na vlnivý proud. 2 motory jsou trvale sériově spojeny a proud procházející kotvami je regulován kotevním pulzním měničem. Buzení je regulováno budícím pulzním měničem. Trakční charakteristika je určena charakteristikou cize buzených trakčních motorů. Tvar trakční charakteristiky je znázorněn na následujícím obrázku.



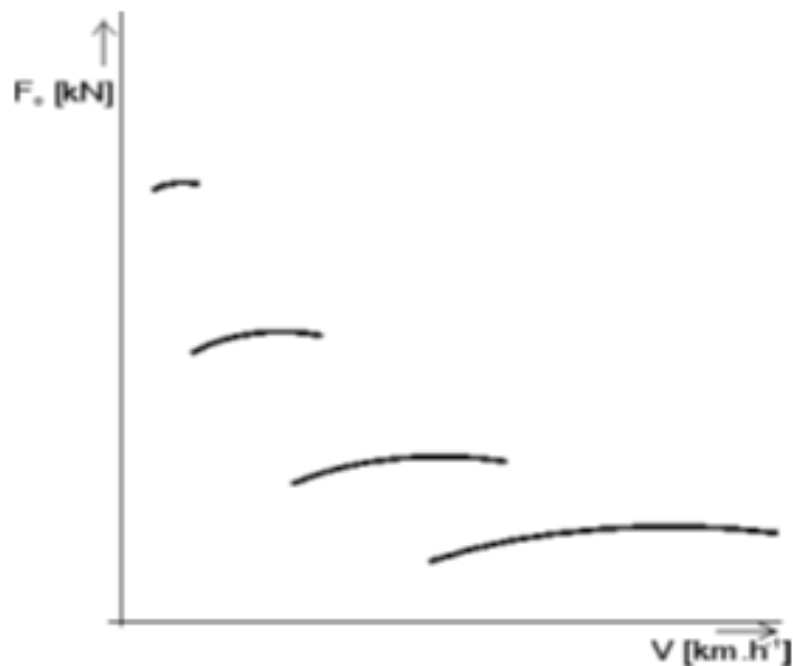
Obrázek 27: Základní tvar tr. char. el. HV s plynulou pulzní regulací. Zdroj [14]

### 4.3.3 Motorová hnací vozidla

U hnacích vozidel poháněných spalovacím motorem je tvar trakční charakteristiky ovlivněn rychlostní charakteristikou spalovacího motoru a také konstrukčním řešením zařízení, pomocí kterého je realizován přenos kroutícího momentu ze spalovacího motoru na obvod kol hnacích dvojkolí. Přenos kroutícího momentu může být realizován 3 základními způsoby:

#### Mechanický přenos výkonu

Tento způsob je podobný přenosu výkonu u silničních vozidel. Přenos je realizován pomocí spojky a mechanické převodovky. Vzhledem k lineárnímu přenosu kroutícího momentu je průběh tažné síly podobný průběhu rychlostní charakteristiky spalovacího motoru. Základní tvar trakční charakteristiky u tohoto typu přenosu výkonu je znázorněn na následujícím obrázku.

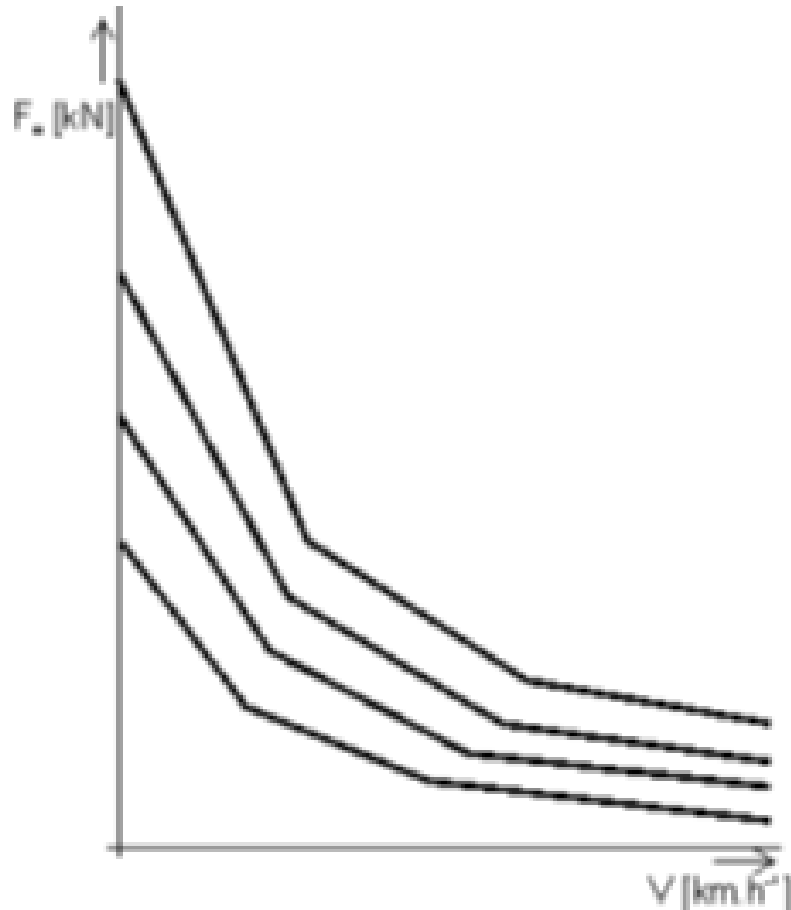


Obrázek 28: Základní tvar tr. char. HV s mech. přenosem výkonu. Zdroj [14]



### Hydrodynamický přenos výkonu

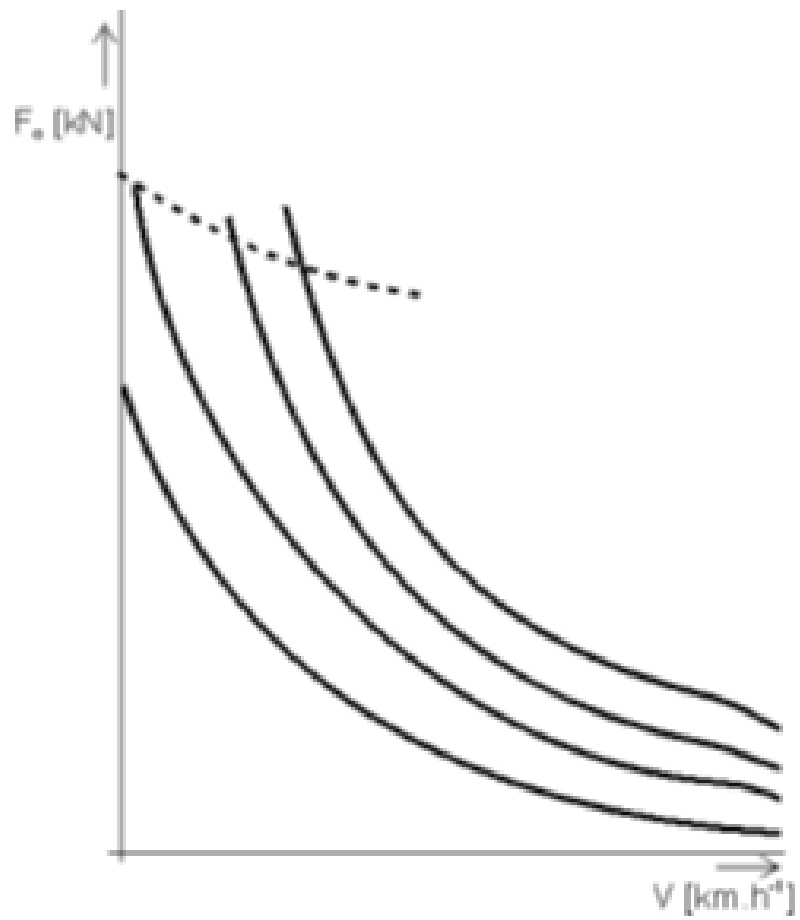
U tohoto typu je přenos výkonu realizován pomocí hydraulické převodovky. Tato převodovka ovlivňuje základní průběh tažné síly. Přenos je realizován pomocí různých strojů, které tvoří součásti převodovky, jež se postupně zapojují do činnosti. Tvar trakční charakteristiky u tohoto typu přenosu je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 29: Základní tvar tr. char. HV s hydrodynam. přenosem výkonu. Zdroj [14]

### Elektrický přenos výkonu

U tohoto typu je přenos kroutícího momentu realizován pomocí elektrické energie, která je vyrobena generátorem. Tento generátor je poháněn spalovacím motorem. Elektrická energie pohání trakční motory, které jsou spojeny s hnacími nápravami pomocí ozubených převodů. Tvar obálkové křivky trakční charakteristiky je blízký ideální hyperbole. Proto se tento typ přenosu výkonu používá pro hnací vozidla, jejichž spalovací motor disponuje velkým výkonem. Tvar trakční charakteristiky u tohoto typu přenosu je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 30: Základní tvar tr. char. HV s elektrickým přenosem výkonu. Zdroj [14]

## 5 Simulátor

Na počátku této práce bylo stanoveno, že jako simulátor bude použit aktuálně vyvíjený simulační nástroj MesoRail. Autorem tohoto nástroje je Ing. Roman Diviš. Poskytnuté zdrojové kódy byly v rámci práce upraveny, aby splňovaly stanovené požadavky. Úpravy jsou uvedeny v úvodu praktické části.

Popis simulátoru a důležitých parametrů simulace vychází z [8, 9]. Alternativy k tomuto simulátoru jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11: Alternativní nástroje k simulátoru MesoRail. Zdroj [9]

Nástroj	Společnost	Odkaz na webové stránky
Villon	Simcon, s. r. o.	<a href="http://www.simcon.sk">http://www.simcon.sk</a>
OpenTrack	OpenTrack Railway Technology Ltd.	<a href="http://www.opentrack.ch">http://www.opentrack.ch</a>
RailSys	Rail Management Consultants GmbH	<a href="http://www.rmcon.de">http://www.rmcon.de</a>

### 5.1 Popis simulátoru

Jedná se o mezoskopický simulátor založený na programovacím jazyce Java. Mezoskopický simulátor obecně umožňuje použít ještě vyšší úroveň abstrakce než klasický simulátor, přičemž poskytuje srovnatelné výsledky bez významných ztrát informací. Zásadní abstrakce jsou tyto:

- Kolejová infrastruktura je zobrazena pouze schematicky
- Výpočet dynamiky vlaku je zjednodušený
- Nejsou uvažovány pracovní skupiny (mobilní lidské zdroje)
- Nejsou uvažovány technologické procedury a služby týkající se vlaků

Simulační jádro je založeno na metodě plánování událostí a principu agentově orientovaných simulátorů.

Metoda plánování událostí využívá kalendář událostí, ze kterého jsou jednotlivé události chronologicky odebírány na základě jejich časového razítka, které udává, kdy má být daná událost zpracována. V rámci této metody může kterákoliv událost naplánovat novou událost, která bude vložena do kalendáře. Není použita žádná hierarchie ani možnost delegovat kompetence. Proto při použití této metody v rámci komplexních simulátorů může dojít k nárůstu složitosti.

Naproti tomu, v agentově-orientovaných architekturách je použita hierarchie a možnost delegování kompetencí, čímž vzniká mnohem přehlednější architektura. I agentově orientované simulátory používají metodu plánování událostí. Více se o agentově-orientovaných simulacích a architekturách lze dočíst v [10, 15].

Vzhledem k tomu, že programovací jazyk Java je objektově orientovaný, je možné jej použít pro implementaci agentově-orientovaného simulátoru. Třídy reprezentují jednotlivé typy agentů. Vnitřní stav agenta a jeho interní komunikace jsou implementovány pomocí atributů a volání metod. Meziagentová komunikace je realizována pomocí volání veřejných metod. Změna simulačního času je realizována pomocí výběru a zpracování zprávy z kalendáře. Tyto zprávy jsou do kalendáře umisťovány agenty. Vlaky jsou v tomto simulátoru reprezentovány pomocí dynamických mobilních agentů, kteří se pohybují po trati. Jejich pohyb je kontrolován řídicím agentem. Tento agent provádí kontrolu veškerého provozu na celé použité železniční infrastruktuře.

Simulátor také disponuje online animací, která poskytuje přehledný pohled na průběh simulace. Je možné ovlivňovat rychlost animace, popř. ji pozastavit a následně opět spustit. Po ukončení simulace je možné zobrazit post simulační protokoly, ve kterých je možné vyhledávat a filtrovat. Příkladem je tachogram vlaků.

## 5.2 Popis infrastruktury

Kolejová infrastruktura je v rámci simulačního modelu znázorněna pouze schematicky. Důvodem je zjednodušení modelu a ušetření času, který je nutný pro výstavbu detailního modelu kolejiště. Výhodou tohoto způsobu vytváření infrastruktury je zejména to, že jednotlivé prvky, jako jsou např. výhybky, jsou vytvářeny pomocí předem daných prototypů, které lze snadno parametrizovat a není tedy třeba definovat pro každý prvek jeho parametry zvlášť. Díky těmto vlastnostem je možné vytvořit velice rychle takovou kolejovou infrastrukturu, která věrně odráží skutečné kolejiště.

## 5.3 Dynamika jízdy vlaku

Jak již bylo uvedeno výše, výpočet dynamiky jízdy vlaku je v rámci simulátoru MesoRail zjednodušený. Simulační výpočet tedy neovlivňují některé reálné parametry. Jedná se např. o odpor vzduchu v tunelu nebo odpor oblouku. Tyto a další parametry jsou stručně popsány v závěru této kapitoly. Níže následuje popis parametrů, které výpočet ovlivňují. Tyto parametry jsou zobrazeny na následujících 2 obrázcích, které ukazují tvorbu vozidel a vlaků v simulátoru.


Vehicle detail

Title: 754(Brejlovec)

Length: 16.54 m

Weight: 74.5 t

Max. speed: 120 km/h

Color: 

Locomotive characteristics

Resistance:  $8.5E-4 v^2 + 0 v + 2.8$  ... p: 1.06

Traction type: Diesel

Traction characteristics:

Speed [km/h]	Force [kN]
0	192
5	175
12	158
20	140
29	127.5
35	109.5
40	98
45	88.3
50	80.4
55	73.5

Save

Obrázek 31: Detail hnacího vozidla

Train prototype detail

Train number: 1000

Basic | Train vehicles | Arrival | Timetable | Interval

Train type: Osobni

Category: Passenger

Speed category: Os

Loco utilization: 100 %

Resistance type: Electric unit

Braking rate: 0.55 m/s

Save

Obrázek 32: Detail vlaku

### Hmotnost (Weight)

Jedná se o hmotnost hnacího vozidla. Pro celý vlak se jedná o součet hmotnosti hnacího vozidla a všech tažených vozů.

### Maximální rychlost (Max. speed)

Tento parametr již podle názvu udává maximální možnou rychlost pohybu hnacího vozidla nebo vozu. Maximální rychlost celého vlaku je dána minimální hodnotou tohoto parametru ze všech vozů i hnacího vozidla.

## 5.3.1 Vozidlové odpory (Resistance)

Obecně se jedná o síly, které musí vozidlo překonávat během jízdy. Dělí se na 2 skupiny a to na aktivní a pasivní.

Aktivní odpory jsou dány konstrukčním řešením vozidla a nejsou závislé na vnějších vlivech. Působí mezi zdrojem kinetické energie a bodem působení tažné síly. Zdrojem kinetické energie se rozumí např. trakční nebo spalovací motor. Bodem působení tažné síly je styk mezi kolem a kolejnici.

Pasivní nebo také jízdní odpory představují vnější síly, které působí proti pohybu vozidla. Dělí se do 2 kategorií a to na vozidlové a traťové. Traťové odpory v rámci této práce nejsou podrobně popsány. Podrobný popis této problematiky je možné najít v [14].

Odpor se v trakčních výpočtech vyjadřuje následovně:

$$O = G_V o \quad (23)$$

Kde  $G_V$  představuje tíhu vozidla [ $N$ ] a  $o$  součinitel odporu, který je vztažený na jednotku tíhy vozidla. Součinitel odporu je bezrozměrná veličina.

### Vozidlové odpory

Tento typ pasivních odporů je závislý na mnoha parametrech, z nichž nejvýznamnějším je rychlost pohybujícího se vozidla. Obecně lze vozidlový odpor vyjádřit jako součet jednotlivých odporových složek. Vztah následuje:

$$O_V = O_f + O_l + O_{VZ} \quad (24)$$

Kde  $O_f$  je odpor valení kola po kolejnici,  $O_l$  je odpor čepového tření v ložiscích a  $O_{VZ}$  je odpor prostředí. Jednotkou všech dílčích složek i celkového jízdního odporu je [ $N$ ].

Vzhledem k tomu, že jednotlivé dílčí odpory jsou při různých podmínkách různé, v rámci výpočtů se používají jejich empirické hodnoty, které byly stanoveny na základě zkoumání. Jak již bylo výše uvedeno, nejvíce jsou tyto odpory ovlivněny rychlostí jízdy vozidla. Závislost jízdního odporu na jízdě je obecně vyjádřena pomocí polynomu 2. stupně, který je uveden níže.

$$o_V = a + bV + cV^2 \quad (25)$$

Kde parametr  $V$  je právě výše zmíněná rychlost vozidla a  $o_V$  představuje součinitel vozidlového odporu.

Jednotlivé koeficienty  $a, b, c$  byly stanoveny na základě jízdních zkoušek. Vzhledem k podobnosti a společným znakům byly vytvořeny skupiny a podskupiny podle typu vozidla a uspořádání pojezdu. Dalším hlediskem pro rozlišení do skupin je také hmotnost vozidla.

Uspořádáním pojezdu se rozumí konstrukční řešení provedení pojezdu vozidla. Označení uvádí zejména počet náprav a údaj o tom, které nápravy jsou hnané. Níže následuje tabulka nejčastěji používaných typů pojezdu včetně jednotlivých koeficientů součinitele vozidlového odporu.

