

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Implementace systémů automatického vedení vlaku a jejich vliv na kapacitu
železničních tratí

Disertační práce

Doktorand

Ing. Erik Tischer

Studijní program

P3710 Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor

3708V024 Technologie a management v dopravě a telekomunikacích

Školitel

doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.

Školitel specialista

doc. Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.

Školící pracoviště

Katedra technologie a řízení dopravy

Prohlašuji:

Práci s názvem **Implementace systémů automatického vedení vlaku a jejich vliv na kapacitu železničních tratí** jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30. 8. 2024

Ing. Erik Tischer v. r.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval své nejbližší rodině za podporu, kterou mi poskytovala po celou dobu zpracovávání této disertační práce. Speciální poděkování patří mojí ženě Janě, která mi byla vždy oporou.

Dále bych chtěl poděkovat mému školiteli doc. Ing. Jaromírovi Širokému, Ph.D. a školiteli specialistovi doc. Ing. Petrovi Nachtigallovi Ph.D. za vynikající spolupráci při zpracování této disertační práce. Oběma děkuji za ochotu, trpělivost a schopnost pomoci a poradit i ve složitých situacích, které se při zpracování této práce vyskytly.

Anotace

Disertační práce je zaměřena na vliv implementace systémů automatického vedení vlaku na kapacitu tratí. V teoretické části práce jsou analyzovány systémy automatické kontroly jízdy vlaku se zaměřením na systém ETCS a jeho aplikace. V praktické části práce je provedena simulace jednotlivých úrovní systému ETCS. Pro tuto simulaci je využit tříúrovňový simulační model, pomocí kterého je vyhodnocen efekt zavádění těchto systémů na kapacitu tratí.

Klíčová slova

Simulace, kapacita, automatické vedení vlaku, OpenTrack

Title

Implementation of automatic train control systems and their influence on the capacity of railway lines

Annotation

The dissertation focuses on the impact of the implementation of automatic train control systems on the capacity of lines. The theoretical part of the thesis analyses automatic train control systems with a focus on ETCS and its applications. In the practical part of the thesis the simulation of the different levels of the ETCS system is performed. For this simulation a three-level simulation model is used to evaluate the effect of the introduction of these systems on the capacity of the railway lines.

Keywords

Simulation, capacity, automatic train control, OpenTrack

OBSAH

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek.....	9
Seznam zkratk	11
Úvod	13
1 Analýza současného stavu vývoje systémů automatické kontroly jízdy vlaku.....	15
1.1 Současný vývoj v oblasti vlakových zabezpečovačů	17
1.2 Současný vývoj v oblasti komplexních systémů ATC	20
1.3 Porovnání systémů ETCS a CBTC	35
2 Současný stav v oblasti využívaných simulačních nástrojů	39
2.1 Vývoj a použití simulačních nástrojů	39
2.2 Typy a využitelnost simulačních nástrojů	41
2.3 Zhodnocení a výběr vhodných simulačních nástrojů	51
3 Analýza současného stavu vědeckého poznání.....	53
3.1 Analýza předpisů a norem vztahujících se ke kapacitě tratí	53
3.2 Analýza stavu současného vědeckého poznání ve světě	60
3.3 Analýza stavu současného poznání v podmínkách České a Slovenské republiky	64
3.4 Závěry a shrnutí současného stavu vědeckého poznání.....	67
4 Definice cíle disertační práce.....	69
5 Zvolené metody zkoumání a způsob řešení	70
5.1 Dekompozice systému	70
5.2 Modelování dopravního systému.....	73
5.3 Počítačová simulace.....	75
5.4 Statistická analýza.....	78
6 Vlastní řešení a návrh obecného simulačního modelu.....	81
6.1 Vlastní výzkum v oblasti systémů ATC	81
6.2 Formulace modelu – tříúrovňový simulační model.....	85
6.3 Podmínky pro sestavení simulačního modelu	88
6.4 Modelování brzdných křivek	91

6.5	Sestava simulačního modelu.....	98
6.6	Simulace – tříúrovňový simulační model	103
6.7	Vyhodnocení simulace a stanovení závěrů.....	113
7	Simulační model provozu ETCS L2 na reálné infrastruktuře.....	127
7.1	Popis vybrané části tratě	128
7.2	Sestava simulačního modelu reálné trati	132
7.3	Provádění měření v terénu	137
7.4	Porovnání výsledků a vyhodnocení	137
8	Určení přínosů práce pro vědu i praxi	146
	Závěr	148
	Použité informační zdroje	150
	Vlastní publikační vědecko výzkumná činnost doktoranda.....	163
	Seznam příloh	165

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní struktura systému ATC	15
Obrázek 2 Schématické znázornění vazeb v systému ERTMS.....	21
Obrázek 3 Schéma aplikační úrovně ETCS L1	24
Obrázek 4 Schéma aplikační úrovně ETCS L2.....	25
Obrázek 5 Schéma aplikační úrovně ETCS L3	26
Obrázek 6 Schéma systému zjišťování integrity vlaku	26
Obrázek 7 Funkční struktura systému CBTC	29
Obrázek 8 Model bezpečného rozestupu vlaků.....	30
Obrázek 9 Porovnání fixních a pohyblivých prostorových oddílů	36
Obrázek 10 Základní funkcionality jednotlivých systémů podle typu.....	38
Obrázek 11 Vývojový diagram výběru vhodného simulačního nástroje	40
Obrázek 12 Plán obsazení dopravních kolejí sestavený v SW Viriato	42
Obrázek 13 Simulační nástroj Villon	45
Obrázek 14 Vstupní a výstupní data simulačního nástroje OpenTrack	47
Obrázek 15 Kapacitní bilance dle UIC 406	54
Obrázek 16 Srovnání základních vlastností metod pro určování kapacity	57
Obrázek 17 Topologická dekompozice systému ATC.....	71
Obrázek 18 Fáze přípravy modelu	73
Obrázek 19 Vývojový diagram průběh a vyhodnocení výsledků simulace	77
Obrázek 20 Tříúrovňový simulační model.....	88
Obrázek 21 Vyjádření konfidenčního intervalu	93
Obrázek 22 Příklad modelu brzdných křivek v nástroji EraTool.....	93
Obrázek 23 Infrastrukturní část porovnávacího simulačního modelu.....	94
Obrázek 24 Dráha potřebná k zastavení – porovnání	95
Obrázek 25 Doba potřebná k zastavení – porovnání.....	95
Obrázek 26 Porovnání jednotlivých brzdných křivek	96
Obrázek 27 Upravený model bezpečného rozestupu vlaků	98
Obrázek 28 Příklad vytvořené dopravní sítě v SW OpenTrack	99
Obrázek 29 Typizovaná zhlaví pro variantu S	106
Obrázek 30 Výřez stanice A – varianta (K)	109
Obrázek 31 Graf celkových průměrných hodnot následných mezidobí	114
Obrázek 32 Graf závislosti délky prostorového oddílu (ETCS L2) na následném mezidobí	114

Obrázek 33 Graf procentuálního vyjádření zlepšení hodnot následného mezidobí.....	115
Obrázek 34 Graf celkových průměrných výsledků pro jednotlivé varianty zhlaví.....	117
Obrázek 35 Graf procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí.....	118
Obrázek 36 Graf celkových průměrných výsledků pro jednotlivé skupiny.....	118
Obrázek 37 Graf procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí.....	119
Obrázek 38 Příklad zobrazení simulace zpoždění ve splněném jízdním řádu	121
Obrázek 39 Graf srovnání průměrných přírůstků zpoždění	123
Obrázek 40 Graf srovnání přírůstků zpoždění dle SŽDC SM 124	125
Obrázek 41 Statický rychlostní profil – trať 326	128
Obrázek 42 Model odbočky Svitava	129
Obrázek 43 Trakční charakteristika jednotky ř. 530	134
Obrázek 44 Průběh brzděné křivky jednotky MORAVIA.....	135
Obrázek 45 Dráhový tachograf jízdy vlaku Odb. Svitava – ŽST Adamov.....	143
Obrázek 45 Dráhový tachograf jízdy vlaku ŽST Adamov – Odb. Svitava.....	144

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Funkce systému v jednotlivých stupních automatizace	16
Tabulka 2 Přehled bodových systémů ATP	18
Tabulka 3 Přehled liniových systémů ATP	19
Tabulka 4 Rychlost přenosu dat v jednotlivých standardech datové komunikace.....	37
Tabulka 5 Porovnání systémů podle úrovně automatizace	37
Tabulka 6 Doporučené hodnoty využití kapacity dle kodexu UIC 406.....	55
Tabulka 7 Funkce systému v jednotlivých stupních automatizace	56
Tabulka 8 Srovnání výsledků simulace systémů ATC2, ETCS L2 a ETCS HL3	62
Tabulka 9 Brzdné parametry použitých vlakových souprav – bez ETCS.....	91
Tabulka 10 Brzdné parametry použitých vlakových souprav – ETCS ideální podmínky	94
Tabulka 11 Hodnoty bezpečnostní vzdálenosti pro plovoucí oddíl	98
Tabulka 12 Parametry použitých vlakových souprav	101
Tabulka 13 Skupiny simulovaného pořadí vlaku	104
Tabulka 14 Průměrné hodnoty následných mezidobí – referenční varianta (T)	104
Tabulka 15 Průměrné hodnoty následných mezidobí – přechodová varianta (T).....	105
Tabulka 16 Průměrné hodnoty následných mezidobí– cílová varianta (T).....	105
Tabulka 17 Přehled simulovaných variant staničních zhlaví	106
Tabulka 18 Průměrné hodnoty následných mezidobí – referenční varianta (S)	107
Tabulka 19 Průměrné hodnoty následných mezidobí – přechodová varianta (S).....	108
Tabulka 20 Průměrné hodnoty následných mezidobí – cílová varianta (S).....	108
Tabulka 21 Testovací hodnoty vstupního zpoždění – Delay Scenario	111
Tabulka 22 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – referenční varianta (K).....	111
Tabulka 23 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – přechodová varianta (K)	112
Tabulka 24 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – cílová varianta (K).....	112
Tabulka 25 Celkové parametry pro vyhodnocení simulace zpoždění.....	122
Tabulka 26 Hodnoty průměrného přírůstku zpoždění podle kategorie	124
Tabulka 27 Přehled parametrů kolejí stanice Adamov	130
Tabulka 28 Přehled parametrů kolejí stanice Blansko	131
Tabulka 29 Přehled parametrů kolejí stanice Rájec-Jestřebí.....	132
Tabulka 30 Jízdní řád směr Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí.....	135
Tabulka 31 Jízdní řád směr Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava.....	136
Tabulka 32 Jízdní doby Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí.....	136

Tabulka 33 Simulace jízdního řádu Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí	138
Tabulka 34 Simulace jízdního řádu Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava	139
Tabulka 35 Porovnání jízdních dob Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí (obousměrně).....	140
Tabulka 36 Porovnání simulace a skutečné jízdy Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí.....	141
Tabulka 37 Porovnání simulace a skutečné jízdy Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava.....	141
Tabulka 38 Porovnání simulace a skutečných jízdních dob (obousměrně)	142
Tabulka 39 Celkové shrnutí nejvýznamnějších výsledků dosažených simulací.....	148

SEZNAM ZKRATEK

ATC	Automatická kontrola jízdy vlaku	Automatic Train Control
ATO	Automatické vedení vlaku	Automatic Train Operation
ATP	Vlakový zabezpečovač	Automatic Train Protection
ATS	Automatický provoz vlaku	Automatic Train Supervision
BSS	Mobilní subsystém CBTC	On-board subsystem
BWP	Brzdící procenta	Brake Weight Percentage
CBTC	Zabezpečení jízd vlaků založené na komunikaci	Communication Based Train Control
CSM	Metodika pro hodnocení a posuzování rizik	Common Safety Method
CTCS	Čínský vlakový zabezpečovač	China Train Control System
ČR	Česká republika	Czech Republic
DB	Německá dráha	Deutsche Bahn
DI	Dopravní infrastruktura	Transport Infrastructure
DKS	Dvojitá kolejová spojka	Double Switch Point
DMI	Rozhraní strojvedoucí-hnací vozidlo	Driver Machine Interface
DSP	Dynamický rychlostní profil	Dynamic Speed Profile
EBD	Zpomalení nouzové brzdy	Emergency Brake Deceleration
EBD	Nouzová brzdná křivka	Emergency brake deceleration
EBI	Zásah nouzové brzdy	Emergency Brake Intervention
EDD	Elektronický dopravní deník	Electronic Train Register
EoA	Konec oprávnění k jízdě	End of Authority
EOR	Evropské provozní předpisy	European Operation Rules
ERA	Evropskou železniční agenturou	European Railway Agency
ERTMS	Evropský systém řízení železniční dopravy	European Rail Traffic Management System
ETCS	Evropský vlakový zabezpečovač	European Train Control System
ETML	Evropský standard provozního řízení	European Traffic Management Layer
FRMCS	Budoucí železniční komunikační systém	Future railway mobile communication system
GIS	Grafický informační systém	Geographic information system