Tabulka 12: Přehled typů pojezdu a příslušných koef. součinitele voz. odporu. Zdroj [14]

Typ pojezdu	Koeficienty (hodnota $\times 10^{-3}$ )		
	a	b	c
B0'B0'	2,8	0	0,00085
C0'C0'	2,8	0,02	0,0004
B'B'	2,5	0	0,0055
MJ	3	0	0,00037
EJ	2,45	0,0123	0,000414

Označení pojezdu se skládá z písmen a číslic, přičemž číslice udávají počet nepoháněných náprav a písmena hnacích náprav. Apostrof značí, že nápravy jsou umístěny v samostatném podvozku. Pokud je každá náprava hnaná nezávisle, je přidán navíc index nula. Ukázky označení následují. Zdroj [22, 23].

Tabulka 13: Ukázky označení pojezdů. Zdroj [22]

Označení	Popis
B0'B0'	2 podvozky po 2 nápravách, individuálně poháněné a uložené v samostatných podvozcích
2'B'	1 podvozek se 2 nápravami nepoháněnými a 1 podvozek se 2 nápravami hnacími, oba podvozky jsou uloženy na samostatných podvozcích
(1A)'(A1)'	2 podvozky, vnější náprava nepoháněná, vnitřní hnaná, všechny nápravy jsou uloženy v samostatných podvozcích. Závorky jsou uvedeny pouze pro zvýšení přehlednosti

### 5.3.2 Traťové odpory

Jak již bylo zmíněno výše, tento typ odporů není pro tuto práci stěžejní, proto jsou zde uvedeny pouze informativně. Jedná se o odpory, které jsou dány vlivem stavebního uspořádání tratě. Velikost těchto odporů je dána také působením délky a hmotností vlaku. Mezi 3 nejvýznamnější odpory patří odpor sklonu, oblouku a tunelu.

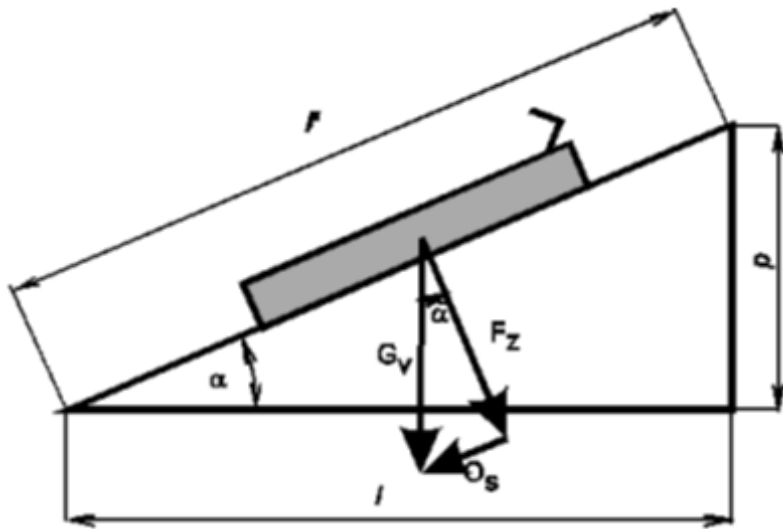
#### Odpor sklonu

Jedná se o odpor, který při působí rovnoběžně se směrem jízdy. Zatímco při stoupání působí proti směru pohybu, při klesání působí po směru pohybu. Odpor sklonu je dán vztahem:

$$O_{skl} = G_V \sin \alpha = m_V g \sin \alpha \quad (26)$$

Kde  $G_V$  je tíha vozidla udávaná v  $[N]$ ,  $m_V$  je hmotnost vozidla v  $[kg]$ ,  $g$  je tíhové zrychlení a  $\alpha$  je úhel sklonu ve stupních.

Schematický obrázek pohybu vozidla na sklonu následuje.



Obrázek 33: Pohyb vozidla na sklonu. Zdroj [14]



## Odpor oblouku

Tento typ odporu vzniká při průjezdu vlaku obloukem, kdy na vlak působí vnější síly, které jej odchylují z přímého směru. Tyto vnější síly vyvolávají tečné reakce mezi kolem a kolejnicí. Analyticky je tyto odpory těžké vyjádřit, proto se používají empirické vztahy vycházející z rozchodu tratí. Tyto vztahy nahrazují odpor oblouku hodnotou tzv. přídatného sklonu ( $s_p$ ), který je udáván v [‰]. Tyto vztahy jsou uvedeny v následující tabulce, kde  $R$  představuje poloměr oblouku.

Tabulka 14: Hodnoty přídatného sklonu jako náhrady odporu oblouku. Zdroj [14]

Rozchod tratě [mm]	$s_p$
1435	$\frac{600}{R}$
1000	$\frac{400}{R-20}$
750	$\frac{300}{R-10}$
Metro	$\frac{650}{R-50}$

## Odpor tunelu

Tento odpor je způsoben zvýšeným odporem vzduchu v tunelu. Odpor vzduchu narůstá v důsledku vytlačování sloupce vzduchu a víření vzduchu kolem vlaku. Hodnoty tohoto typu odporu jsou opět dány empiricky.

### 5.3.3 Odpor zrychlení

Posledním typem odporu, který je v této práci popsán, je odpor zrychlení. S ním souvisí poslední parametr z obrázku 31. Tímto parametrem, označeným jako  $\rho$  je tzv. součinitel rotujících hmot. Tento bezrozměrný součinitel představuje charakteristickou hodnotu, která popisuje vliv rotujících hmot vozidla na odpor zrychlení. Tento součinitel je možné pro jednotlivá vozidla stanovit výpočtem, nebo je možné jej získat z tabulky empirických hodnot, kde je vztažen ke skupinám vozidel. Tabulka pro vlaky následuje, celou tabulku lze nalézt v [14].

Tabulka 15: Hodnoty součinitele rotujících hmot. Zdroj [14]

Skupina vozidel	Vozidla	$\rho$
Vlaky	Obvyklé vlaky osobní nebo nákladní	0,06
	Elektrické motorové jednotky a motorové jednotky s elektrickým přenosem výkonu	0,15 - 0,2

Odpor zrychlení je součtem dvou dílčích odporů a to odporu zrychlení posuvných hmot a odporu zrychlení rotačních hmot.

Odpor zrychlení posuvných hmot je dán reakcí na změnu rychlosti. Odpor zrychlení rotačních hmot je dán vlivem na pohyb vlaku takových jeho částí, které konají rotační pohyb. Takovou částí může být např. trakční motor nebo převodovka.

### 5.3.4 Ostatní parametry

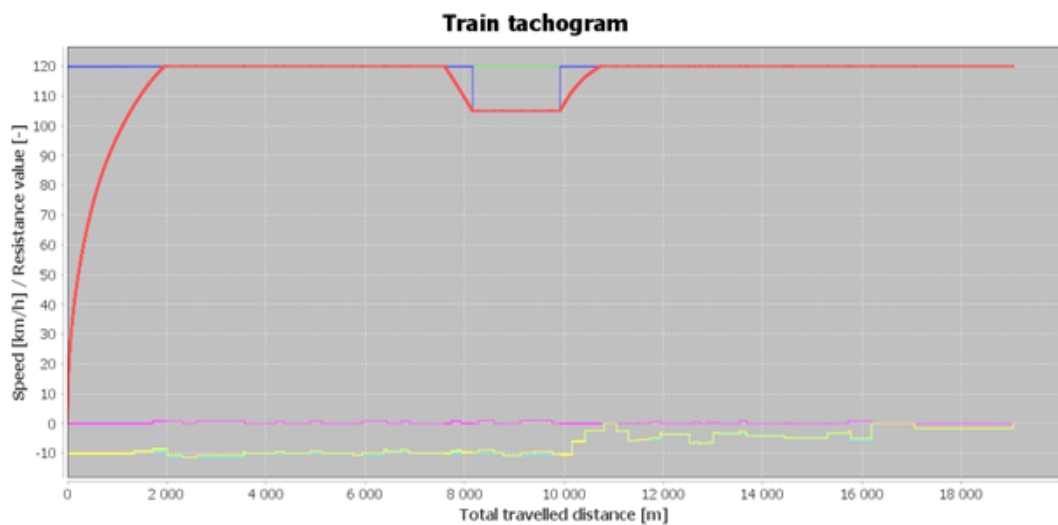
Zásadní parametr, který určuje dynamiku jízdy vlaku je procento využití výkonu hnacího vozidla (Loco utilization). Tento parametr určuje, do jaké míry je využit maximální výkon hnacího vozidla. Právě tento parametr, společně s maximální rychlostí a počtem vozů a tedy celkovou hmotností vlaku, je předmětem zkoumání této práce.

Další parametr, který ovlivňuje dynamiku jízdy vlaku, je trakční charakteristika. Vzhledem k tomu, že se ovšem tento parametr nemění, protože je dán již samotnou výrobou hnacího vozidla, nebude v této práci ani předmětem zkoumání. Detailní popis trakčních charakteristiky je uveden v samostatné kapitole.

Posledním parametrem, který má vliv na výpočet dynamiky jízdy vlaku, je volba velikosti časového rámce, během kterého je dynamika jízdy počítána. S menší velikostí časového rámce je dosahováno méně přesných výsledků. Pro výpočet je používána Eulerova metoda numerické integrace. Vzhledem k tomu, že se charakteristiky vlaku mění s měnící se polohou, musí být dynamika jízdy počítána stále znovu pro každý definovaný časový rámec. Velikost časového rámce nebude v rámci této práce zkoumaným parametrem a bude tedy použita výchozí hodnota, aby nedošlo ke zkreslení výsledků.

## 5.4 Tachogram

Simulátor disponuje možností vytvářet během jízdy vlaku tachogram, který popisuje závislost rychlosti jízdy vlaku na ujeté dráze. Tachogram obecně popisuje závislost rychlosti vlaku na jiném parametru. Tímto parametrem může být např. výše zmíněná ujetá dráha, ale může se jednat také o dobu jízdy. V tom případě se hovoří o tzv. hodogramu. Tachogram může být reprezentován buď pomocí tabulky, nebo pomocí grafu, který je přehlednější. V rámci tachogramu jsou rozlišovány 3 způsoby pohybu vlaku, přičemž všechny 3 typy pohybů se v jednom tachogramu nemusí vyskytovat. Jedná se o zrychlování, jízdu setrvačnou rychlostí a zpomalování. Tachogram lze řešit pomocí 2 typů metod - výpočetních a grafických. Výpočetní metody používají pro výpočet rovnice pohybu vlaku. Mezi grafické metody patří např. Müllerova metoda. Detailní popis jak výpočetní tak i grafické metody lze najít v [27]. Ukázka tachogramu je znázorněna na následujícím obrázku.



Obrázek 34: Ukázka tachogramu

Význam jednotlivých křivek zobrazených v tachogramu je uveden v následující tabulce.

Tabulka 16: Význam křivek v rámci tachogramu

Barva	Význam
Červená	Křivka tachogramu
Modrá	Maximální rychlost trati na daném úseku
Zelená	Maximální rychlost vlaku
Žlutá	Traťový odpor
Fialová	Odpor oblouku
Tyrkysová	Odpor sklonu trati

## 6 Praktická část

Jak již bylo uvedeno, cílem praktické části je provést sérii experimentů v rámci simulačního modelu, jejichž výsledkem bude stanovení koeficientů jednotlivých parametrů vlaku, které ovlivňují dobu jízdy daného vlaku. Vzhledem k tomu, že tyto koeficienty nelze aplikovat univerzálně na různé infrastruktury ani na různé vlaky, bude vytvořena tabulka závislosti doby jízdy na daných parametrech. Kromě tabulky budou vytvořeny také rovnice, které popisují trend závislosti jízdny doby na daném parametru.

### 6.1 Úpravy Zdrojového kódu

První část spočívala v pochopení principů fungování simulátoru. Poté bylo nutné upravit část zdrojového kódu simulátoru tak, aby bylo možné pořizovat doby jízd vlaků po každé replikaci. Již samotné zjišťování nutného počtu replikací vyžadovalo stejnou úpravu zdrojového kódu. Upravena byla třída `SimulationView`. Úprava spočívala v deklaraci instance třídy `FileWriter`, které má na starost ukládání dat do souboru. Soubor byl v rámci simulátoru uchováván jako instance třídy `File` a jeho název byl „results.txt“. Data v souboru jsou oddělena středníkem a jednotlivé řádky v souboru představují jednotlivé záznamy. Ukázka souboru „results.txt“ a samotná úprava zdrojového kódu následují.

Ukázka souboru results.txt

```
88838.40000003716;1800;638.4000000371598;1
90655.30000003814;3600;655.3000000381435;2
92428.9000000366;5400;628.9000000366068;3
94275.50000003932;7200;675.5000000393193;4
```

První hodnota na řádku představuje čas, kdy vlak opouští simulátor, druhá představuje čas vytvoření vlaku, třetí hodnota představuje dobu jízdy vlaku. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v [s]. Poslední hodnota obsahuje číslo vlaku. Jednotlivé řádky představují výsledky jednotlivých scénářů.

Deklarace File a FileWriter

```
/**
 * Added by Martin Korinek
 * FileWriter for writing to file
 * File representing real file
 */
File file = new File("results.txt");
FileWriter fw;
```

Další úprava kódu se týká metody `launchTrain`. Tato metoda je volána při stisku klávesy „F2“ a její funkcí je vytvořit vlak podle daného čísla. Původní hodnota, 300, byla změněna na 1000, pouze z důvodu přehlednosti. Obecně vlaky byly číslovány od 1 s krokem 1. Proto číslo vlaku 1000 jednoznačně identifikuje tento speciální vlak, jehož vytvořením je celá simulace spuštěna. Pro úplnost je zde uvedena tato úprava.

————— Změna čísla vlaku z 300 na 1000 —————

```
// edited by Martin Korinek (changed id from 300 to 1000)
int trainNumber = 1000;
```

Poslední úprava, která byla provedena, se týká práce simulátoru při odstranění vlaku ze simulačního modelu. Jak již bylo uvedeno výše, nejprve byla vytvořena instance třídy `FileWriter`, která zabezpečuje zápis dat do souboru. Právě tento zápis je realizován touto úpravou v kódu. `FileWriter` je inicializován tak, aby data přidával na konec souboru. Samotný zápis je realizován pomocí instance třídy `BufferedWriter`, který v tomto případě v konstruktoru přijímá jako parametr výše zmíněnou instanci třídy `FileWriter`. Po inicializaci těchto instancí je řešena samotná logika získání potřebných dat ze simulátoru. Do proměnné `day` typu `int` je uložen aktuální den v rámci simulace. Následně je do reálné proměnné `timeOnWay` uložena doba jízdy vlaku. Ta je vypočítána tak, že od aktuálního simulačního času je odečten čas vytvoření vlaku v simulátoru. Získaná data jsou následně uložena do souboru metodou `write`. Formát, v jakém jsou data uložena, je uveden výše.

————— Implementace výpočtu jízdní doby a její uložení do souboru —————

```
// Martin Korinek
// record time at train remove
if (fw != null) {
    try {
        try {
            fw = new FileWriter(file.getName(), true);
        } catch (IOException ex) {
            fw = null;
            Logger.getLogger(SimulationView.class.getName()).
                log(Level.SEVERE, null, ex);
        }
    }

    BufferedWriter bw = new BufferedWriter(fw);
    int day = Simulation.get().getDateTime().getDayOfYear()-1;
    double timeOnWay = Simulation.get().getSimulationTime() -
        (removedTrain.getTrainPrototype().getArrival().
            toSecondOfDay() + (day * 24 * 3600));
    bw.write(Simulation.get().getSimulationTime() + ";"
        + (removedTrain.getTrainPrototype().getArrival().
            toSecondOfDay() + (day * 24 * 3600)) + ";"
        + (timeOnWay) + ";");
}
```

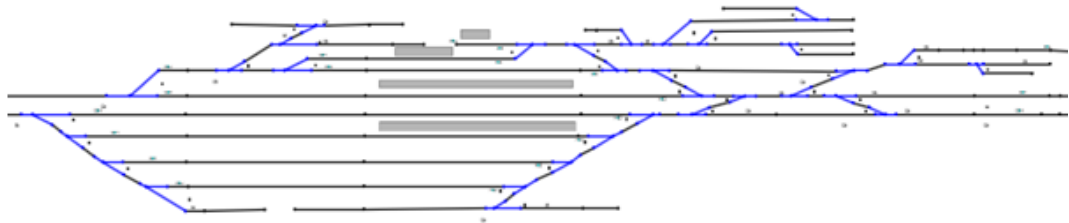
```

        + removedTrain.getId()
        + System.lineSeparator());
    bw.close();
    fw.close();
} catch (IOException ex) {
    Logger.getLogger(SimulationView.class.getName()).
        log(Level.SEVERE, null, ex);
}
}
}

```

## 6.2 Popis infrastruktury

V rámci simulačního modelu byla použita infrastruktura vlakové stanice Zdice. Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se popisem simulátoru, je tato infrastruktura zobrazena pouze schematicky. Infrastruktura byla poskytnuta již se simulátorem, proto zde není uveden podrobný popis. Vzhledem k různým poměrům traťového sklonu byly prováděny experimenty v obou směrech, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Jeden směr představuje jízdu vlaku směrem Hořovice-Zdice-Beroun, přičemž v tomto směru se jedná zejména o jízdu z kopce. Druhý směr je tedy opačný a představuje zejména jízdu do kopce. Lze předpokládat, vzhledem k tomu, že největší sklon tratě má hodnotu vyšší než 11‰, že výsledky v obou směrech se budou velmi lišit. Níže následuje obrázek části této infrastruktury.



Obrázek 35: Ukázka části infrastruktury

## 6.3 Zkoumané parametry

Jak již bylo několikrát uvedeno, cílem práce je stanovit, do jaké míry ovlivňují parametry vlaku jeho jízdní dobu. Vzhledem k tomu, že některé parametry nelze ovlivnit, jsou např. dány samotnou technologií výroby hnacího vozidla, byly pro experimentování zvoleny takové parametry, které je možné fyzicky změnit. Jedná se o následující parametry.