GSM-R	Komunikační systém GSM.R	Global System for Mobile Communications – Railway
GTN	Graficko-technologická nástavba ZZ	Graphic Technology Overlay
I	křivka I (indikace)	Indication
JOP	Jednotné obslužné pracoviště	Unified Control Place
LS	Omezený dohled	Limited Supervision
LTE	Vysokorychlostní přenos dat	Long Term Evolution
MA	Oprávnění k jízdě	Movement Authority
MB	Pohyblivý prostorový oddíl	Moving Blocks
MRSP	Nejvíce omezující rychlostní profil	Most Restrictive Speed Profile
NGTC	Zabezpečení jízd vlaků nové generace	Next Generation Train Control
ÖBB	Rakouské spolkové dráhy	Österreichische Bundesbahnen
P	Křivka P (dovolená)	Permitted
PN	Přivolávací návěst	In-Coming Signal Aspect
PTC	Pozitivní řízení vlaků	Positive Train Control
RBC	Radiobloková centrála	Radio Block Centre
RTC	Řízení železničního provozu	Rail Traffic Controller
SBD	Zpomalení provozní brzdy	Service Brake Deceleration
SBD	Provozní brzdná křivka	Service brake deceleration
SBI	Zásah provozní brzdy	Service Brake Intervention
SSP	Statický rychlostní profil	Static Speed Profile
STM	Specifický přenosový modul	Specific Transmission Module
SW	Software	Software
SZZ	Staniční zabezpečovací zařízení	Station Interlocking
TJŘ	Tabelární jízdní řád	Tabular Timetable
TNŽ	Technická norma železnic	Railway Technical Standard
TPC	Propočet výkonu vlaku	Train Performance Calculator
TSI	Technické specifikace pro interoperabilitu	Technical Specifications for Interoperability
TSS	Traťový subsystém CBTC	Trackside subsystem
TTP	Tabulky traťových poměrů	Track Parameters Table
UIC	Mezinárodní železniční unie	International Union of Railways
ZZ	Zabezpečovací zařízení	Railway Interlocking

ÚVOD

Analýza a zhodnocení vlivu implementace systémů automatického vedení vlaku na kapacitu železničních tratí je jedním z klíčových výzkumných úkolů v oblasti výzkumu kapacity železniční infrastruktury. Zavádění automatizovaných systémů kontroly jízdy vlaku je trendem v celém železničním sektoru. Zabezpečení tratí těmito systémy znamená pro manažery infrastruktury i dopravce nemalé investice. Vzhledem k tomu, že tyto systémy přímo ovlivňují jízdu vlaku a jeho chování na trati, mají také vliv na kapacitu tratí. Z pohledu manažera infrastruktury je kapacita jedním z důležitých ukazatelů, který určuje velikost nabídky vlakových tras jednotlivým dopravcům v požadované kvalitě. Uskutečněné vlakové trasy přináší pro manažera infrastruktury tržby v podobě poplatků za užití dopravní cesty. Automatizované systémy kontroly jízdy vlaku a systémy automatického vedení vlaku bezesporu přinášejí zvýšení úrovně bezpečnosti jízdy vlaku a mohou také pomoci optimalizovat provozní náklady ve formě spotřebované trakční energie, případně náklady na pořízení a údržbu jednotlivých komponent železničního dopravního systému. Vliv zavádění těchto systémů na kapacitu tratí však není, doposud vzniklými vědeckými pracemi, uspokojivě popsán a komplexně vyhodnocen.

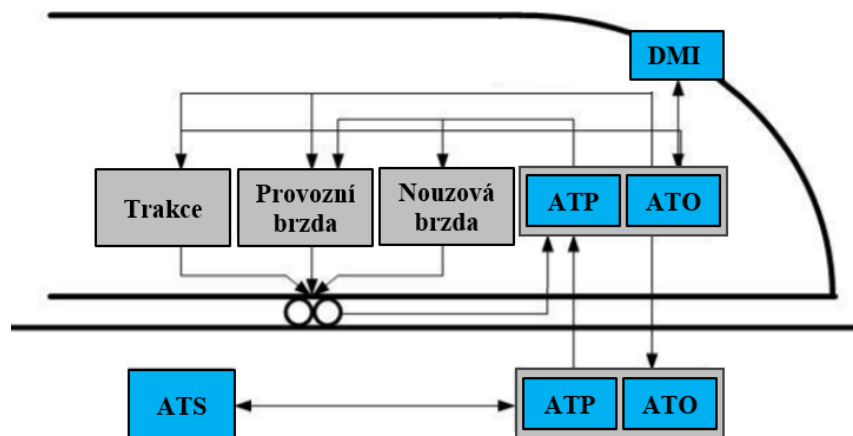
V této disertační práci je uveden přehled používaných systémů automatizované kontroly jízdy vlaku, systémů automatického vedení vlaku a používaných analytických a simulačních metod pro určování kapacity tratí. Součástí teoretické části disertační práce je také rozsáhlý přehled simulačních nástrojů, které jsou ve světě používány. Dále je proveden výběr vhodného simulačního nástroje pro potřeby této práce. Součástí disertační práce je také podrobná analýza současného stavu vědeckého poznání v oblasti zjišťování kapacity železničních tratí. Pomocí této analýzy bylo možné zjistit, jakými vědeckými metodami postupovali jiní autoři při zkoumání obdobných výzkumných zadání. Na základě provedené analýzy všech stěžejních oblastí jsou stanoveny zásady pro aplikovanou část disertační práce.

Hlavní součástí aplikované části práce je sestava obecného tříúrovňového simulačního modelu pro provoz vlaků v různých režimech automatické kontroly jízdy vlaků. Simulační model je rozdělen do několika úrovní tak, aby mohly být simulovány jednotlivé provozní scénáře, které vycházejí z funkční dekompozice železničního dopravního systému. Výstupy simulačního modelu jsou v disertační práci důkladně zanalyzovány a popsány. Na základě této analýzy jsou stanoveny konkrétní závěry, které stanovují vliv systémů automatické kontroly jízdy vlaku na kapacitu železničních tratí. Konkrétní závěry jsou dále logicky zobecněny, pro možnost uplatnění v další vědecko-výzkumné činnosti. Pro potvrzení dosažených výsledků

je práce ještě doplněna o případovou studii, kde je provedeno ověření správnosti simulačního modelu na reálném úseku železniční trati. V závěru je provedeno zhodnocení přínosů práce pro vědu i praxi.

1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VÝVOJE SYSTÉMŮ AUTOMATICKÉ KONTROLY JÍZDY VLAKU

Cílem této kapitoly je zanalyzovat současný stav problematiky implementace systémů vlakových zabezpečovačů a automatického vedení vlaku a jejich vliv na železniční provoz. Historicky bylo úkolem automatizačních systémů dohlížet na bezpečnou jízdu vlaku a kontrolovat reakce strojvedoucího na dávané návěsti. Automatizační systémy se od sebe navzájem odlišují především možností aktivního zásahu do jízdy vlaku. Postupným vývojem vznikla potřeba komplexní automatizace jízdy vlaku. Zcela automatický provoz vlaků byl zahájen nejprve na segregovaných tratích metra, kde není jízda vlaku tolik ovlivňována vnějšími vlivy. Historicky první automatizovaná linka metra byla uvedena do provozu v roce 1983 ve francouzském městě Lille (1). Všechny tyto systémy, bez ohledu na to, zda plní pouze funkci vlakových zabezpečovačů nebo přímo automatizují jízdu vlaků, jsou označovány jako systémy automatické kontroly jízdy vlaku – *Automatic Train Control* (ATC). Systémy ATC se dělí na tři hlavní subsystémy. Prvním a nejdůležitějším subsystémem je vlakový zabezpečovač – *Automatic Train Protection* (ATP). Subsystém ATP je vždy funkčně nadřazen ostatním subsystémům, protože je vždy nositelem bezpečné informace o možnosti jízdy a také je jeho prostřednictvím možné vlaku vydat tzv. oprávnění k jízdě – *Movement Authority* (MA), které je uděleno až po splnění všech podmínek pro bezpečnou jízdu vlaku. Na základě zabezpečení podmínek jízdy vlaku systémem ATP je možné, pomocí různých úrovní druhého subsystému ATO – *Automatic Train Operation* (ATO), automatizovat jízdu vlaku. Třetím subsystémem systému ATC je subsystém automatického dohledu (monitorování) vlaků – *Automatic Train Supervision* (ATS). Úkolem subsystému ATS je automatická kontrola a koordinace všech vlaků na vybrané části sítě. Jeho uplatnění je v současnosti především u městských drah (2). Struktura systému ATC je schematicky znázorněna v diagramu na obrázku 1.



Obrázek 1 Základní struktura systému ATC

Zdroj: (3) s úpravou autora

V závislosti na vyspělosti systémů ATC a jeho subsystémů lze rozlišovat jednotlivé stupně automatizace – *Grade of automation* (GoA). V jednotlivých stupních GoA je potom částečně nebo úplně nahrazována činnost strojvedoucího. Přehled funkcí v jednotlivých stupních automatizace je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1 Funkce systému v jednotlivých stupních automatizace

Základní funkce provozu vlaku		GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Bezpečný pohyb vlaků	Jízdní cesta	X	S	S	S	S
	Bezpečný rozestup vlaků	X	S	S	S	S
	Bezpečná rychlost	X	S (X)	S	S	S
Řízení vlaku	Zrychlování a brzdění	X	X	S	S	S
Dohled nad vodící dráhou	Zabránění střetu s překážkami	X	X	X	S	S
	Zabránění střetu s osobami	X	X	X	S	S
Provozování vlaku	Uvádění vlaku do provozu a odstavování	X	X	X	X	S
	Dohled nad stavem vlaku	X	X	X	X	S
Detekce nouzových situací	Požár, nehoda, vykolejení atd.	X	X	X	X	S
Vysvětlivky: X – zajišťováno strojvedoucím nebo dopravním zaměstnancem provozovatele dráhy S – zajišťováno automaticky systémem S (X) – zajišťováno systémem pouze částečně						

Zdroj: (4 s. 7-9; 5) s úpravou autora

Rozdělení jednotlivých stupňů automatizace a znalost principu funkcí jednotlivých subsystémů je klíčová pro správné sestavení modelu a pro přesnost prováděných simulací. V podkapitolách 1.1 a 1.2 jsou popsány nejprve systémy vlakových zabezpečovačů a následně systémy automatického vedení (provozu) vlaků. Je provedena jejich kategorizace a dále jsou rozvedeny systémy, jejichž použití je z hlediska interoperability, dostupných informací, praktického významu a možnosti simulace vhodné pro další výzkum v rámci této disertační práce.

1.1 Současný vývoj v oblasti vlakových zabezpečovačů

Nejdůležitější funkcí systémů ATP je kontrola dodržování stanovených podmínek bezpečné jízdy vlaku. Mezi tyto podmínky patří zejména kontrola rychlosti, přenos následujícího návěstního znaku, kontrola bdělosti strojvedoucího a nouzové zabrzdění, v případě nesplnění požadovaných podmínek. Systém ATP je vždy nadřazen systému ATO a tak, pokud by došlo ze strany systému ATO k nedodržení podmínek stanovených systémem ATP, dojde k zásahu systému ATP do jízdy vlaku. V praxi jsou však systémy ATO navrhovány tak, aby k těmto situacím vůbec nedocházelo. Pro správnou činnost systému ATP je nezbytné získávání informací o vlaku, zejména pak o jeho rychlosti a o stavu trati před vlakem.

Každý systém ATP se skládá ze dvou hlavních částí. Z traťové části, která je umístěna přímo na trati a zajišťuje předávání relevantních informací do mobilní části systému. Technická realizace traťové (první) a mobilní (druhé) části systému ATP se často liší podle jejich výrobce a oblasti, kde je systém nasazen. Společným znakem a nejdůležitějším úkolem všech těchto systémů je kontrola rychlosti, respektive provozního stavu vlaku. Tato kontrola se děje buď spojitě nebo v diskrétních bodech. Ve stanoveném úseku však vlak nesmí nikdy překročit nejvíce omezující rychlostní profil generovaný zařízením ATP nebo další podmínky stanovené specifickými podmínkami systému (6 s. 120-123). V případě spojitě kontroly rychlosti je pro každý úsek trati stanovena rychlost, kterou vlak nesmí překročit. V případě překročení této rychlosti, dojde k samočinnému zásahu systému ATP. Při diskrétní kontrole rychlosti je vždy trať rozdělena na pevné prostorové oddíly. Pokud má vlak při vstupu do dalšího oddílu rychlost vyšší, než jaká je pro tento oddíl stanovena, dojde k zásahu systému ATP do jízdy vlaku (7 s. 90-98).