- Počet vozů
  - Tento parametr udává počet vozů vlaku. Nejen, že s vyšším počtem vozů dochází k navýšení celkové hmotnosti vlaku, ale zároveň také narůstají hodnoty vozidlových odporů.
- Hmotnost nákladu
  - Stejně jako s narůstajícím počtem vozů roste i hmotnost celého vlaku, tak i hmotnost nákladu naloženého v jednotlivých vozech zvyšuje hmotnost vlaku. Tím se mění výpočet dynamiky vlaku.
- Procento využití výkonu hnacího vozidla
  - Tento parametr ovlivňuje zejména zrychlování vlaku, proto má zjevně velký dopad na celkovou dobu jízdy.
- Maximální rychlost vlaku
  - Omezení maximální rychlosti vlaku má jistě zásadní podíl na celkové době jízdy. Lze předpokládat, že při snížení maximální rychlosti na  $\frac{1}{2}$  původní rychlosti, bude dosaženo dvojnásobné doby jízdy vlaku.

## 7 Tvorba vstupů do simulátoru

### 7.1 Tvorba hnacích vozidel

Hnací vozidla byla vytvářena pomocí nástroje, který je součástí simulátoru. Obrázek 31 s ukázkou tvorby hnacího vozidla je uveden v kapitole zabývající se popisem simulátoru. Použitá hnací vozidla byla také již dříve popsána. Kromě vytvoření hnacích vozidel byl tento nástroj použit i pro úpravu maximální rychlosti hnacího vozidla. Tato úprava souvisí s realizací simulačních scénářů, jejichž problematikou se zabývá jedna z následujících kapitol. V rámci tvorby hnacích vozidel byly také zkoumány trakční charakteristiky. Byly získány tabulkové hodnoty, které poté byly přeneseny do simulátoru. Hodnoty tr. char. použitých HV jsou uvedeny v následující tabulce. Rychlost je udávána v  $[\frac{km}{h}]$  a Síla v  $[kN]$ .

Tabulka 17: Tabulkové hodnoty trakčních charakteristik hnacích vozidel. Zdroj [12]

HV řady 363		HV řady 471		HV řady 742		HV řady 754	
Rychlost	Síla	Rychlost	Síla	Rychlost	Síla	Rychlost	Síla
0	250	0	180	0	138	0	192
5	236	26	180	10	130	5	175
15	220	30	176,25	20	118	12	158
20	214	40	167,813	30	80	20	140
40	198,5	50	162,188	40	58	29	127,5
60	187,5	52	160	50	44	35	109,5
70	184	60	146,25	60	36	40	98
75	173	70	127,5	70	30	45	88,3
85	152	80	112,5	80	23	50	80,4
90	143	90	100	90	16	55	73,5
95	135	100	90			60	67,6
100	128	110	80,625			65	62,6
112	115	120	75			70	58
117	104	130	69,375			75	53,8
120	96	140	63,75			80	50
						90	43,5
						100	34,5



S hnacími vozidly úzce souvisí vozy. Ty byly v rámci simulátoru vytvářeny pomocí stejného nástroje, pouze při volbě typu byla zvolena položka „Wagon“.

## 7.2 Tvorba vlaků

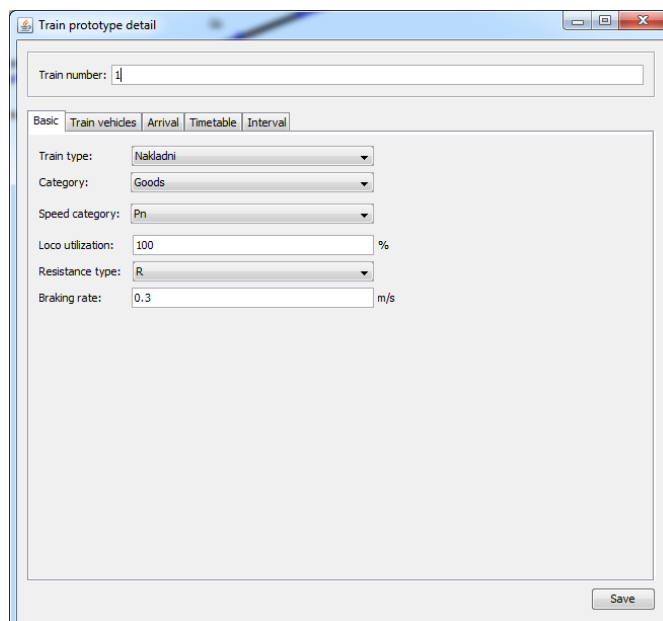
Vlaky byly opět vytvářeny pomocí nástroje, který je součástí simulátoru. Vlak se skládá z hnacího vozidla a vozů. Základní obrázek tvorby vlaku je opět znázorněn v kapitole popisující simulátor. V této části je detailně popsána tvorba vlaků včetně stanovení doby příjezdu. Celý postup a jeho popis je znázorněn na následujících obrázcích.

První z těchto obrázků ukazuje katalog vlaků, které se budou účastnit simulace. Schematicky je zde zobrazeno hnací vozidlo a jednotlivé vozy.



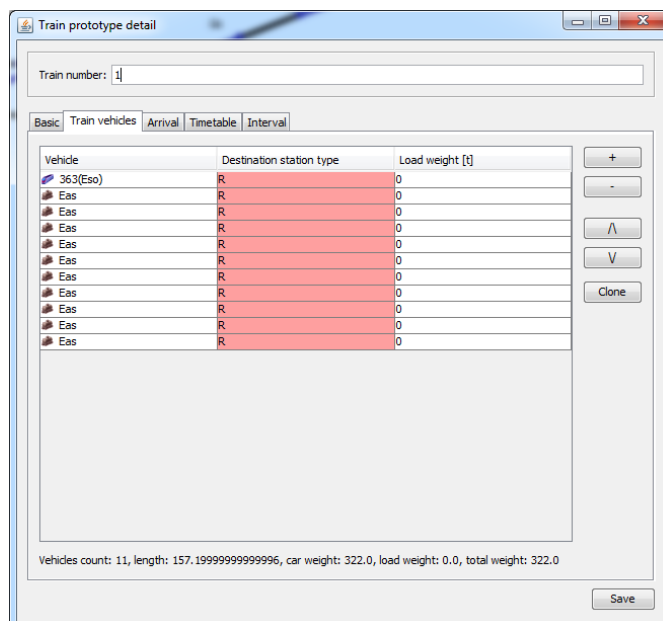
Obrázek 36: Katalog vlaků

Po kliknutí na tlačítko „Add“ nebo „Edit“ je vyvoláno okno, které je zobrazeno na následujícím obrázku. V něm je možné vyplnit číslo vlaku a další parametry. Stěžejním parametrem je výkon hnacího vozidla (Loco utilization), který, jak již bylo uvedeno, představuje procento využití výkonu hnacího vozidla.



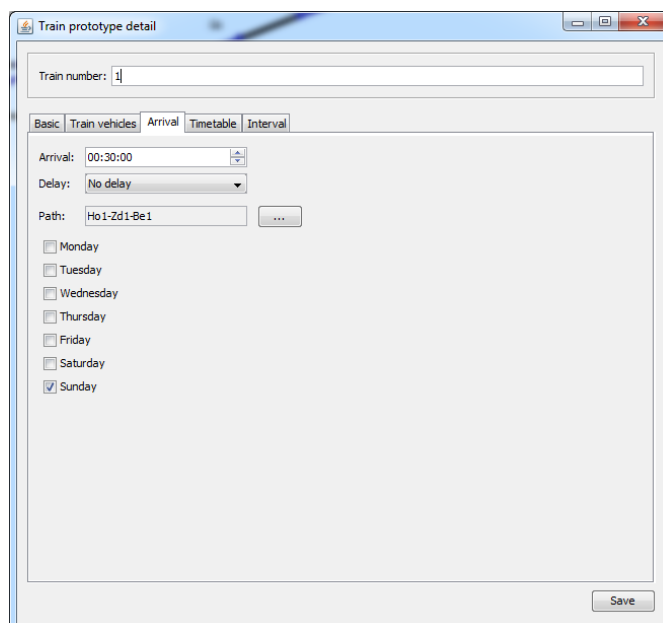
Obrázek 37: Detail vlaku: základní parametry

Na druhé záložce tohoto okna (Train vehicles) je možné definovat řazení jednotlivých vozů v rámci vlaku. Složení vlaku je také testovaný parametr. Kromě počtu a typu vozů je možné také definovat hmotnost nákladu v  $[t]$ . U nákladních vozů se jednalo o snadnou záležitost, stačilo prostě vyplnit danou hodnotu, protože použitý typ vozu má definovanou maximální ložnou hmotnost, kterou nebylo možno překročit. Naproti tomu, osobní vozy mají pouze definovaný počet míst k sezení a stání. Zde nastal problém s určením složení cestujících. Bylo předpokládáno, že ve vlaku cestuje stejný počet mužů i žen, přičemž jejich hmotnost byla vzata jako průměrná hmotnost obyvatel ČR podle [26]. Z tohoto důvodu byl uvažován cestující s průměrnou hmotností  $73,45 \text{ kg}$ . Poté bylo již snadné zjistit hmotnost „nákladu“ pomocí uvažovaného počtu pasažérů. Ve spodní části okna se průběžně zobrazuje počet vozidel, celková délka a hmotnost vlaku. Kromě těchto parametrů jsou dále vypisovány i hmotnost nákladu a hmotnost vozů.



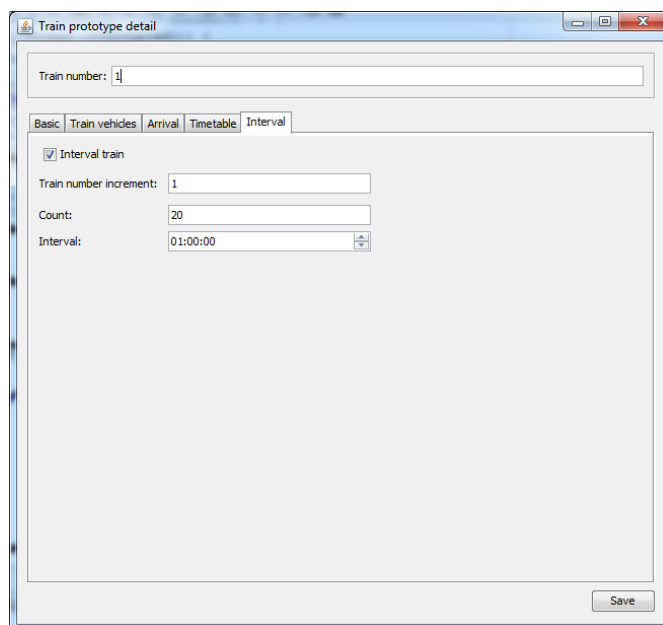
Obrázek 38: Detail vlaku: vozidla

Další okno (Arrival) umožňuje stanovit čas příjezdu vlaku, jeho trasu a dny, ve kterých vlak přijíždí. Kromě těchto parametrů je možné stanovit i hodnotu zpoždění vlaku. S touto hodnotou ovšem nebylo v rámci této práce experimentováno.



Obrázek 39: Detail vlaku: příjezd

Záložka „Timetable“ nebyla v rámci experimentů použita. Naopak pomocí okna „Interval“ byl definován vlak, pomocí něhož bylo zjištěno nutné množství replikací. Po zaškrtnutí položky „Interval train“ je daný vlak vytvořen jako vzor pro další vlaky. Tyto vlaky disponují stejnými parametry, je změněno pouze jejich číslo a čas příjezdu. Čas příjezdu je definován podle původního vlaku a hodnoty „Interval“. Tato hodnota definuje, jaké zpoždění je mezi jednotlivými vlaky. Položka „Count“ definuje počet takto vytvořených vlaků. Díky této možnosti je tedy možné vytvořit pouze jeden vlak a následující vlaky v rámci replikace je možné od tohoto vlaku odvodit, není tedy nutné pro každou replikaci vytvářet vždy nový vlak.



Obrázek 40: Detail vlaku: Interval

### 7.3 Zjištění počtu replikací

Počet replikací byl zjišťován pomocí jednoho simulačního scénáře. Bylo použito hnací vozidlo řady 754 a k němu bylo připojeno 10 prázdných vozů třídy Eas. Využití výkonu hnacího vozidla bylo stanoveno na 100 %. Jak je popsáno výše, byl vlak vytvořen jako intervalový. Vzhledem k deterministicky stanoveným vstupům bylo očekáváno, že i výstupy se budou chovat deterministicky. Tento předpoklad byl naplněn, neboť jízdní doba se pro žádný ze sledovaných vlaků nezměnila. Proto počet replikací nebylo nutné stanovovat, resp. jako 1 replikace, která byla dostačující, byl uvažován průjezd jednoho vlaku. Z tohoto důvodu nebylo třeba ani vytvářet graf ustalování hodnot.

## 7.4 Simulační scénáře

Tvorba simulačních scénářů byla kritickou částí této práce. Bylo rozhodnuto, že každý scénář bude reprezentovat změnu jednoho parametru vlaku o předem danou hodnotu. Scénáře byly rozděleny do skupin podle hnacího vozidla vlaku a podle typu vlaku (nákladní/osobní), pokud hnací vozidlo bylo určeno pro univerzální použití. V každé skupině byl vytvořen jeden scénář jako základní, tedy takový, jehož výsledky experimentů byly porovnány s výsledky experimentů ostatních scénářů z dané skupiny. Bylo sledováno, jak se mění jízdni doby při snižování resp. zvyšování daných parametrů. Obecně byly parametry snižovány na poloviční a čtvrtinové hodnoty a zvyšovány na dvojnásobně, resp. jeden a půl násobné hodnoty. Celkem bylo vytvořeno 43 simulačních scénářů v pěti skupinách v každém směru. Jednotlivé scénáře jsou uvedeny v následujících tabulkách. Popis označení scénářů je uveden pod nimi.

Tabulka 18: Přehled simulačních scénářů (1/5)

Označení	Hnací vozidlo	Počet vozů	Typ vozů	Hmotnost nákladu [t]	Využití výkonu HV [%]	Max. rychlost $\frac{km}{h}$
742ZN	Řada 742	10	Eas	0	100	90
742W+N	Řada 742	20	Eas	0	100	90
742W-N	Řada 742	5	Eas	0	100	90
742L1N	Řada 742	10	Eas	560	100	90
742L2N	Řada 742	10	Eas	280	100	90
742P-1N	Řada 742	10	Eas	0	50	90
742P-2N	Řada 742	10	Eas	0	25	90
742V-1N	Řada 742	10	Eas	0	100	45
742V-2N	Řada 742	10	Eas	0	100	22,5

Tabulka 19: Přehled simulačních scénářů (2/5)

Označení	Hnací vozidlo	Počet vozů	Typ vozů	Hmotnost nákladu [t]	Využití výkonu HV [%]	Max. rychlost $\frac{km}{h}$
363ZN	Řada 363	10	Eas	0	100	120
363W+N	Řada 363	20	Eas	0	100	120
363W-N	Řada 363	5	Eas	0	100	120
363L1N	Řada 363	10	Eas	560	100	120
363L2N	Řada 363	10	Eas	280	100	120
363P-1N	Řada 363	10	Eas	0	50	120
363P-2N	Řada 363	10	Eas	0	25	120
363V-1N	Řada 363	10	Eas	0	100	60
363V-2N	Řada 363	10	Eas	0	100	30

Tabulka 20: Přehled simulačních scénářů (3/5)

Označení	Hnací vozidlo	Počet vozů	Typ vozů	Hmotnost nákladu [t]	Využití výkonu HV [%]	Max. rychlost $\frac{km}{h}$
363ZO	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	120
363W+O	Řada 363	15	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	120
363W-O	Řada 363	5	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	120
363L1O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	749,19	100	120
363L2O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	374,595	100	120
363P-1O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	50	120
363P-2O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	25	120
363V-1O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	60
363V-2O	Řada 363	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	30

Tabulka 21: Přehled simulačních scénářů (4/5)

Označení	Hnací vozidlo	Počet vozů	Typ vozů	Hmotnost nákladu [t]	Využití výkonu HV [%]	Max. rychlost $\frac{km}{h}$
754ZO	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	100
754W+O	Řada 754	15	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	100
754W-O	Řada 754	5	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	100
754L1O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	749,19	100	100
754L2O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	374,595	100	100
754P-1O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	50	100
754P-2O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	25	100
754V-1O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	50
754V-2O	Řada 754	10	Bdmpee <sup>233</sup>	0	100	25

Tabulka 22: Přehled simulačních scénářů (5/5)

Označení	Hnací vozidlo	Počet vozů	Typ vozů	Hmotnost nákladu [t]	Využití výkonu HV [%]	Max. rychlost $\frac{km}{h}$
471ZO	Řada 471	0	-	0	100	140
471L1O	Řada 471	0	-	47,22835	100	140
471L2O	Řada 471	0	-	23,57745	100	140
471P-1O	Řada 471	0	-	0	50	140
471P-2O	Řada 471	0	-	0	25	140
471V-1O	Řada 471	0	-	0	100	70
471V-2O	Řada 471	0	-	0	100	35

Označení scénáře se skládá z označení řady hnacího vozidla a dalších znaků, jejichž význam je následující. *Z* představuje základní scénář, *N* nákladní a *O* osobní vlak. *W+* představuje zvýšení počtu vozů, *W-* snížení. *L* znamená použití nákladu (1 = 100 % kapacity, 2 = 50 % kapacity). *P-* představuje snížení výkonu hnacího vozidla (1 = 50 %, 2 = 25 %) a *V-* představuje snížení maximální rychlosti hnacího vozidla (1 = 50 %, 2 = 25 %).

Kromě těchto scénářů, které slouží zejména pro určení tzv. referenčního vlaku, který představuje reprezentanta všech použitých vlaků, popř. skupiny vlaků, byly vytvořeny i další scénáře. Ty jsou určeny k získání tabulky závislosti doby jízdy na parametrech vlaku. Zkoumané parametry u těchto scénářů jsou pouze 2 a to procento výkonu hnacího vozidla a maximální rychlost hnacího vozidla. Tyto parametry byly postupně snižovány po 10 % a výsledná jízdní doba byla zaznamenána. Pro jízdu z kopce byl vytvořen 1 referenční vlak, zatímco pro jízdu do kopce jich bylo vytvořeno několik. Parametry, které se v rámci scénářů neměnily, jsou zejména počet a typ vozů a hmotnost nákladu. Počet vozů byl stanoven na 10, náklad nebyl uvažován a typ vozů se liší podle referenčního vlaku. Pro jízdu z kopce byl zvolen osobní vlak s vozy řady Bdmpee<sup>233</sup>. Následuje tabulka těchto dalších scénářů, přičemž tato je stejná pro všechny referenční vlaky. Dále následuje tabulka referenčních vlaků.

Tabulka 23: Přehled parametrů referenčních vlaků

Označení	% využití výkonu HV	% maximální rychlosti HV
R_90_100	90	100
R_80_100	80	100
R_70_100	70	100
R_60_100	60	100
R_50_100	50	100
R_40_100	40	100
R_30_100	30	100
R_100_90	100	90
R_100_80	100	80
R_100_70	100	70
R_100_60	100	60
R_100_50	100	50
R_100_40	100	40
R_100_30	100	30
R_100_20	100	20



Tabulka 24: Přehled referenčních vlaků

Označení	Směr	Řada HV	Řada vozů
363_O_HZB	Hořovice-Zdice-Beroun	363	Bdmpee233
363_O_BZH	Beroun-Zdice-Hořovice	363	Bdmpee233
471_O_BZH	Beroun-Zdice-Hořovice	471	-
754_O_BZH	Beroun-Zdice-Hořovice	754	Bdmpee233

Jak z tabulky vyplývá, pro jízdu ve směru Beroun-Zdice-Hořovice, tedy jízdu z kopce, byly zvoleny 3 referenční vlaky. Tyto vlaky jsou zástupci 3 skupin vlaků. Skupiny byly vytvářeny podle poměru hmotnosti celého vlaku k stálému výkonu hnacího vozidla. Rozdělení do skupin podle tohoto poměru odpovídá také rozdělení vlaků podle typu pohonu hnacího vozidla. Pro elektrické jednotky vyšla hodnota daného poměru menší než 0,1. Pro HV s elektrickým pohonem vyšel tento poměr v rozmezí 0,1 až 0,2 a pro HV s motorovým pohonem vyšel v rozmezí 0,3 - 0,4. Referenční vlaky byly voleny tak, aby odchylka jejich jízdní doby od průměru byla co nejmenší. Maximální hodnota této odchylky nabývá hodnoty cca 10,5 %. Vzhledem k celkovému počtu pouze 5 zkoumaných vlaků je tato odchylka považována za dostatečnou a lze předpokládat, že při vyšším počtu zkoumaných vlaků by její hodnota klesla. Stejně tak z důvodu nízkého počtu vlaků byly stanoveny pouze 3 skupiny. Pokud by bylo experimentováno s více typy HV, lze předpokládat, že i počet skupin by se zvýšil.

Po provedení všech simulačních experimentů se všemi referenčními vlaky byly vytvořeny dodatečné simulační scénáře. Jejich účelem bylo potvrzení správnosti rovnic, které definují trend závislosti jízdní doby vlaku na daném parametru. V rámci těchto scénářů bylo experimentováno pouze s jedním referenčním vlakem a to 363\_O\_HZB. Hodnoty využití výkonu HV byly postupně snižovány s krokem 2 % až do hodnoty 50 %. Výsledkem tedy bylo dalších 25 scénářů.

Pro prozkoumání, jaký má na jízdní dobu vliv kombinace změny více parametrů byly vytvořeny dodatečné scénáře. Pro každý referenční vlak se jednalo o 12 scénářů. Pro referenční vlaky 363\_O\_HZB, 363\_O\_BZH a 471\_O\_BZH se jednalo o následující kombinace parametrů. Výkon HV nabýval hodnot 30, 50, 75 a 100 % a maximální rychlost hodnot 25, 50 a 75 %. U RV 754\_O\_BZH maximální rychlost nabývala stejných hodnot, jako v předchozích případech, ale výkon nabýval odlišných hodnot, konkrétně 40, 60, 80 a 100 %.

## 8 Analýza výsledků experimentů

### 8.1 Korelační analýza

Prvotní analýzy výsledků experimentů spočívala v stanovení korelačních koeficientů mezi jízdními dobami vlaků a jejich parametry. Pro přehlednost byla korelace mezi parametry vlaků a jejich jízdními dobami uspořádána do tzv. korelační matice. Tuto matici lze automaticky vygenerovat pomocí nástroje v programu MS Excel. Pro samotný výpočet korelačního koeficientu mezi 2 statistickými znaky je možné použít následující vztah.

$$\rho_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}} \quad (27)$$

Jak bylo uvedeno výše, program MS Excel umí vygenerovat korelační matici automaticky. Postačí k tomu použít daný nástroj a vybrat požadované statistické znaky. Správnost výpočtu, který Excel provádí, byla ověřena pomocí spočítání několika prvních hodnot korelační matice. Výpočty provedené Excelem se shodovaly s výpočty provedenými pomocí předchozího vztahu. Proto nebylo třeba pokračovat v manuálním výpočtu.

Co vlastně korelační koeficient představuje? Jedná se o číslo v intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$ , které udává, jak jsou na sobě jednotlivé 2 statistické znaky závislé. Pokud je hodnota korelačního koeficientu v absolutní hodnotě vyšší než 0,8, hovoříme o silné korelaci (znaky jsou na sobě velmi závislé). Pokud platí  $0,6 \leq |\rho_{xy}| < 0,8$ , tak hovoříme o slabé korelaci. Pokud je hodnota korelace rovna nule, znaky jsou na sobě nezávislé. Roli hraje také to, jestli je hodnota korelačního koeficientu kladná nebo záporná. Pokud je kladná, jsou na sobě statistické znaky závislé přímo úměrně (když hodnota jednoho roste, roste hodnota i druhého výběru). Pokud je záporná, znaky jsou na sobě závislé nepřímo úměrně (hodnota jednoho roste, druhého klesá).

Korelační matice je symetrická podle hlavní diagonály. Na hlavní diagonále jsou umístěny samé 1. To je logicky zřejmé, neboť jeden a ten samý statistický znak je na sobě absolutně závislý. Vzhledem k symetričnosti této matice Excel generuje pouze polovinu korelační matice. Je vygenerována hlavní diagonála a hodnoty umístěné pod ní.

Vzhledem k tomu, že korelace mezi jednotlivými parametry není z hlediska této práce důležitá, nejsou tyto korelace, resp. korelační koeficienty uvedeny. Z každé vygenerované matice byly použity pouze hodnoty korelačních koeficientů mezi parametry vlaku a dobou jízdy. Tyto korelační koeficienty pro jednotlivé parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Jednotlivé sloupce představují sadu scénářů, např. 742...N znamená, že tyto korelační koeficienty byly dosaženy pomocí scénářů, kde bylo použito HV řady 742 a jedná se o nákladní vlak, viz předchozí kapitola.

Tabulka 25: Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdou pro směr HZB

Sada scénářů	742... N	363... N	363... O	754... O	471... O
	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy
Počet vozů	-0,062881299	-0,064352211	0,012742323	0,012762025	
Max. rychlost [km/h]	-0,950840399	-0,951372129	-0,950022766	-0,951236271	-0,927528902
Výkon [%]	0,200284702	0,206072732	0,183804668	0,191300149	0,214305235
Náklad [t]	-0,226415546	-0,224139638	-0,245347279	-0,243817735	-0,357338651

Tato tabulka udává korelační koeficienty pro jízdu ve směru Hořovice-Zdice-Beroun. Korelační koeficienty získané při jízdě v opačném směru jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 26: Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdou pro směr BZH

Sada scénářů	742... N	363... N	363... O	754... O	471... O
	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy	Doba jízdy
Výkon [%]	-0,037884056	0,156878659	0,065538334	-0,29614387	0,022941507
Max. rychlost [km/h]	-0,624264801	-0,942852123	-0,936783025	-0,750666997	-0,869969343
Počet vozů	0,130256828	-0,066014852	-0,041643585	0,117530963	
Náklad [t]	0,280580398	-0,200263194	-0,291028061	-0,281601286	-0,41466658

Jak je vidět, v obou tabulkách chybí korelační koeficient mezi počtem vozů a dobou jízdy u scénářů týkajících se HV řady 471. To je způsobeno absencí scénářů s různým počtem vozů u vlaků s HV řady 471. Jedná se o elektrickou jednotku, kde jednotlivé vozy byly nahrazeny jedním se sumarizovanými parametry. V rámci scénářů proto nebyly vozy ani přidávány, ani odebírány.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, byly vytvořeny tzv. referenční vlaky, které reprezentují skupiny různých vlaků. Reprezentace spočívá ve vytvoření skupin s podobnými vlastnostmi, tedy s podobně se chovající jízdou na základě změny parametrů. Po vytvoření skupin již není třeba provádět podrobné experimenty se všemi stanovenými vlaky, ale pouze s těmi referenčními. Stejně, jako byly vytvořeny tyto referenční vlaky, byly stanoveny i korelační koeficienty, které odpovídají daným skupinám vlaků. Tyto koeficienty byly stanoveny jako průměr hodnot pro každou skupinu. Tabulka korelačních koeficientů referenčních vlaků následuje.

Tabulka 27: Korelační koeficienty mezi parametry vlaku a jízdou pro RV

	Doba jízdy			
	363_O_HZB	363_O_BZH	471_O_BZH	754_O_BZH
Počet vozů	-0,025432291	-0,053829218		0,123893896
Max. rychlost [km/h]	-0,946200093	-0,939817574	-0,869969343	-0,687465899
Výkon [%]	0,199153497	0,111208497	0,022941507	-0,167013963
Náklad [t]	-0,25941177	-0,245645627	-0,41466658	-0,000510444

Z této tabulky lze vyčíst, do jaké míry by daný parametr měl ovlivňovat jízdou vlaku. Nejvýznamněji je jízdou ovlivňována maximální rychlostí vlaku. Pro klesání je tento koeficient roven cca 94,6 %. Záporná hodnota koeficientu ukazuje na to, že pro nárůst jízdou je třeba snížit maximální rychlost vlaku. Samotná hodnota ukazuje na to, že při snížení rychlosti na polovinu by mělo být dosaženo přibližně dvojnásobné jízdou. Velice podobně jsou na tom referenční vlaky 363\_O\_BZH a 471\_O\_BZH. Jediný vlak, který se významně liší je 754\_O\_BZH. Z toho lze usuzovat, že vlaky s nižším trvalým výkonem nejsou maximální rychlostí až do takové míry ovlivňovány.

Další hypotéza, stanovená na základě korelace, předpokládá, že jízdou bude pouze minimálně ovlivňována počtem vozů. Stejně tak hmotnost nákladu ani výkon nebudou významně ovlivňovat jízdou.

Vzhledem k tomu, že počet vozů ani náklad není v praxi rozhodně vhodné měnit, pokud je třeba ovlivnit jízdou, jsou simulační scénáře referenčních vlaků omezeny pouze na změnu maximální rychlosti a procenta využití výkonu HV. Jak již bylo výše uvedeno, předpokládá se, že jízdou bude nejvýznamněji ovlivněna změnou maximální rychlosti a pouze v menší míře ovlivněna změnou využití výkonu HV. Lze tedy usoudit, že jízdou je v praxi nejvíce ovlivňována právě maximální rychlostí.

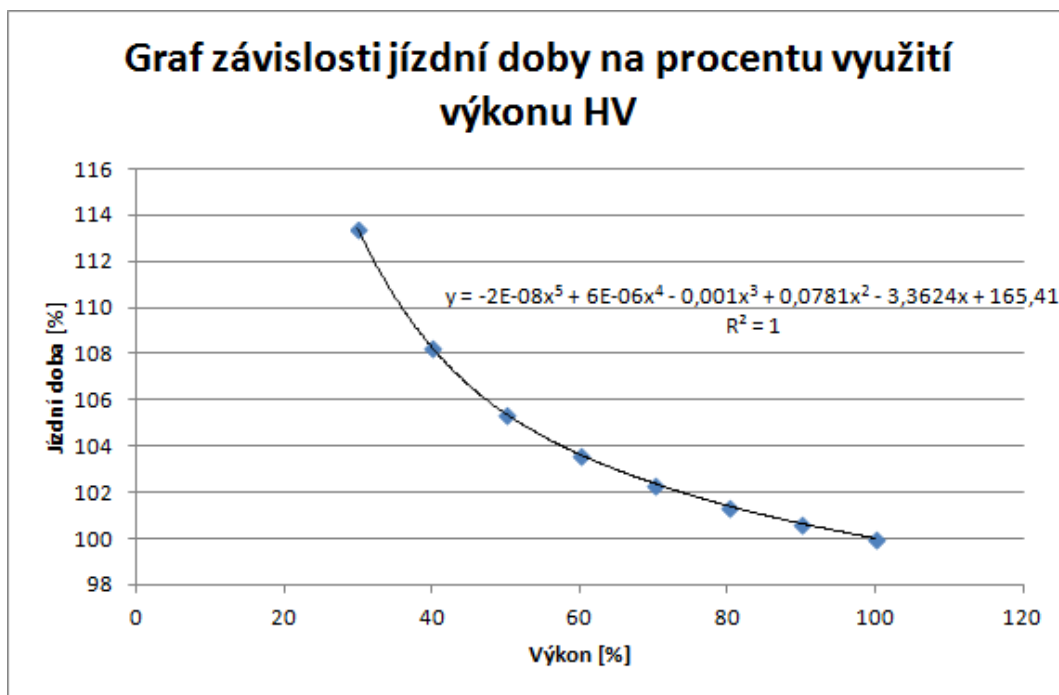
## 8.2 Analýza jízdních dob referenčních vlaků

### 8.2.1 Referenční vlak 363\_O\_HZB

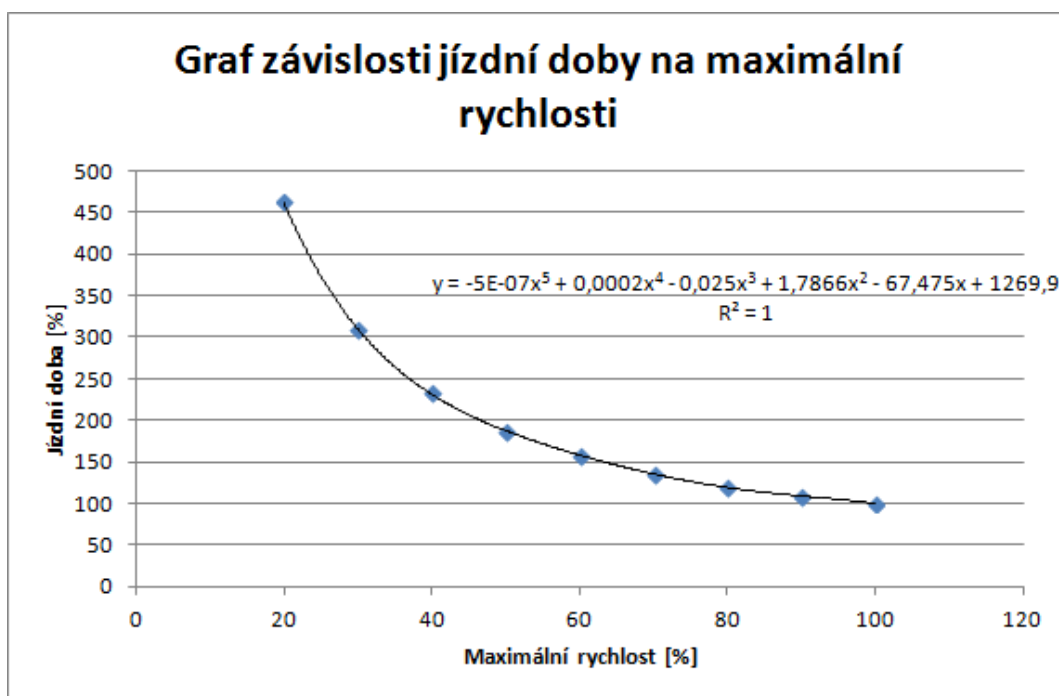
Jak již bylo zmíněno výše, pro jízdu ve směru Hořovice-Zdice-Beroun byl vytvořen pouze 1 referenční vlak. Jedná se o osobní vlak s HV řady 363 a s 10 vozy řady Bdmpee<sup>233</sup>. Níže následuje tabulka hodnot získaných v rámci jednotlivých experimentů. Pro přehlednost jsou výsledky zobrazeny také v grafech na následujících obrázcích. Kromě grafů je v obrázcích zanesena také spojnice trendu, která byla vygenerována pomocí aplikace MS Excel, ve které byly také vytvářeny samotné grafy. Ke spojnici trendu se váže také její rovnice, jež je také v grafu zobrazena. Zkoumáním různých typů trendu bylo zjištěno, že nejvíce daná data vystihuje polynomický trend.  $R^2$  představuje hodnotu spolehlivosti pro daný typ a stupeň polynomu, přičemž platí: čím vyšší hodnota, tím vyšší spolehlivost. Tento koeficient může nabývat hodnot 0 až 1. Rovnice zobrazené v grafech jsou ovšem nepřesné, protože jednotlivé koeficienty jsou zaokrouhleny a zobrazeno je pouze omezené množství desetinných míst. Kompletní přehled všech rovnic včetně jednotlivých koeficientů je uveden v následující kapitole.