Bodové systémy ATP

Bodové systémy ATP kontrolují bdělost strojvedoucího a podle typu kontrolují nebo nekontrolují rychlost vlaku. Přenos dat zde probíhá pouze v diskrétních bodech v trase vlaku, což má za následek, že k aktualizaci dat dojde teprve v okamžiku, kdy vlak dojde k následujícímu referenčnímu bodu. Bodové systémy ATP lze, podle schopnosti přenosu dat, rozdělit do tří základních skupin. Nízkokapacitní bodové vlakové zabezpečovače bez kontroly rychlosti vlaku (kategorie 1), nízkokapacitní vlakové zabezpečovače s kontrolou rychlosti (kategorie 2) a vysokokapacitní vlakové zabezpečovače s bodovým přenosem a dynamickou kontrolou rychlosti (kategorie 3). V tabulce 2 je uveden základní přehled bodových systémů ATP využívaných ve světě.

Tabulka 2 Přehled bodových systémů ATP

Systém	Stát	Kontrola rychlosti	Prostředky přenosu dat	Možnost implementace ATO	Kategorie
Mechanická VZZ	Velká Británie, Německo	ne	mechanické	ne	1
Crocodile	Francie, Belgie	ne	elektrický kontakt	ne	1
AWS	Velká Británie	ne	magnety	ne	1
Signum	Švýcarsko	ne	indukční cívka	ne	1
Indusi/PZB 90	Německo, Rakousko	ano	rezonanční obvody	ne	2
ATS-P	Japonsko	ano	rezonanční obvody	ne	2
ASFA	Španělsko	ano	rezonanční obvody	ne	2
TPWS	Velká Británie	ano	rezonanční obvody	ne	2
ETCS L1	mezinárodní	ano	balízy	ne	3
KVB	Francie	ano	balízy	ne	3
Ebicab	Švédsko	ano	balízy	ne	3
ZUB	Německo	ano	balízy	ne	3
ZSL 90	Švýcarsko	ano	indukční smyčka	ne	3
SAUT	Švýcarsko	ano	indukční smyčka	ne	3

Zdroj: (7) s úpravou autora

Liniové systémy ATP

Liniové systémy ATP také pracují s kontrolou bdělosti strojvedoucího. V závislosti na úrovni automatizace systému se však liší ve schopnosti aktivně zasáhnout do jízdy vlaku. Přenos dat mezi vozidlovou a vlakovou částí systému probíhá u těchto systémů spojitě, v libovolném úseku na trati, která je pokryta kompletní výstrojí traťové části vlakového zabezpečovače. Podle objemu přenášených dat jsou to buď systémy nízkokapacitní (kategorie 1), nebo vysokokapacitní (kategorie 2) (8 s. 210-225). V tabulce 3 je uveden přehled liniových vlakových zabezpečovačů.

Tabulka 3 Přehled liniových systémů ATP

System	Stát	Kontrola rychlosti	Prostředky přenosu dat	Možnost implementace ATO	Kategorie
ALSN	Ruská federace	ano	kolejové obvody	ne	1
LS	Česká republika, Slovenská republika	ano	kolejové obvody	ne	1
BACC	Itálie	ano	kolejové obvody	ne	1
ATC	Japonsko	ano	kolejové obvody	ne	1
TVM 300	Francie	ano	kolejové obvody	ne	1
Digital ATC	Japonsko	ano	kolejové obvody	ne	2
TVM 430	Francie, Velká Británie, Belgie	ano	kolejové obvody	ne	2
LZB	Německo	ano	kolejové obvody	ne	2
CBTC	mezinárodní	ano	radiomajáky	ano	2
ATACS	Japonsko	ano	radiomajáky	ano	2
ETCS L2	mezinárodní	ano	balízy, GSM – R	ano	2
ETCS L3	mezinárodní	ano	balízy, GSM – R	ano	2

Zdroj: (7) s úpravou autora

Na základě analýzy funkcí a možností dalšího rozvoje těchto systémů se autor rozhodl, že v disertační práci bude dále zkoumán vliv systémů, které umožňují implementaci ATO a které jsou zároveň v současné době nejvíce zastoupeny na trhu moderních zabezpečovacích systémů. U těchto systémů zároveň existuje předpoklad, že softwarové nástroje umožňují simulaci jejich provozu pomocí již vyvinutých modulů, a to bez nutnosti komplikované modifikace jinak vytvořených modelů. Autor se proto, na základě rozšířenosti těchto systémů ve světě, rozhodl v této práci pracovat zejména se systémem *European Rail Traffic Management System* (ERTMS) na úrovni *European Train Control System* (ETCS) L2 a L3. K dalším rozšířeným systémům ATC patří také systém *Communication Based Train Control* (CBTC), u kterého je však podstatně nižší úroveň standardizace, proto se autor rozhodl s tímto systémem dále pracovat pouze v teoretické rovině.

1.2 Současný vývoj v oblasti komplexních systémů ATC

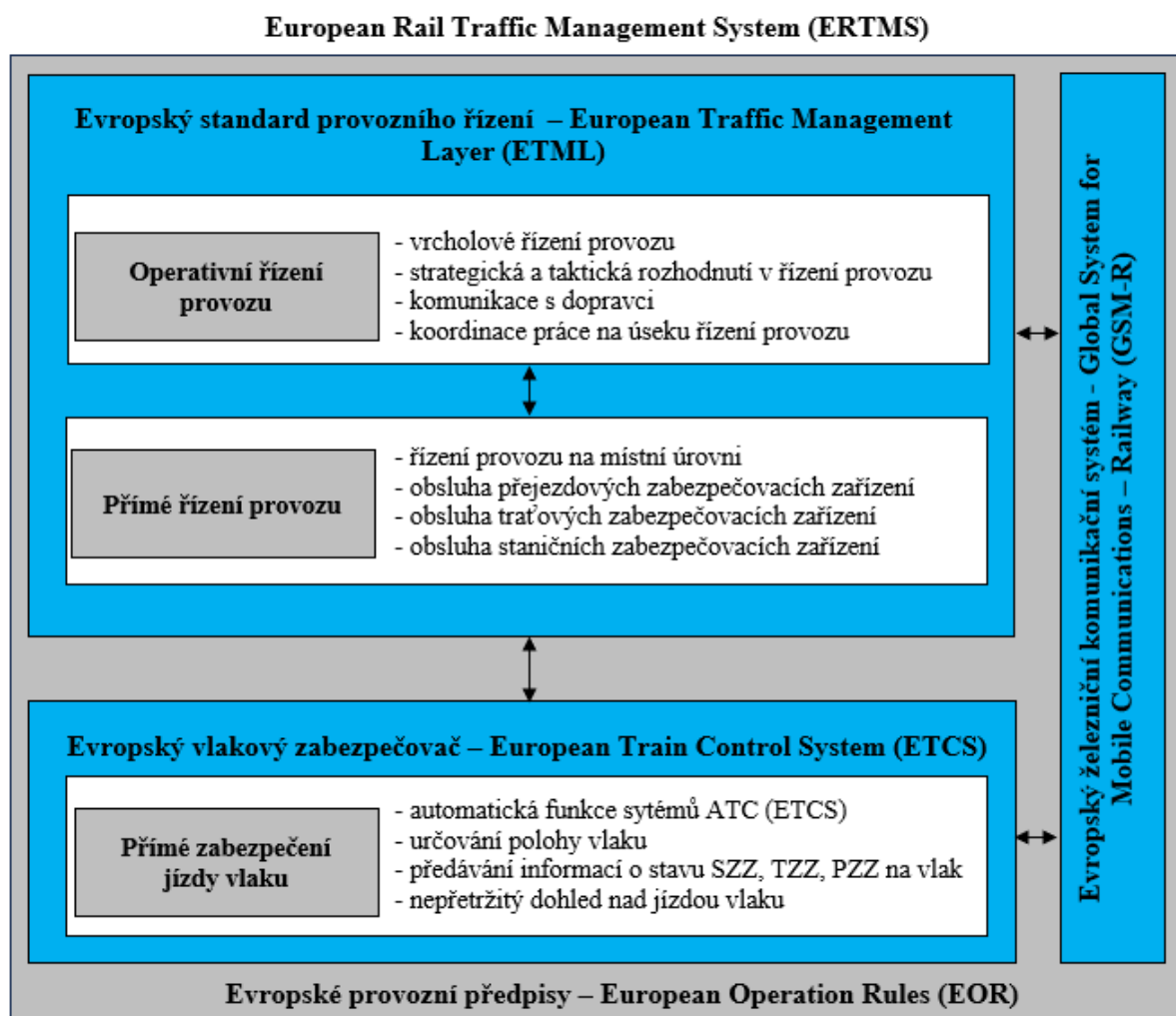
Systémy ATC prošly za poslední dvě dekády dynamickým rozvojem. V současné době jsou dominantně zastoupeny dva typy systémů, které jsou nasazovány na tratích po celém světě. Prvním z těchto systémů je Evropský systém řízení železniční dopravy ERTMS. Jedná se o systém, který je jedním z nástrojů pro sjednocení evropského železničního prostoru a jeho stěžejní vlastností je interoperabilita. Druhým z těchto systémů je systém CBTC. Tento systém byl vyvinut především pro městské a příměstské systémy kolejové dopravy. Jednotlivé aplikace systému CBTC se liší podle výrobce a místa nasazení. V budoucnu se předpokládá vzájemná fúze obou těchto systémů, čímž bude definován nový standard v oblasti systémů ATC. Pro potřeby této disertační práce se systém, který vznikne fúzí výše zmíněných systémů, nazývá *Next Generation Train Control* (NGTC).

Systém ERTMS

Evropský systém řízení železniční dopravy ERTMS je systém, který je jedním z nástrojů pro sjednocení evropského železničního prostoru. Systém ERTMS má, zejména na hlavních tratích, nahradit stávající národní vlakové zabezpečovače, které se historicky vyvíjely rozdílně a nejsou vzájemně kompatibilní. Má být také standardem pro vysokorychlostní tratě budované v Evropě. Mimo území Evropské unie je tento systém užíván například v Číně, Mexiku a Turecku (7). V podmínkách České republiky je zavádění tohoto systému realizováno manažerem infrastruktury podle národního implementačního plánu (9). Systém ERTMS je tvořen těmito subsystemy:

- komunikační systém *Global System for Mobile Communications – Railway* (GSM-R),
- Evropský vlakový zabezpečovač – *European Train Control System* (ETCS),
- Evropské provozní předpisy – *European Operation Rules* (EOR),
- Evropský standard provozního řízení – *European Traffic Management Layer* (ETML).

Schematické znázornění jednotlivých vazeb v systému je uvedena na obrázku 2. Jednotlivé subsystemy ERTMS a jednotlivé aplikační úrovně ETCS jsou charakterizovány v následujících podkapitolách.



Obrázek 2 Schematické znázornění vazeb v systému ERTMS

Zdroj: (10) s úpravou autora

Komunikační systém GSM-R

Jedná se o obdobu komunikační sítě GSM, která je však modifikovaná pro využití na železnici. V rámci systému ERTMS plní dvě základní funkce, a to funkci komunikační a funkci datovou (10). Mezi funkce systému GSM-R patří především:

- komunikace mezi provozními pracovníky a vlakem,
- komunikace mezi dispečerským centrem a strojvedoucím (případně dalším vlakovým personálem),
- nouzová komunikace mezi jednotlivými zaměstnanci zúčastněnými na železničním provozu,
- telefonní spojení pro provozní zaměstnance ve stanicích a na trati,
- přenos dat pro činnost systémů ETCS v aplikačních úrovních L2 a L3,
- krátké textové zprávy,

- data pro řízení a kontrolu činnosti bezpečnostně důležitých pevných objektů na trati,
- data pro řízení informačních systémů pro cestující na trati a ve stanicích.