Tabulka 28: Výsledky experimentů pro referenční vlak 363\_O\_HZB

Výkon [%]	Jízdní doba [%]	Maximální rychlost [%]	Jízdní doba [%]
100	100	100	100
90	100,6433824	90	108,1495098
80	101,4246324	80	119,9295343
70	102,3897059	70	135,7689951
60	103,6305147	60	157,0159314
50	105,4074755	50	187,2702206
40	108,2720588	40	232,6439951
30	113,403799	30	308,8848039
		20	461,9791667



Obrázek 41: Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 363\_O\_HZB



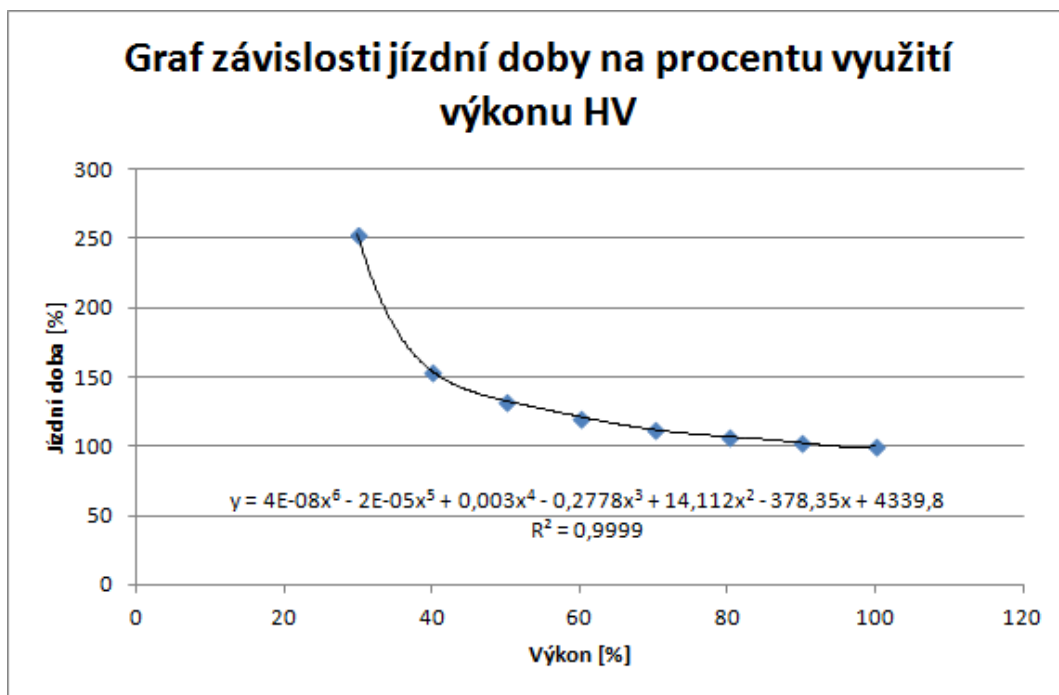
Obrázek 42: Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 363\_O\_HZB

Lze si povšimnout, že v obou případech data byla proložena polynomem pátého řádu a spolehlivost je rovna 1. Tato hodnota představuje velice přesný výsledek při výpočtu spojnice trendu. Proto je možné tuto rovnici použít jako směrodatnou při dalších experimentech, ve kterých se ověří, zda získané hodnoty odpovídají zvolenému trendu.

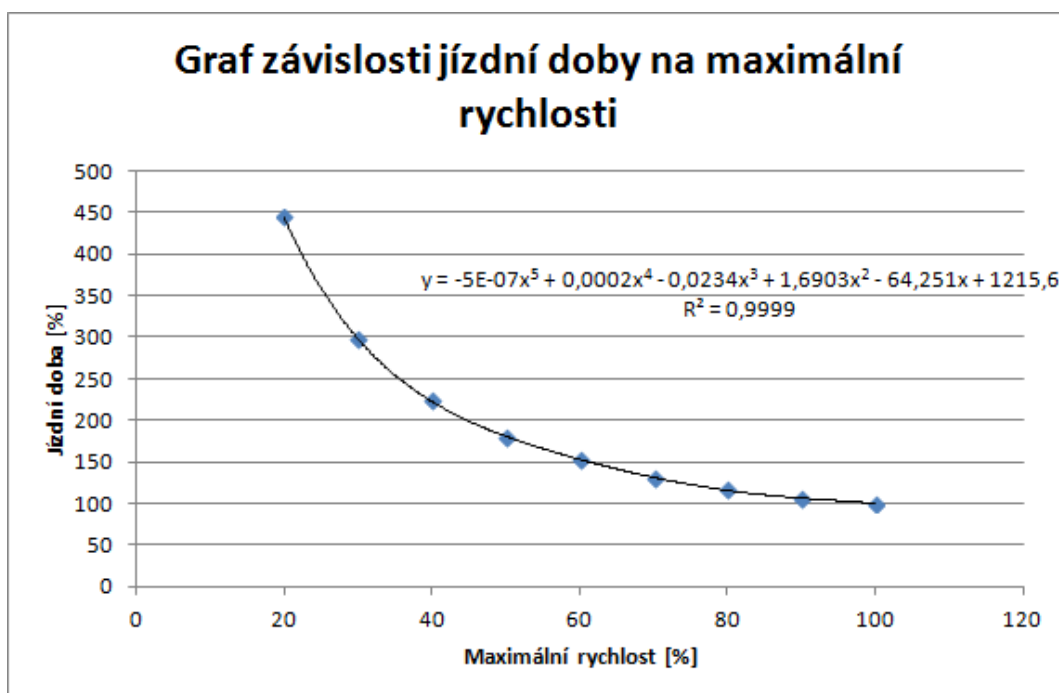
## 8.2.2 Referenční vlak 363\_O\_BZH

Tabulka 29: Výsledky experimentů pro referenční vlak 363\_O\_BZH

Výkon [%]	Jízdní doba [%]	Maximální rychlost [%]	Jízdní doba [%]
100	100	100	100
90	102,443692	90	105,5645517
80	106,3594877	80	116,5170028
70	112,4392757	70	131,5324599
60	120,5064037	60	151,7444428
50	132,9162373	50	180,6860003
40	154,0262034	40	224,0836155
30	252,3627263	30	297,2030031
		20	444,1925512



Obrázek 43: Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 363\_O\_BZH



Obrázek 44: Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 363\_O\_BZH

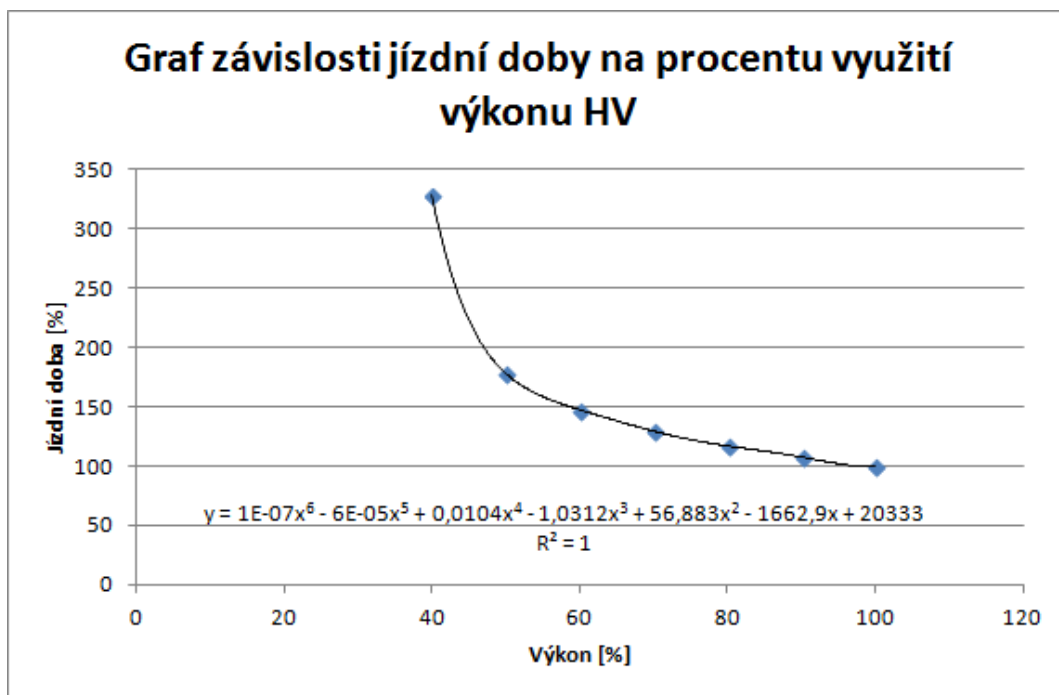


### 8.2.3 Referenční vlak 754\_O\_BZH

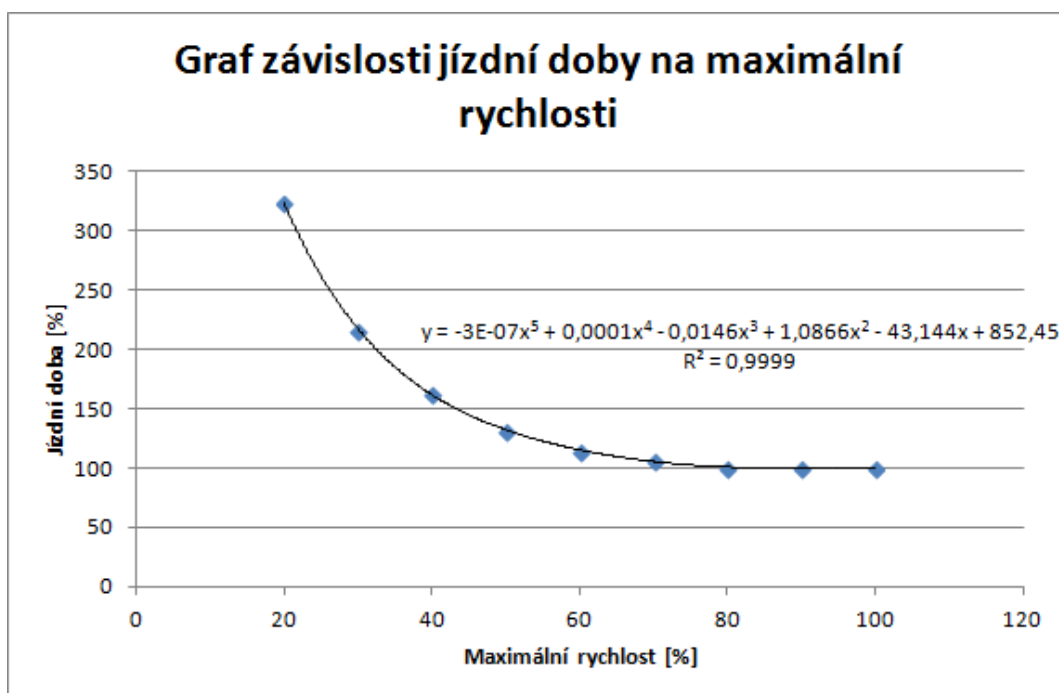
U tohoto referenčního vlaku nebyl realizován scénář se snížením výkonu HV na méně než 40 %. Od scénáře s 30 % využití výkonu HV bylo upuštěno z důvodu snížení rychlosti při stoupání na 0 a následné couvání vlaku. Toto chování se ukázalo jako nepřijatelné pro simulaci, neboť vlak nemohl dosáhnout cílové destinace a proto nebyl ze simulátoru ani odstraněn. Jako nejlepší řešení se tedy ukázalo odstranění scénáře.

Tabulka 30: Výsledky experimentů pro referenční vlak 754\_O\_BZH

Výkon [%]	Jízdní doba [%]	Maximální rychlost [%]	Jízdní doba [%]
100	100	100	100
90	107,2894361	90	100
80	116,6934333	80	100,5531763
70	129,2915774	70	106,0849393
60	147,2073519	60	114,2844397
50	177,9800143	50	131,3972163
40	327,5785153	40	162,9639543
		30	216,5417559
		20	323,0014276



Obrázek 45: Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 754\_O\_BZH

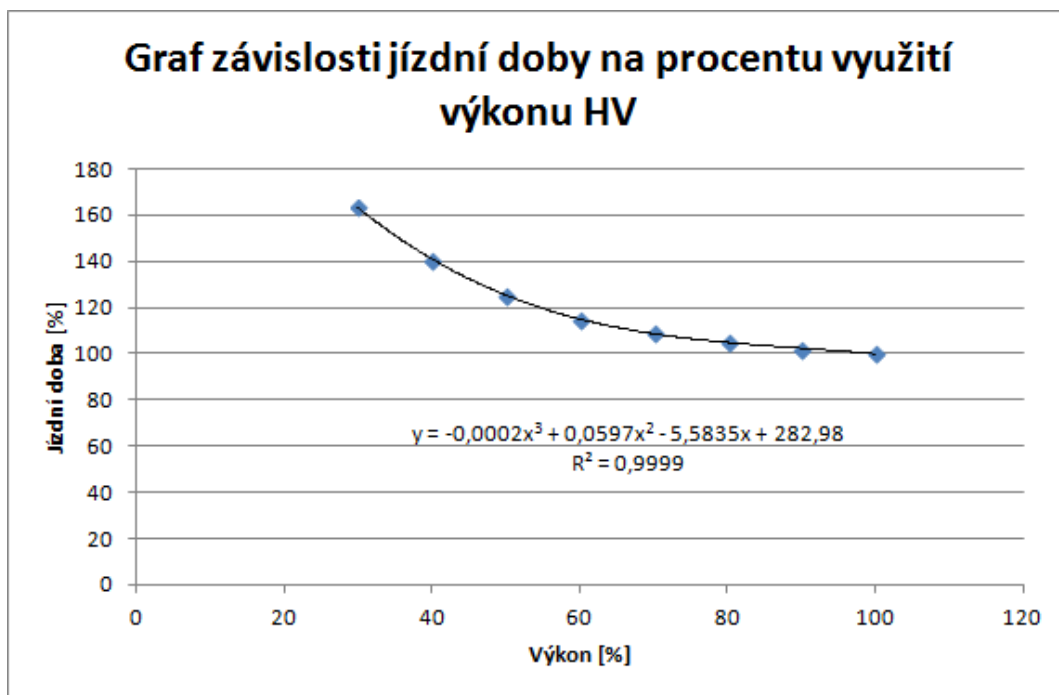


Obrázek 46: Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 754\_O\_BZH

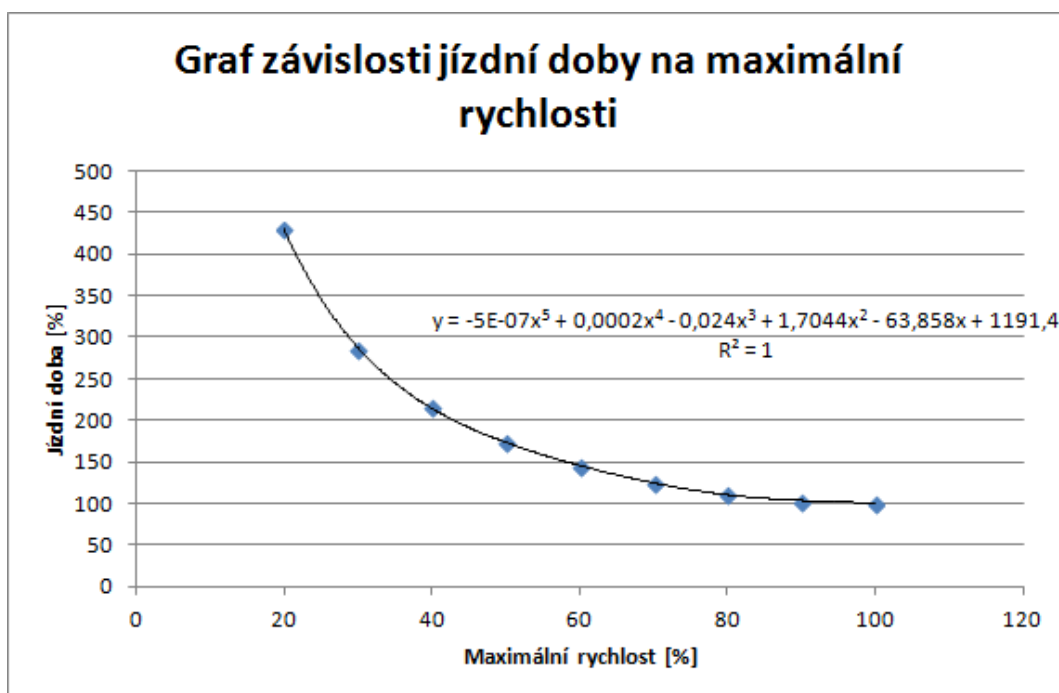
## 8.2.4 Referenční vlak 471\_O\_BZH

Tabulka 31: Výsledky experimentů pro referenční vlak 471\_O\_BZH

Výkon [%]	Jízdní doba [%]	Maximální rychlost [%]	Jízdní doba [%]
100	100	100	100
90	101,9419087	90	102,9875519
80	104,7302905	80	110,8547718
70	109,0456432	70	124,8962656
60	114,7551867	60	144,8298755
50	125,3112033	50	173,0290456
40	140,780083	40	215,5850622
30	163,3029046	30	286,8049793
		20	429,7759336



Obrázek 47: Graf závislosti jízdní doby na procentu využití výkonu HV pro RV 471\_O\_BZH