V systému GSM-R je každému vlaku v síti přiřazené jedinečné identifikační číslo, kterým je vlak zaregistrován do sítě. Podle zvoleného funkčního čísla je potom systémově specifikováno, v jaké funkční skupině je vlak zaregistrován. Z hlediska radiodispečerského spojení umožňuje systém funkci adresného volání na vybraný vlak a skupinového volání vlakům v určité oblasti sítě. Důležitou funkcí je zejména služba nouzových volání, kam patří adresný a generální STOP. Všechny tyto nouzové funkce mají prioritu nad ostatními hovory v síti GSM-R. Z hlediska datové komunikace lze systémem zasílat SMS zprávy a také data pro systém ETCS. V aplikačních úrovních ETCS L2 a L3 jsou pomocí GSM-R předávány zprávy mezi radioblokovou centrálou – *Radio Block Centre* (RBC) a vlakovou částí ETCS (10).

Evropský vlakový zabezpečovač – ETCS

Jednotný evropský vlakový zabezpečovač ETCS je dalším subsystémem ETRMS. Systém ETCS využívá pro komunikaci vysokokapacitní prvky přenosu dat mezi traťovou a mobilní částí systému. Těmito prostředky jsou eurosmyčky (nově se již nezřizují), balízy a radiová telekomunikační síť GSM-R. Existují tři základní aplikační úrovně systému pro využití na hlavních tratích. Pro tratě s nižší intenzitou dopravy existuje ještě aplikační úroveň ETCS L1 LC (STOP, LS), která je zjednodušenou verzí ETCS L1.

Traťová část systému ETCS předává vlaku data a oprávnění k jízdě. V aplikačních úrovních L1 a L2 jsou vstupní data získávána ze stávajícího staničního a traťového zabezpečovacího zařízení (ZZ). Mezi tato data patří zejména informace o postavení návěstidel (případně data vztažená k fiktivním bodům nahrazujícím tato návěstidla), volnosti tratě a o povolené maximální rychlosti. U aplikační úrovně L1 je informace předávána bodově pomocí balíz nebo eurosmyček. V aplikačních úrovních L2 a L3 jsou vlakům informace předávány pomocí sítě GSM-R. U aplikační úrovně ETCS L3 již nejsou data získávána ze stávajícího ZZ, ale přímo z RBC.

Mobilní část systému ETCS je umístěna přímo na vozidle. Mobilní část ETCS získává data z traťové části systému ETCS pomocí *Specific Transmission Module* (STM), který zprostředkovává informace z národního zabezpečovacího systému nebo přímo z prvků systému ERTMS. V mobilní části kontinuálně probíhá kalkulace dynamického rychlostního profilu,

dohled nad dodržováním rychlostního profilu, kontrola stavu vlaku a zprostředkovávání těchto informací ostatním subsystémům ETCS (10).

Aplikační úroveň ETCS

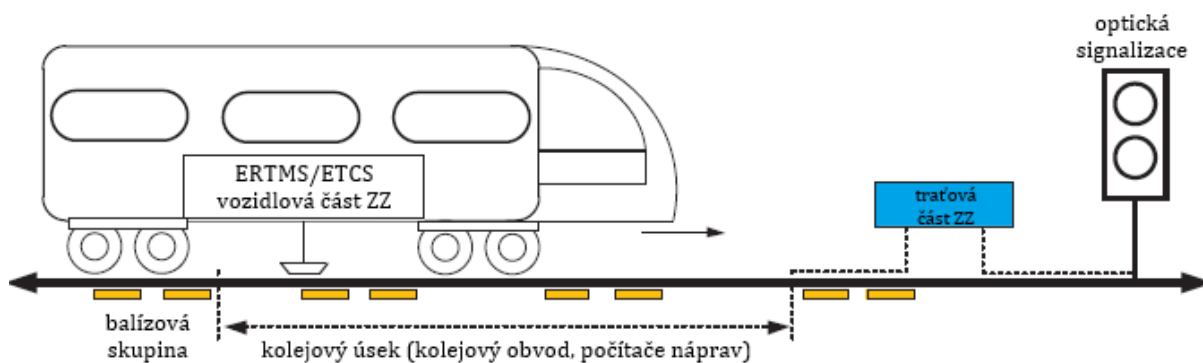
ETCS STOP — jedná se o nejjednodušší možnou verzi ETCS. Jde o bodový vlakový zabezpečovač, který zajišťuje zavedení nouzového brzdění vlaku v případě minutí návěsti zakazující jízdu. Traťovou část tvoří přepínatelné a nepřepínatelné balízy u všech hlavních návěstidel, případně před jinak vymezeným koncem oprávnění k jízdě (návěstidlem s návěstí konec vlakové cesty). Tato verze je určena především pro málo zatížené tratě a tratě se zjednodušeným řízením drážní dopravy (v podmínkách ČR na tratě s provozem dle předpisu SŽ D3). Teoreticky umožňuje provozování vlaků do maximální rychlosti $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

ETCS L1 LS — jedná se bodový vlakový zabezpečovač, který primárně zajišťuje neprojetí návěsti STÚJ. Zároveň omezeně dohlíží na nepřekročení aktuální dovolené rychlosti pro omezený počet rychlostních profilů. Traťovou část tvoří přepínatelné a nepřepínatelné balízy u všech hlavních návěstidel, případně před jinak vymezeným koncem oprávnění k jízdě, a také na místech rozhodných pro změnu parametrů dalšího pokračování jízdy vlaku. Tato aplikační úroveň je určena pro více zatížené vedlejší tratě. Omezený dohled – *Limited Supervision* (LS) je provozní režim v rámci úrovně ETCS (ETCS LS) a byl vyvinut jako nízkonákladová metoda implementace ETCS. Je navržen s ohledem na to, aby umožňoval nabídnout mnoho bezpečnostních funkcí dostupných v plném systému ETCS, ale s nižšími náklady, nižší složitostí systému a s potenciálně menšími nároky na bezpečnost (11). Hlavní potenciální výhody, které může přinést režim ETCS LS, jsou:

- zvýšení bezpečnosti v porovnání se stávajícími systémy zabezpečení tratí nižšího významu,
- využití funkcí vlaků vybavených mobilní částí systému ETCS,
- zachování potenciálu pro přechod na plný dohled ETCS,
- vybavení tratí bez ZZ systémem ATP,
- nahrazení starších systémů vlakového zabezpečovače na tratích za předpokladu, že na trati budou provozovány pouze vlaky ETCS.