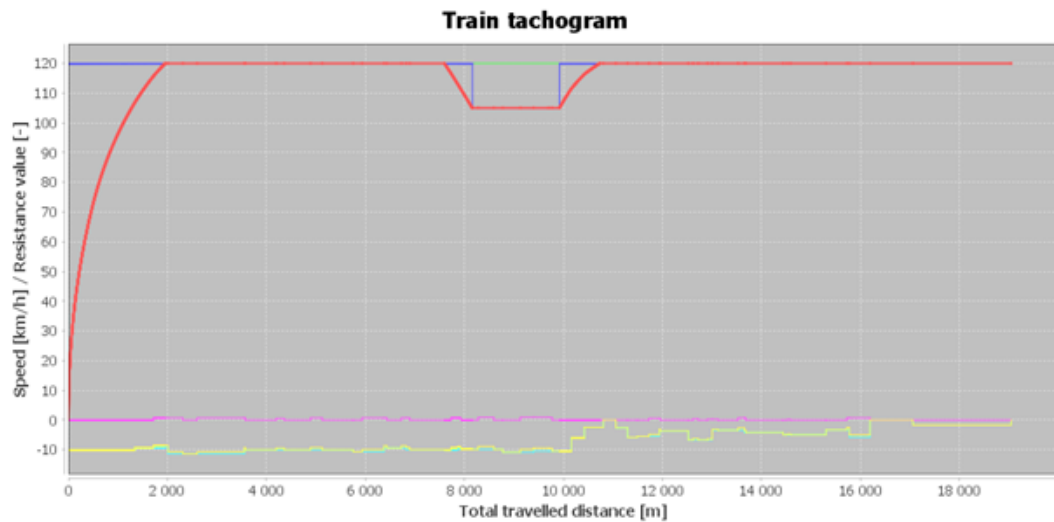


Obrázek 48: Graf závislosti jízdní doby na max. rychlosti HV pro RV 471\_O\_BZH

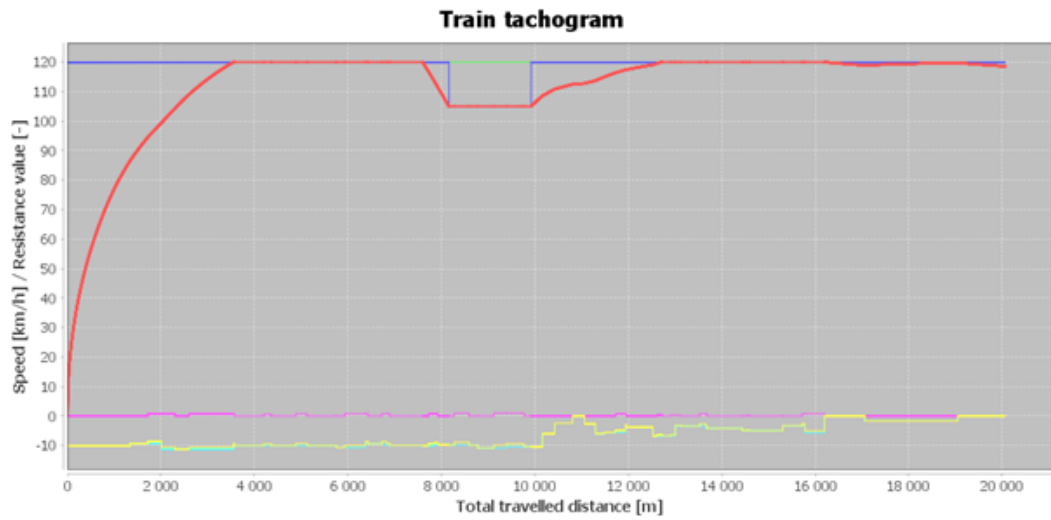
## 8.3 Tachogramy

V kapitole zabývající se simulátorem bylo zmíněno, že simulátor disponuje možností pro tvorbu tzv. tachogramů. Vzhledem k požadavku, aby výstupem práce byla i sada grafů, které mají představovat záznam jízdy vlaků, je tachogram velice vhodným kandidátem pro splnění tohoto požadavku. Byly vytvořeny celkem 4 sady tachogramů, podle referenčních vlaků. Pro každý referenční vlak byly vytvořeny 3 tachogramy, které zachycují jízdu vlaku při odlišných parametrech. První tachogram v každé sadě představuje takový referenční vlak, který využívá 100 % výkonu HV a jeho maximální rychlost nebyla snížena. Druhý tachogram zaznamenává průběh jízdy vlaku při snížení výkonu HV na 50 % při zachování původní maximální rychlosti. Poslední tachogram v každé sadě reprezentuje takový RV, kde byla maximální rychlost snížena na 50 %, a výkon HV nebyl omezen.

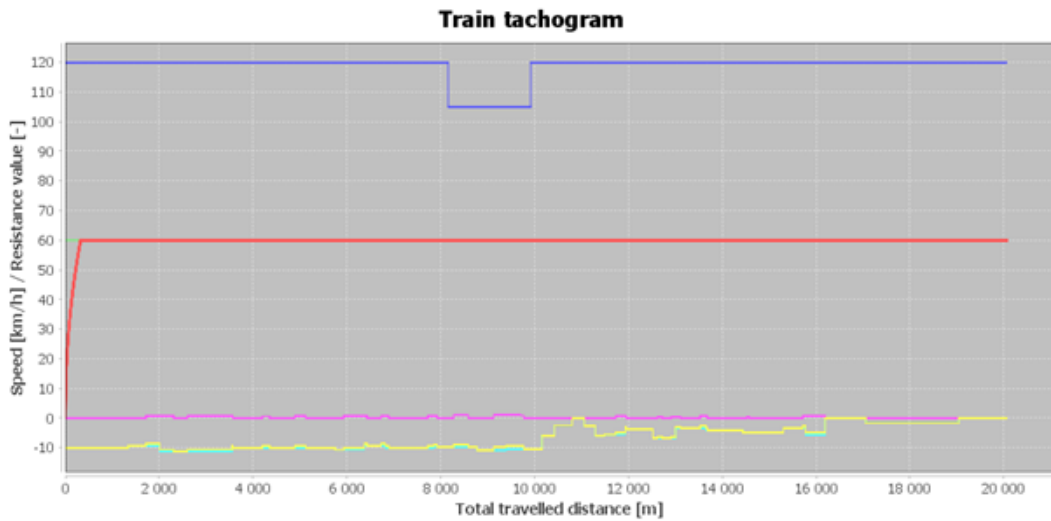
### Referenční vlak 363\_O\_HZB



Obrázek 49: Tachogram pro RV 363\_O\_HZB při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti

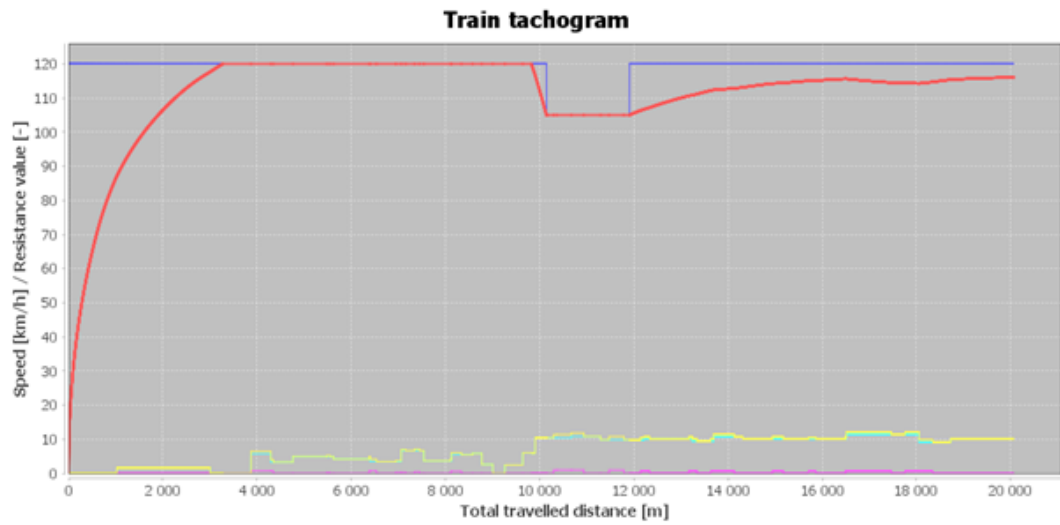


Obrázek 50: Tachogram pro RV 363\_O\_HZB při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti

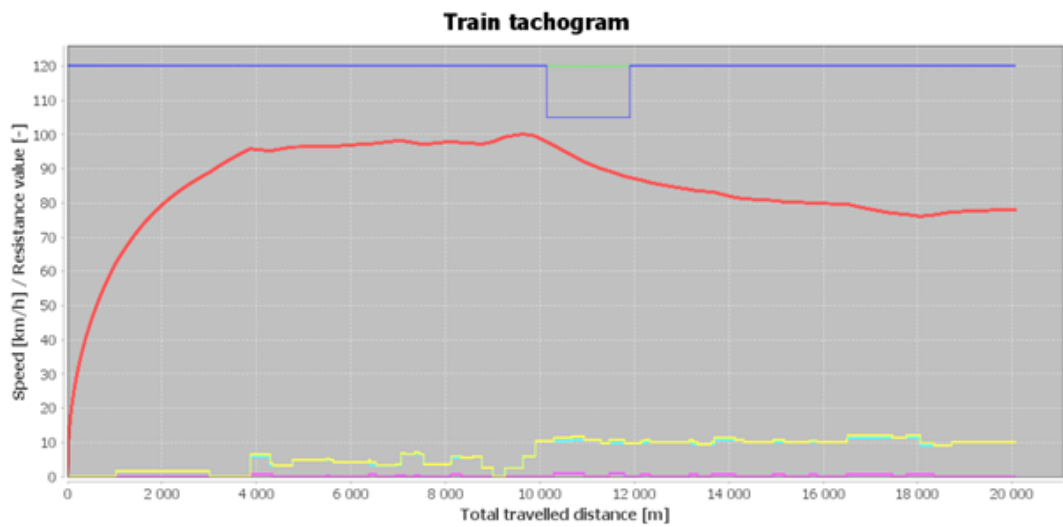


Obrázek 51: Tachogram pro RV 363\_O\_HZB při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti

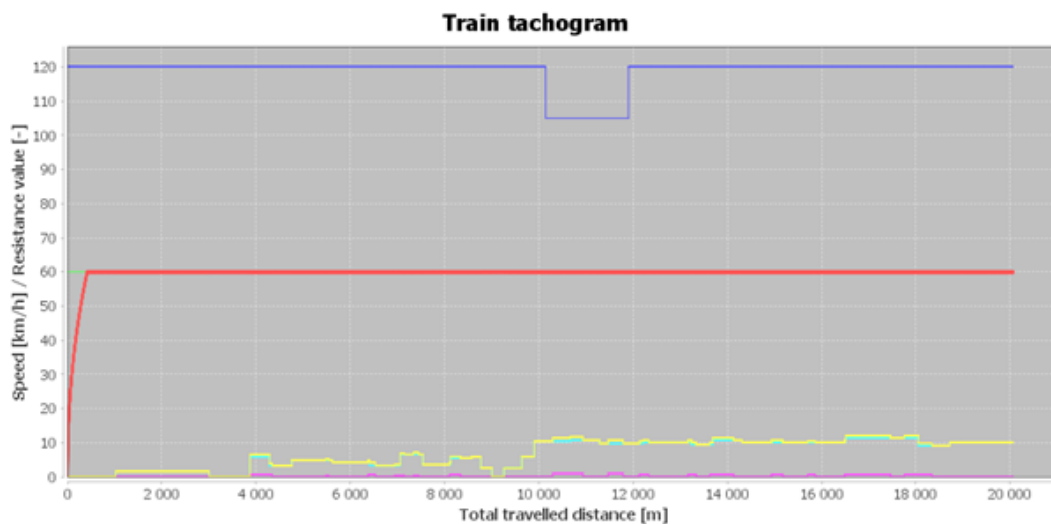
## Referenční vlak 363\_O\_BZH



Obrázek 52: Tachogram pro RV 363\_O\_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti

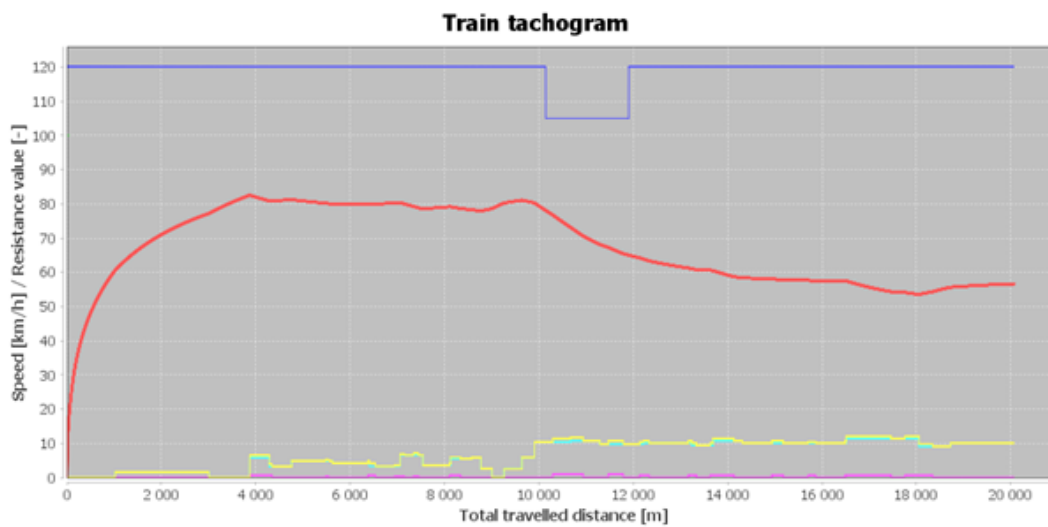


Obrázek 53: Tachogram pro RV 363\_O\_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti



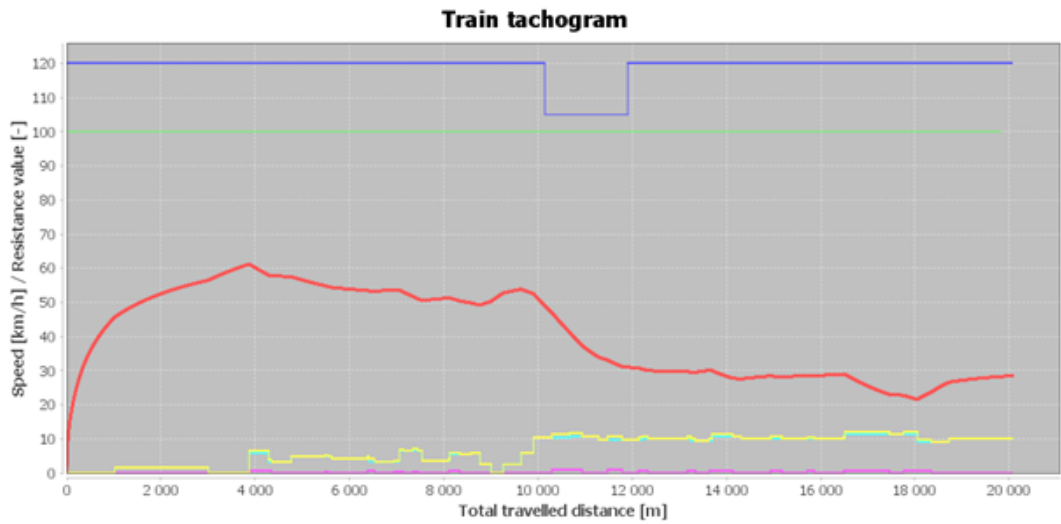
Obrázek 54: Tachogram pro RV 363\_O\_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti

### Referenční vlak 754\_O\_BZH

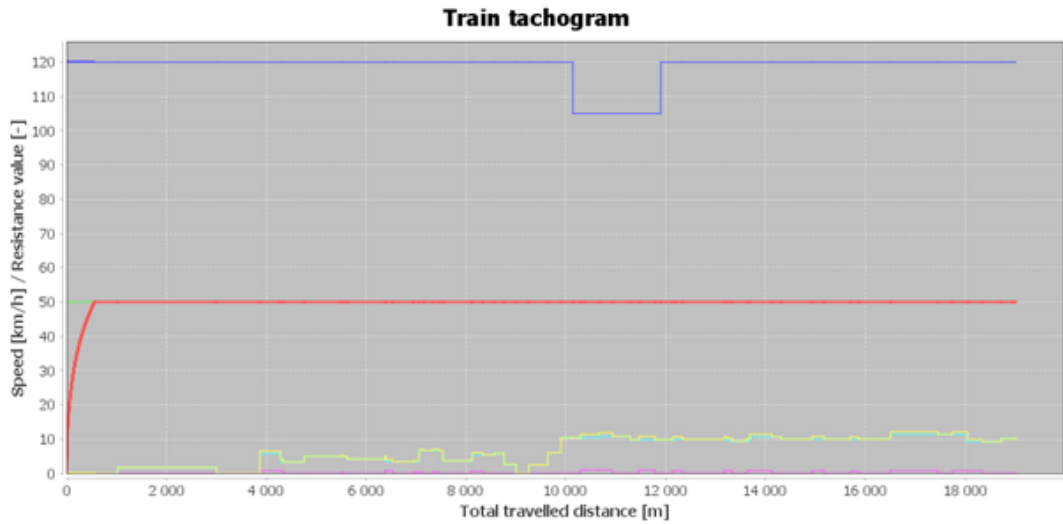


Obrázek 55: Tachogram pro RV 754\_O\_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti



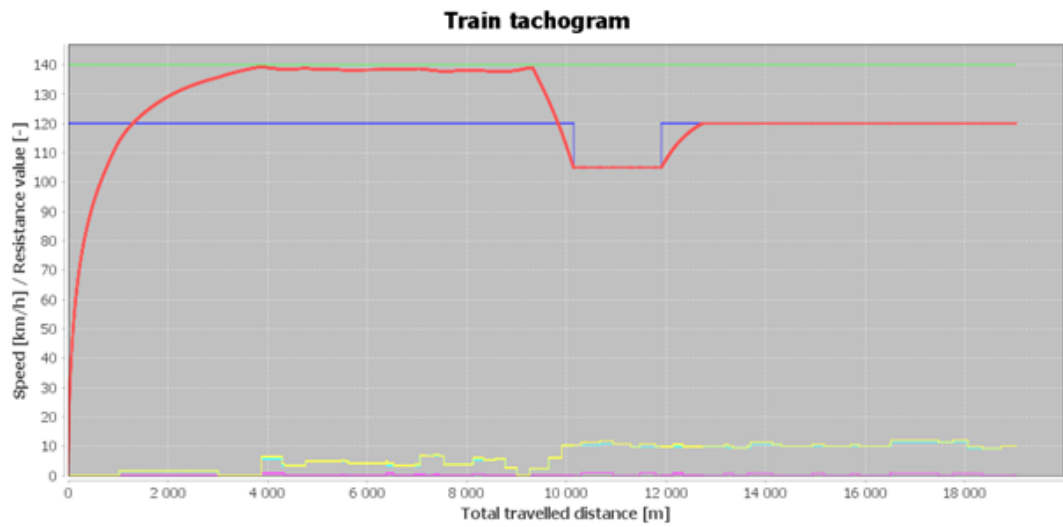


Obrázek 56: Tachogram pro RV 754\_O\_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti

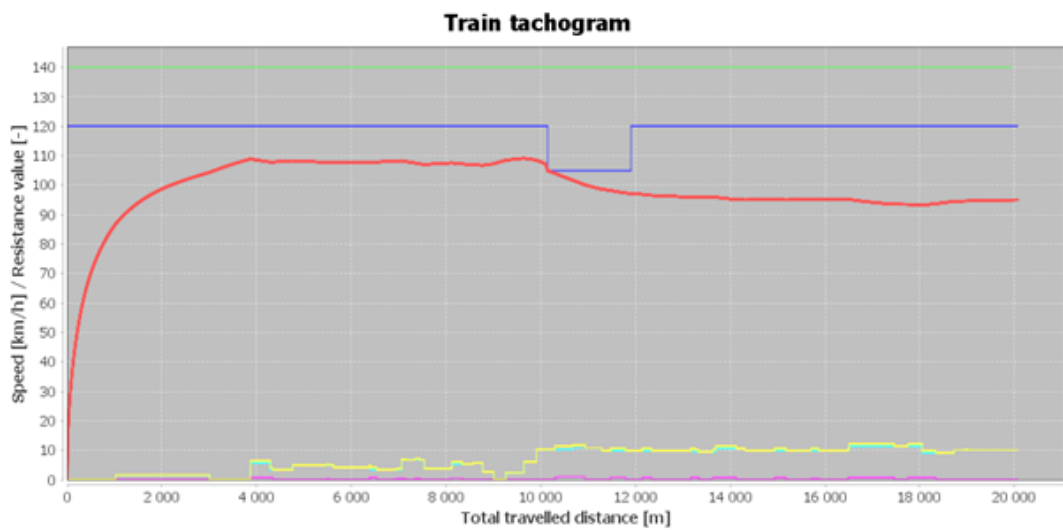


Obrázek 57: Tachogram pro RV 754\_O\_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti

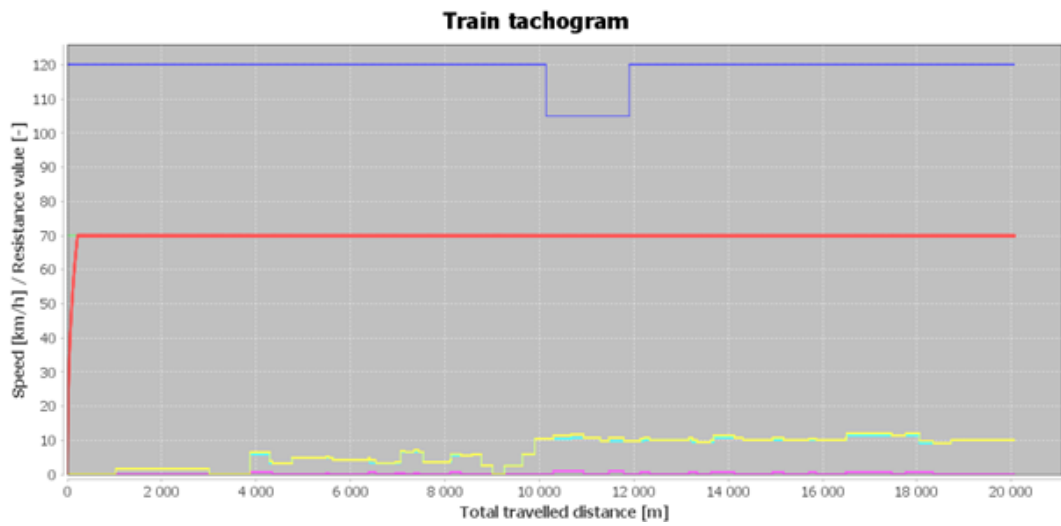
## Referenční vlak 471\_O\_BZH



Obrázek 58: Tachogram pro RV 471\_O\_BZH při 100 % HV a 100 % maximální rychlosti



Obrázek 59: Tachogram pro RV 471\_O\_BZH při 50 % HV a 100 % maximální rychlosti



Obrázek 60: Tachogram pro RV 471\_O\_BZH při 100 % HV a 50 % maximální rychlosti

## 9 Vyhodnocení simulačních experimentů

V rámci této kapitoly budou shrnuty výsledky všech experimentů. Dále zde bude uvedena tabulka obsahující koeficienty rovnic, které popisují trend závislosti jízdní doby vlaku na jeho parametrech. Následně pomocí daných rovnic budou stanoveny tabulky, jejichž smyslem je podat představu o tom, jak se musí změnit jednotlivé parametry vlaku, aby bylo dosaženo předem daného zvýšení jízdní doby o určitý počet procent.

### 9.1 Shrnutí výsledků experimentů

První pohled na výsledky experimentů si lze vytvořit pomocí korelace mezi jízdní dobou vlaku a jeho parametry. Z tabulek z předchozí kapitoly lze odhadnout, do jaké míry bude který parametr ovlivňovat jízdní dobu vlaku. Vzhledem k existenci velice silné korelace mezi maximální rychlostí vlaku a jízdní dobou, lze předpokládat, že právě tento parametr je rozhodujícím faktorem. Další experimenty, s tzv. referenčními vlaky tuto hypotézu potvrdily. Ve 2 ze 4 případů při snížení maximální rychlosti na 50 % původní hodnoty narostla jízdní doba na více než 180 %. Těchto výsledků bylo dosaženo u referenčních vlaků, které reprezentují výkonná elektrická HV. U HV s nižším výkonem a motorovým pohonem není zvýšení jízdní doby až tak dramatické. Při snížení maximální rychlosti na 50 % bylo dosaženo cca 131 % jízdní doby. U RV reprezentujícího elektrické jednotky bylo zvýšení jízdní doby rovno cca 173 % při snížení maximální rychlosti na polovinu. Tím se tento RV blíží prvním 2.

V potaz je také třeba vzít sklon trati, který hraje velice významnou roli, zejména v experimentech, kde bylo snižováno procento využití výkonu HV. Zatímco při klesání není tento výkon prakticky využíván, při stoupání se jedná o velmi významný parametr, který jízdní dobu v některých případech ovlivňuje více než omezení maximální rychlosti. Při klesání dosáhla jízdní doba hodnoty cca 113 % při použití pouze 30 % výkonu HV. Naproti tomu, u RV 363\_O\_BZH při stejném využití výkonu HV bylo dosaženo cca 252 % jízdní doby. U RV 754\_O\_BZH bylo dokonce zjištěno, že při snížení výkonu HV na 30 % není tento vlak schopen svah vystoupat a v určitém okamžiku začne dokonce couvat. Při snížení % využití výkonu HV na 40 % bylo dosaženo cca 327 % jízdní doby, což je o cca 4 % více, než při snížení maximální rychlosti na 20 %. Naopak u elektrických jednotek neovlivňuje snížení výkonu HV jízdní dobu až do takové míry. Při snížení výkonu na 50 % bylo dosaženo zvýšení jízdní doby pouze o cca 25 %.

Již výše bylo uvedeno, že snižování či zvyšování počtu vozů je v praxi velice problematické a často nepoužitelné, stejně jako snižování či zvyšování množství nákladu či pasažérů. Těmto parametrům tedy není v rámci této práce věnována větší pozornost. Pro úplnost je zde pouze uveden stručný přehled, který podává výsledky korelací. Nejvyšší hodnota korelačního koeficientu v absolutní hodnotě byla rovna cca 41 %. Tato hodnota sice ukazuje na existenci korelace mezi hmotností nákladu a jízdní dobou, ale samotná hodnota představuje pouze slabou korelaci. Tento výsledek pouze zdůrazňuje nepoužitelnost těchto parametrů pro ovlivnění jízdní doby.

## 9.2 Stanovení rovnic trendu závislosti jízdní doby na daném parametru

Cílem této práce je zjištění, do jaké míry a jakým způsobem ovlivňují parametry vlaku jeho jízdní dobu. Tuto závislost lze nejlépe zaznamenat pomocí matematického vztahu. Bylo zjištěno, že nejvhodnějším reprezentantem je polynom určitého stupně. Určení tohoto polynomu proběhlo automaticky v rámci aplikace MS Excel. Tato aplikace disponuje nástrojem pro tvorbu spojnice trendu v rámci grafu. Po získání výsledků simulačních experimentů byly tyto výsledky zpracovány do grafů. Právě z těchto grafů byly následně vytvořeny dané rovnice popisující trend. Kromě těchto rovnic byla stanovena i hodnota spolehlivosti. Cílem bylo, aby se tato hodnota co nejvíce blížila jedné. Koeficienty polynomů pro jednotlivé RV jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 32: Koeficienty polynomu pro RV 363\_O\_HZB

	% využití výkonu HV	% maximální rychlosti
$x^6$	0	0
$x^5$	-0,0000000150240384638387	-0,000000494222127966383
$x^4$	0,00000598238822104892	0,000176393638024189
$x^3$	-0,000957677560424773	-0,0249859713156241
$x^2$	0,0780513081207059	1,78662803446532
$x^1$	-3,36240141126647	-67,4748985191633
$x^0$	165,405433018678	1269,85804739293

Tabulka 33: Koeficienty polynomu pro RV 363\_O\_BZH

	% využití výkonu HV	% maximální rychlosti
$x^6$	0,0000000408099842777628	0
$x^5$	-0,0000173665765092011	-0,000000453190879008865
$x^4$	0,00303154187395803	0,000163793405185176
$x^3$	-0,277826388258644	-0,0234414939178951
$x^2$	14,1123337909575	1,69033523644938
$x^1$	-378,35143736249	-64,2511942403567
$x^0$	4339,80691767312	1215,64110114048

Tabulka 34: Koefficienty polynomu pro RV 754\_O\_BZH

	% využití výkonu HV	% maximální rychlosti
$x^6$	0,000000123113946145365	0
$x^5$	-0,0000557655988738248	-0,000000280448717953925
$x^4$	0,0104300933181085	0,000100755069640442
$x^3$	-1,03124981245889	-0,0145751481523158
$x^2$	56,8834896336207	1,08659921672588
$x^1$	-1662,85733167746	-43,1437851795222
$x^0$	20333,360072934	852,446169406731

Tabulka 35: Koefficienty polynomu pro RV 471\_O\_BZH

	% využití výkonu HV	% maximální rychlosti
$x^6$	0	0
$x^5$	0	-0,000000478295563371891
$x^4$	0	0,000170547156857928
$x^3$	-0,000221551615742555	-0,024021982513022
$x^2$	0,0596736182213495	1,704446604591
$x^1$	-5,58347254405443	-63,8576862147933
$x^0$	282,984390436692	1191,39419087843

### 9.3 Stanovení parametrů vlaku podle jízdní doby

Po získání rovnic trendu závislosti jízdní doby na daném parametru bylo následně možné analyticky stanovit hodnoty daných parametrů vlaků pro dosažení určité jízdní doby. Cílem bylo najít řešení polynomiální rovnice. Vzhledem k relativně vysokému stupni polynomu, který byl v určitých případech roven až 6, byl pro výpočet použit nástroj Wolfram Alpha, který je dostupný online na webové adrese <http://www.wolframalpha.com>. V následujících 4 tabulkách jsou uvedeny hodnoty parametrů výkonu HV a maximální rychlosti vlaku stanovené podle procenta jízdní doby.

Tabulka 36: Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 363\_O\_HZB

<b>Parametr</b>	<b>% jízdní doby</b>	<b>% parametru</b>
<b>% využití výkonu HV</b>	105	51,91392164
	110	35,94072334
	120	22,31351306
<b>% maximální rychlosti</b>	125	75,90524283
	150	63,26984577
	200	46,61483933
	300	30,94836651
	400	23,31040911

Tabulka 37: Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 363\_O\_BZH

<b>Parametr</b>	<b>% jízdní doby</b>	<b>% parametru</b>
<b>% využití výkonu HV</b>	125	56,5614172
	150	41,1155581
	200	33,5561936
<b>% maximální rychlosti</b>	125	73,54055749
	150	61,15898839
	200	44,80397646
	300	29,82060752
	400	22,38645695

Tabulka 38: Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 754\_O\_BZH

Parametr	% jízdní doby	% parametru
% využití výkonu HV	125	72,830897
	150	58,5995598
	200	47,02973089
	300	40,98272762
% maximální rychlosti	125	53,49324699
	150	43,24218516
	200	32,48384244
	300	21,69632257

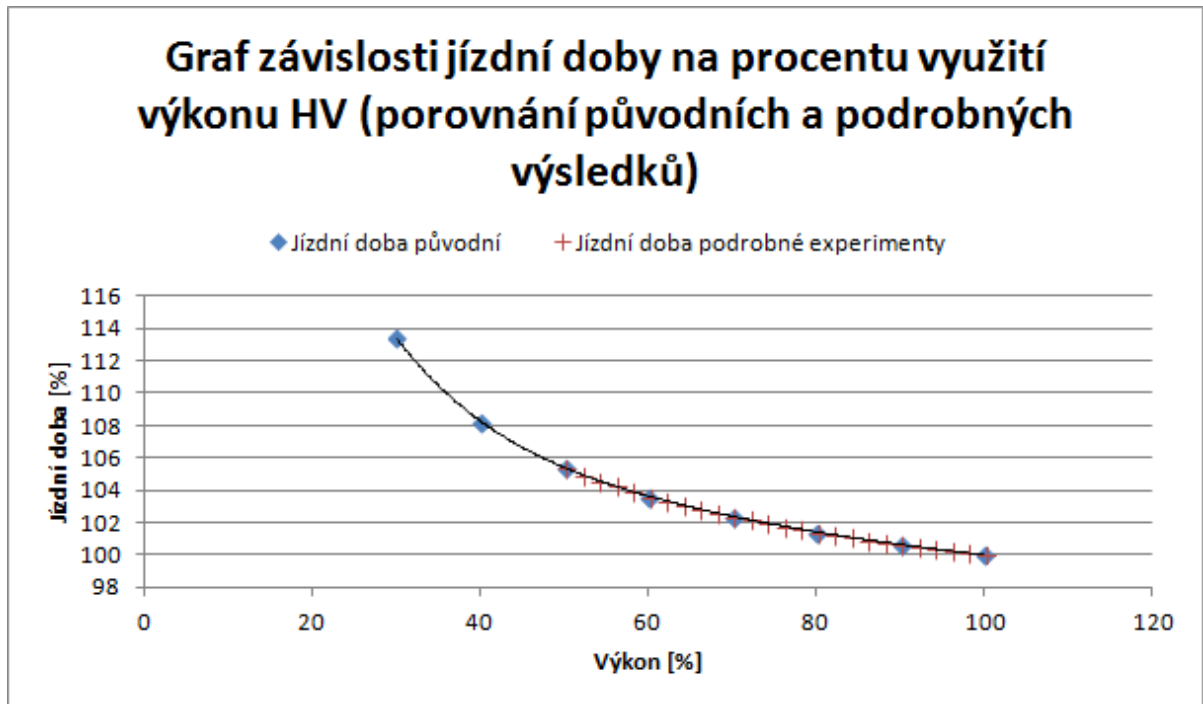
Tabulka 39: Hodnoty parametrů vlaku stanovené podle jízdní doby pro RV 471\_O\_BZH

Parametr	% jízdní doby	% parametru
% využití výkonu HV	110	67,23279836
	125	50,23661493
	150	35,52877488
% maximální rychlosti	125	69,7606622
	150	58,19539854
	200	42,97156062
	300	28,80459936
	400	21,60480627

## 9.4 Potvrzení správnosti rovnice trendu

Pro potvrzení této správnosti bylo zapotřebí provést ještě jednu sérii simulačních experimentů podle dříve zmíněných scénářů. Jednalo se o 25 scénářů pro RV 363\_O\_HZB, kde byl postupně snižován výkon HV po 2 % až na hodnotu 50 %. Výsledky těchto experimentů udává následující graf. Kromě získaných hodnot je v něm zobrazena i spojnice trendu a původní hodnoty z předchozích simulací.





Obrázek 61: Porovnání podrobných výsledků sim. experimentů s původními hodnotami

Jak je z grafu patrné, hodnoty velice přesně kopírují spojnici trendu. Z toho lze usuzovat, že daná rovnice byla stanovena správně. Lze očekávat, že i ostatní rovnice byly stanoveny taktéž správně a tudíž je možné je použít pro určení daných parametrů vlaků pro dosažení zvolené jízdní doby.

## 9.5 Kombinace parametrů

Na závěr práce bylo zjištěno, jakým způsobem je jízdní doba ovlivněna, pokud se změní více parametrů vlaku najednou. Měněny byly pouze parametry využití výkonu HV a maximální rychlost. Pro každý referenční vlak byla provedena série simulačních experimentů, jejichž výsledky byly následně analyzovány pomocí nástroje Matlab. Jednalo se o tzv. multiregresní analýzu, přičemž jejím cílem bylo získání vhodného polynomu, který aproximuje daná data. Vzhledem k tomu, že se jednalo o vícerozměrná data, nebyl vytvářen polynom vyššího, než třetího stupně. Nízký stupeň polynomu byl zvolen ze dvou důvodů. Prvním je složitost polynomu, která výrazně stoupá s narůstajícím stupněm. Druhý důvod byla dostatečná přesnost, již při použití polynomu třetího stupně. Chyba nabývala v nejhorším případě hodnoty v řádu  $10^{-10}$ . Definice polynomu pro 2 proměnné následuje níže.

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} x^i y^j \quad (28)$$

Polynom třetího stupně je takový polynom, u něhož exponenty proměnných  $x$  a  $y$  nabývají maximálně hodnoty 3. Z tohoto vztahu je patrné, že polynom třetího stupně

2 proměnných disponuje 16 koeficienty, které je nutné stanovit. Právě pro stanovení těchto koeficientů byl použit nástroj Matlab.

Nejprve byly zadány hodnoty proměnných  $x$ ,  $y$  a  $z$  jako vektory.

————— Vytvoření vektorů —————

```
>> x=[30;30;30;30;50;50;50;50;75;75;75;75];
>> y=[75;50;25;100;75;50;25;100;75;50;25;100];
z=[163.302904564315;178.024896265556;346.041493775932;
163.302904564315;126.489626556017;174.871369294605;
344.713692946058;125.311203319502;118.058091286307;
173.609958506223;344.215767634854;106.755186721992];
```

Následně byla vytvořena matice  $X$  podle následujícího předpisu.

————— Vytvoření matice  $X$  —————

```
>> X = [ones(size(z)),
x,x.^2,x.^3,
x.*y,x.*y.^2,x.*y.^3,
x.^2.*y,x.^2.*y.^2,x.^2.*y.^3,
x.^3.*y,x.^3.*y.^2,x.^3.*y.^3,
y,y.^2,y.^3];
```

Na závěr byl realizován samotný výpočet pomocí maticových operací. Do proměnné  $a$  byl uložen vektor představující koeficienty daného polynomu, vektor  $Z$  udával hodnoty, které byly získány pomocí vytvořeného polynomu a proměnná  $maxErr$  obsahovala maximální odchylku v absolutní hodnotě od očekávané hodnoty.

————— Výpočet koeficientů polynomu a chyby —————

```
>> a = X\z;
>> Z = X*a;
>> maxErr = max(abs(Z-z))

maxErr =

    9.2655e-012
```

Získané koeficienty jsou uvedeny v následujících tabulkách. Parametr  $x$  představuje procento využití výkonu HV a parametr  $y$  maximální rychlost vlaku.

Tabulka 40: Hodnoty koeficientů  $x$  a  $y$  pro RV 363\_O\_HZB

<b>Hodnota koeficientu</b>	<b>Parametry <math>x</math> a <math>y</math></b>
0,000000000000000000000000	$x^0y^0$
50,672147331158200000000000	$x^1y^0$
-1,041400689905720000000000	$x^2y^0$
0,006696532316631480000000	$x^3y^0$
-1,380766839143280000000000	$x^1y^1$
0,015446949891071000000000	$x^1y^2$
-0,0000589898329702413000	$x^1y^3$
0,028069824195118000000000	$x^2y^1$
-0,0003103787218592380000	$x^2y^2$
0,0000011592979908018300	$x^2y^3$
-0,0001793969377875280000	$x^3y^1$
0,0000019689905591876900	$x^3y^2$
-0,0000000072553861050641	$x^3y^3$
0,000000000000000000000000	$x^0y^1$
0,000000000000000000000000	$x^0y^2$
0,000000000000000000000000	$x^0y^3$

Tabulka 41: Hodnoty koeficientů x a y pro RV 363\_O\_BZH

<b>Hodnota koeficientu</b>	<b>Parametry x a y</b>
0,000000000000000000000000	$x^0y^0$
67,05795181314010000000000	$x^1y^0$
-1,60179662070429000000000	$x^2y^0$
0,01116652763465640000000	$x^3y^0$
-1,19787864413796000000000	$x^1y^1$
0,01057781703387320000000	$x^1y^2$
-0,0000280187338818192000	$x^1y^3$
0,02204936163406910000000	$x^2y^1$
-0,00014632457159053000000	$x^2y^2$
0,0000001464560649758030	$x^2y^3$
-0,00012824472541630800000	$x^3y^1$
0,0000005943547551669930	$x^3y^2$
0,0000000010389198757640	$x^3y^3$
0,00000000000000000000000	$x^0y^1$
0,00000000000000000000000	$x^0y^2$
0,00000000000000000000000	$x^0y^3$

Tabulka 42: Hodnoty koeficientů x a y pro RV 754\_O\_BZH

Hodnota koeficientu	Parametry x a y
0,000000000000000000000000	$x^0y^0$
0,000000000000000000000000	$x^1y^0$
0,8880604874933730000000	$x^2y^0$
-0,0123741288445001000000	$x^3y^0$
2,7726665976768700000000	$x^1y^1$
-0,0644287413826817000000	$x^1y^2$
0,0033205650001827700000	$x^1y^3$
-0,1312612167800080000000	$x^2y^1$
0,0029054435324773000000	$x^2y^2$
-0,0000693380994819974000	$x^2y^3$
0,0013485901893122800000	$x^3y^1$
-0,0000296368169539423000	$x^3y^2$
0,0000004751477176733270	$x^3y^3$
0,0000000000000000000000	$x^0y^1$
0,0000000000000000000000	$x^0y^2$
-0,0530603548193490000000	$x^0y^3$

Tabulka 43: Hodnoty koeficientů  $x$  a  $y$  pro RV 471\_O\_BZH

Hodnota koeficientu	Parametry $x$ a $y$
0,000000000000000000000000	$x^0y^0$
60,465965882896200000000000	$x^1y^0$
-1,412334409097920000000000	$x^2y^0$
0,009742492700169240000000	$x^3y^0$
-2,201203503918910000000000	$x^1y^1$
0,032038771784232500000000	$x^1y^2$
-0,000147432512678650000000	$x^1y^3$
0,056668269863225800000000	$x^2y^1$
-0,000881789580451818000000	$x^2y^2$
0,0000042324585830642100	$x^2y^3$
-0,000409098878131253000000	$x^3y^1$
0,0000065481235592437900	$x^3y^2$
-0,0000000320127862302116	$x^3y^3$
0,000000000000000000000000	$x^0y^1$
0,000000000000000000000000	$x^0y^2$
0,000000000000000000000000	$x^0y^3$

Z tabulek je patrné, že koeficient u exponentů obou proměnných rovných 0 je nulový. Nejvíce jízdní dobu ovlivňuje první mocnina procenta využití výkonu HV. Ostatní členy polynomu nabývají mnohem menších hodnot. Proto jejich vliv na výslednou jízdní dobu není stěžejní. Výjimku tvoří referenční vlak 754\_O\_BZH. U tohoto vlaku nabývají všechny koeficienty nízkých hodnot. U ostatních RV navíc platí, že koeficienty u samotných mocnin proměnné  $y$  jsou nulové. Z toho lze odvodit, že samotná maximální rychlost ovlivňuje, v případě kombinace parametrů, jízdní dobu velice málo.

# Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést sérii simulačních experimentů pomocí simulačního nástroje MesoRail a výsledky těchto experimentů následně analyzovat. Cílem analýzy bylo stanovení, do jaké míry a jakým způsobem ovlivňují parametry vlaku jeho jízdní dobu.

V teoretické části byly nejprve popsány metody vytváření vstupů do simulátorů. V rámci této části byly popsány nástroje pro zkoumání souboru vstupních dat, jako je histogram, regresní model a klouzavý průměr. Následně byla popsána problematika statistických testů, které se používají pro ověření, jestli daná statistická veličina má dané rozdělení pravděpodobnosti. Kromě těchto základních metod byly uvedeny i 2 specializované nástroje pro analýzu statistických dat. Detailně byl popsán nástroj Input Analyzer. Následně byla popsána problematika generátorů pseudonáhodných čísel včetně popisu jednoho zástupce a to konkrétně lineárního kongruentního generátoru. Na závěr se tato kapitola zabývá definicí a popisem simulačních scénářů.

Následující kapitola se zabývá možnostmi analýzy výstupů ze simulátorů. Simulace zde byly rozděleny podle podmínek ukončení na simulace s ukončením a bez ukončení. Byl zde popsán pojem replikace a možnosti určení nutného počtu replikací. Ten souvisí s výpočtem statistických ukazatelů, které byly také uvedeny včetně matematických vztahů.

Poté byly popsány hnací vozidla a vozy, které byly použity v rámci simulačních experimentů. Kromě základního popisu a technických parametrů byla uvedena také stručná historie vývoje každého hnacího vozidla. Dále u každého hnacího vozidla byla uvedena trakční charakteristika pomocí grafu.

Vzhledem k tomu, že trakční charakteristika hnacího vozidla představuje velice významný parametr, který ovlivňuje chování vlaku na trati, byla této problematice vyhrazena vlastní kapitola. Byly uvedeny parametry, které trakční charakteristiku ovlivňují včetně hodnot součinitelů, které byly stanoveny empiricky. Byl představen pojem úplná trakční charakteristika, která zahrnuje grafickou a informační část. Dále byly uvedeny typy trakčních charakteristik v závislosti na hnacím vozidle.

Na závěr teoretické části byl stručně popsán použitý simulátor. Dále následoval popis dynamiky jízdy vlaku. Zde byly uvedeny a popsány parametry, které tuto dynamiku ovlivňují. Jedná se zejména o vozidlové a traťové odpory. Dále o hmotnost vlaku a jeho maximální rychlost. Na závěr byla představena problematika tachogramů, jejichž sada je také jedním z výstupů této práce.

V praktické části byly nejprve uvedeny změny ve zdrojovém kódu simulátoru. Důvodem těchto změn byla nutnost zaznamenávat jízdní doby vlaků po jejich opuštění simulátoru. Dále byly uvedeny a popsána parametry vlaků, které byly základním předmětem zkoumání této práce.

Dále byla popsána tvorba hnacích vozidel a vlaků pomocí nástroje, který je součástí simulátoru. Byla zde uvedena tabulka hodnot trakčních charakteristik hnacích vozidel. Následně bylo provedeno zjištění nutného počtu replikací. Bylo zjištěno, že pro ustálené výsledky postačí pouze jedna replikace. Dále byly uvedeny a popsány simulační scénáře. Kromě základních typů scénářů byly vytvořeny tzv. referenční vlaky, které zastupují skupiny vlaků s podobným chováním. Pro tyto vlaky byly následně vytvořeny další scénáře, jejichž provedením bylo zjištěno, jak dané parametry ovlivňují jízdní dobu.

V rámci analýzy výsledků byla nejprve zjištěna míra korelace mezi jednotlivými

parametry a jízdní dobou. Na základě této korelace byly stanoveny parametry, se kterými bylo dále experimentováno. Jedná se o využití výkonu hnacího vozidla a maximální rychlost. Poté byly provedeny simulační experimenty s referenčními vlaky. Výstupem těchto experimentů byly zejména grafy závislosti jízdní doby na daném parametru. V rámci těchto grafů byly také uvedeny rovnice spojnice trendu. Tyto rovnice byly následně použity pro stanovení použitého procenta parametru vlaku, pomocí kterého by mělo být dosaženo daného zvýšení jízdní doby vlaku. Jak již bylo uvedeno, jedním z výstupů této práce je sada tachogramů. Ta byla vytvořena pomocí simulátoru a jednotlivé tachogramy byly zobrazeny v této části.

Provedení Analýzy výsledků by bylo možné do jisté míry zautomatizovat. Bylo by např. možné implementovat regresní výpočty do samotného simulátoru. Problém ovšem nastává zejména ve složitosti těchto výpočtů, neboť se jedná o nelineární regresi. Zautomatizování analýzy jízdních dob tedy může být motivací k vytvoření práce, která na tuto bude navazovat.

Závěrečná kapitola se zabývá vyhodnocením simulačních experimentů. Nejprve byly shrnuty výsledky experimentů. Následně byly uvedeny tabulky, které zaznamenávají hodnoty koeficientů rovnic, které popisují závislost jízdní doby na daném parametru. Pro potvrzení správnosti těchto rovnic byl následně vytvořen graf, který porovnává trend s podrobnými výsledky dodatečných simulačních experimentů. Bylo zjištěno, že výsledky těchto experimentů se s daným trendem shodují, proto byly získané rovnice prohlášeny za správné. Na závěr bylo provedeno zhodnocení výsledků experimentů, v rámci kterých byly měněny oba zkoumané parametry zároveň. Výsledky byly zpracovány pomocí nástroje Matlab. Cílem této analýzy bylo vytvoření polynomů 2 proměnných, které popisují závislost jízdní doby na daných dvou parametrech a to na procentu využití výkonu hnacího vozidla a maximální rychlosti vlaku. Pomocí zkoumání maximální odchylky vypočítaných hodnot od naměřených hodnot bylo zjištěno, že pro správnou aproximaci dat postačuje použití polynomu třetího stupně. Veškeré výsledky byly uvedeny v přehledných tabulkách v této závěrečné kapitole.

Tato práce může být chápána jako návod, jak provádět simulační experimenty a jak následně analyzovat výsledky těchto experimentů, za účelem stanovení závislostí mezi parametry vlaků a jejich jízdními dobami. Jednou z možností, jak lze tuto práci rozšířit může být použití více typů hnacích vozidel a vozů. Výsledky této práce jsou aplikovatelné pouze pro infrastrukturu, která reprezentuje železniční stanici Zdice. Při použití jiné infrastruktury lze očekávat, že výsledky se budou lišit, ať už z důvodu jiných traťových sklonů nebo rychlostních omezení na trati.

Na úplný závěr je vhodné zhodnotit použitelnost této diplomové práce v praxi. Vzhledem k tomu, že reálné provedení všech těchto simulačních experimentů by bylo časově i finančně velice náročné, je více než vhodné použití simulace. Zejména doména železniční dopravy poskytuje rozsáhlou oblast působnosti pro simulace, ať už se jedná o simulace jízdy vlaku za účelem získání závislosti jízdní doby na daných parametrech nebo např. o simulace, jejichž cílem je tvorba nového prototypu lokomotivy. Proto lze očekávat, že tato práce může v praxi uplatnění nalézt, například, jak již bylo naznačeno výše, jako podklad pro rozsáhlejší studii.



# Literatura

- [1] KAVIČKA, Antonín. *Přednášky z předmětu Modelování a simulace*. Pardubice, 2013.
- [2] KUPKA, Karel. *Statistické řízení jakosti: interaktivní analýza a interpretace dat pro řízení jakosti a ekonomiku*. Pardubice: TriloByte, c1997. ISBN 80-238-1818-X.
- [3] BANKS, Jerry (ed.). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York: John Wiley, c1998. Wiley-Interscience publication. ISBN 04-711-3403-1.
- [4] *Nebojte se p - hodnot!* [online]. STATSOFT. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014\\_06\\_26\\_StatSoft\\_Nebojte\\_se\\_p-hodnot.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_06_26_StatSoft_Nebojte_se_p-hodnot.pdf)
- [5] KOHOUT, Václav. Kritické hodnoty pro Kolmogor - Smirnov jednovýběrový. In: *Kritické hodnoty a tabulky rozdělení!* [online]. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: [http://www.kmt.zcu.cz/person/Kohout/info\\_soubory/letniseem/ruzne/KSjednovyber.pdf](http://www.kmt.zcu.cz/person/Kohout/info_soubory/letniseem/ruzne/KSjednovyber.pdf)
- [6] *Statistika: Tabulky* [online]. Praha, 2006 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://statistika.vse.cz/download/materialy/tabulky.pdf>. Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, Katedra statistiky a pravděpodobnosti.
- [7] WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* [online]. 1967, **15**(2), 70-73 [cit. 2016-02-22]. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901. ISSN 0018-9278. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1161901>
- [8] DIVIŠ, Roman a Antonín KAVIČKA. Train movement dynamics within anylogic tool. In: *26th European Modeling and Simulation Symposium*. Dime University of Genoa, 2014, s.~307-312. ISBN 9788897999324.
- [9] DIVIŠ, Roman a Antonín KAVIČKA. Design and development of a mesoscopic simulator specialized in investigating capacities of railway nodes. In: *27th European Modeling and Simulation Symposium*. Dime University of Genoa, 2015, s.~52-57. ISBN 9788897999485.
- [10] KAVIČKA, Antonín. *Přednášky z předmětu Pokročilé techniky modelování a simulace*. Pardubice, 2015.
- [11] ŠVESTKA, David. *Atlas lokomotiv: Lokomotivy, jednotky, motorové vozy* [online]. 2004 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/>
- [12] ŠIROKÝ, Jaromír. Přehled parametrů vybraných vozidel nezávislé vozby. *Informační systémy v dopravě* [online]. Ostrava Poruba, 2007 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/vozidla\\_t.htm](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/vozidla_t.htm)

- [13] ŠIROKÝ, Jaromír. Přehled parametrů vybraných vozidel závislé vozby. *Informační systémy v dopravě* [online]. Ostrava Poruba, 2007 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/vozidla\\_e.htm](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/vozidla_e.htm)
- [14] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě: Kolejová vozidla*. Ostrava, 2003. Dostupné také z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr\\_MvD.pdf](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr_MvD.pdf)
- [15] KAVIČKA, Antonín, Valent KLIMA a Norbert ADAMKO. *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2005. ISBN 80-807-0477-5.
- [16] ŠVESTKA, David. 363 | ES 499.1. *Atlas Lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-363.html>
- [17] ŠVESTKA, David. 471. *Atlas Lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-471.html>
- [18] ŠVESTKA, David. 742 | T 466.2. *Atlas Lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-742.html>
- [19] ŠVESTKA, David. 754 | T 478.4. *Atlas Lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-754.html>
- [20] ZLINSKÝ, Zbyněk. Přípojné vozy na našich kolejích: řada 054.2. *VLAKY.NET* [online]. 2007 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/001897-Pripojne-vozy-na-nasich-kolejich-rada-0542/>
- [21] ZLINSKÝ, Zbyněk. V Pars nova se představil prototyp vozu řady Bdmpee ČD. *VLAKY.NET* [online]. 2013 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/4825-V-Pars-nova-se-predstavil-prototyp-vozu-rady-Bdmpee-CD/>
- [22] ŠVESTKA, David. Značení hnacích vozidel: Značení podvozků. *Atlas Lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-znaceni.html>
- [23] TANEL, Franco. *Železnice: od parních lokomotiv k vysokorychlostním vlakům*. Praha: Slovart, 2008. ISBN 978-80-7209-945-0.
- [24] Eas: Vysokostěnný čtyřnápravový vůz. *Parostroj: moravskoslezský železniční občasník* [online]. 2007 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.parostroj.net/katalog/nv/formular.php3?ind=133>
- [25] Eas 51,54. *ČD Cargo: Cokoliv Kamkoliv* [online]. 2014 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <https://www.cdcargo.cz/eas-51-54>
- [26] KOVAŘÍK, Martin. *Antropometrický výzkum dospělé populace a jeho aplikace v oblasti interiéru a architektury*. Brno, 2011.
- [27] ŠIROKÝ, Jaromír. Stanovení parametrů jízdy vlaku. *Informační systémy v dopravě* [online]. Ostrava Poruba [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/mvd\\_tach\\_sylab.htm](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/mvd_tach_sylab.htm)

- [28] Eisenbahn Schraubenkupplung 1.jpeg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20394>