Aplikační úroveň L1 vyžaduje zachování stávajícího ZZ a návěstních bodů. Tato signalizace je v aplikační úrovni ETCS L1 nadřazena signalizaci na stanovišti strojvedoucího. Poloha vlaku, volnost koleje a celistvost vlaku je zajišťována stávajícím ZZ. Pro předávání informací slouží proměnné nebo neproměnné balízy, případně eurosmyčky. Tyto prvky

se obvykle umísťujú na začátku a na konci príslušného traťového oddílu a u všetkých rozhodných návěstných bodů. U této aplikační úrovně se vyskytují všechny typické problémy bodových vlakových zabezpečovačů, zejména diskretní aktualizaci informace o změně vstupních proměnných. Výhodou jsou nižší náklady na vybudování systému a také jeho vzájemná kompatibilita s ostatními aplikačními úrovněmi. Schéma aplikační úrovně ETCS L1 je uvedeno na obrázku 3.



Obrázek 3 Schéma aplikační úrovně ETCS L1

Zdroj: (12) s úpravou autora

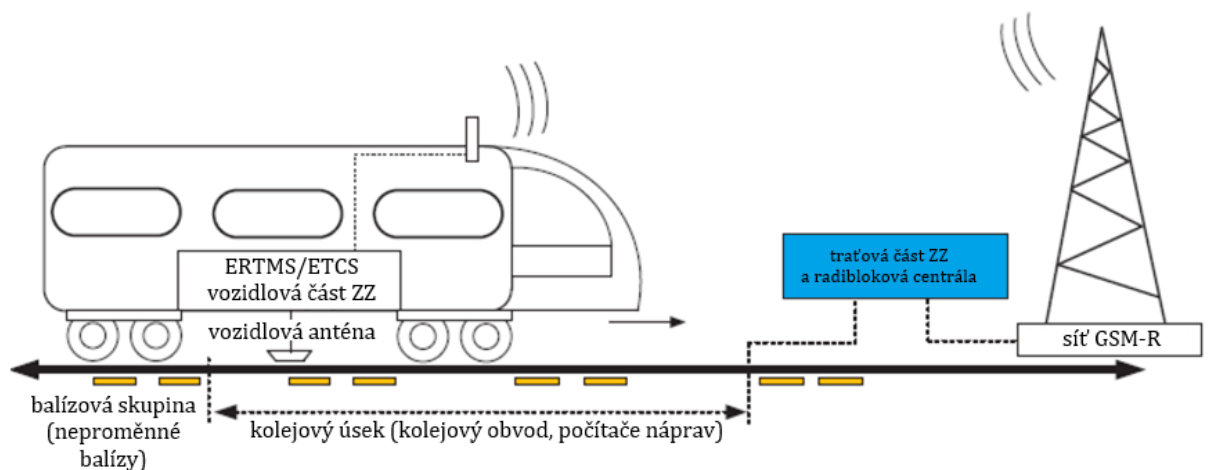
V aplikační úrovni L2 (obrázek 4) se pro výměnu dat mezi traťovou částí a mobilní částí systému ETCS používá komunikační síť GSM-R. Stávající ZZ kontroluje volnost koleje a postavení dotčených vnějších prvků ZZ. Ze stávajícího ZZ je následně předána informace do RBC, ze které jsou pomocí systému GSM-R předávána do vlaku potřebná data k udělení oprávnění k jízdě MA. U aplikační úrovně ETCS L2 je možný provoz vlaků bez fyzických návěstných bodů (světelných návěstidel). V případě, že všechna vozidla v řízené oblasti nejsou vedena v režimu ETCS, je nutné zachování světelné návěstní signalizace. Vybavení hlavních tratí v ČR systémem ETCS L2 je národním implementačním plánem ERTMS považováno za cílový stav zabezpečení hlavních tratí (10).

Dohled nad jízdou vlaku v režimu ETCS L2 spočívá ve vytvoření a udělení oprávnění k jízdě (MA), společně se statickým rychlostním profilem – *Static Speed Profile* (SSP), sklonovými poměry a dalšími případnými známými omezeními rychlosti. Ze stanovených rychlostních limitů, které mohou pro daný typ vlaku platit, vytváří palubní část zařízení ETCS nejvíce omezující rychlostní profil – *Most Restrictive Speed Profile* (MRSP). Na základě vypočteného MRSP, sklonových poměrů a dalších parametrů vlaku, vypočítá palubní část ZZ dynamický rychlostní profil – *Dynamic Speed Profile* (DSP). Podle stanoveného DSP pak ETCS dohlíží nad jízdou vozidla. Základním předpokladem správného fungování dohledu v režimu ETCS je přesný matematicko-fyzikální popis chování vlaku při jízdě a brzdění. Model brzdění je založen na hodnotě brzdícího procenta – *Brake Weight Percentage* (BWP)

a maximální rychlosti vlaku, kde tyto proměnné určují jeho brzdné vlastnosti. Nevýhodou tohoto modelu brzdění je, že pokud nejsou upřesněny další parametry, vede to k tomu, že příslušný konverzní model brzdění přidává záložní čas navíc, aby bylo zajištěno nepřekročení oprávnění k jízdě. Tento model navíc vychází z poměrně zastaralé metodiky a měření UIC, která již nemusí plně odpovídat vlastnostem moderních interoperabilních vozidel. Stanovený konverzní model vytváří bezpečné brzdné křivky, které nejsou pro provozní podmínky příliš praktické (nezohledňují adhezi, vlastnosti brzdného systému a lineární průběh náběhu brzdného výkonu).

Rozlišují se zejména tyto provozní brzdné křivky: zásah provozní brzdy – *Service Brake Intervention* (SBI), zpomalení provozní brzdy – *Service Brake Deceleration* (SBD) a tyto nouzové brzdné křivky: zásah nouzové brzdy – *Emergency Brake Intervention* (EBI), zpomalení nouzové brzdy – *Emergency Brake Deceleration* (EBD) (13).

Vzhledem k principu výpočtu brzdných křivek musí být vždy uvažováno s nepřesností určení polohy vlaků. Nepřesnost odometrie (zařízení pro přesné měření ujeté vzdálenosti) se počítá jako 5 m + 5 % vzdálenosti od posledního referenčního bodu s informací o poloze. Dalším parametrem je nepřesnost polohy balízy, národní hodnota je 12 m, v případě vzdálenosti balíz větší než 500 m je tato hodnota 30 m. Všechny tyto hodnoty bohužel vedou ke zkracování užitečné délky kolejí. Částečným řešením tohoto problému je instalace zpřesňujících balízových skupin, které zpřesní odhad polohy vozidla před místem zastavení, nebo před koncem oprávnění k jízdě – *End of Authority* (EoA) (13).

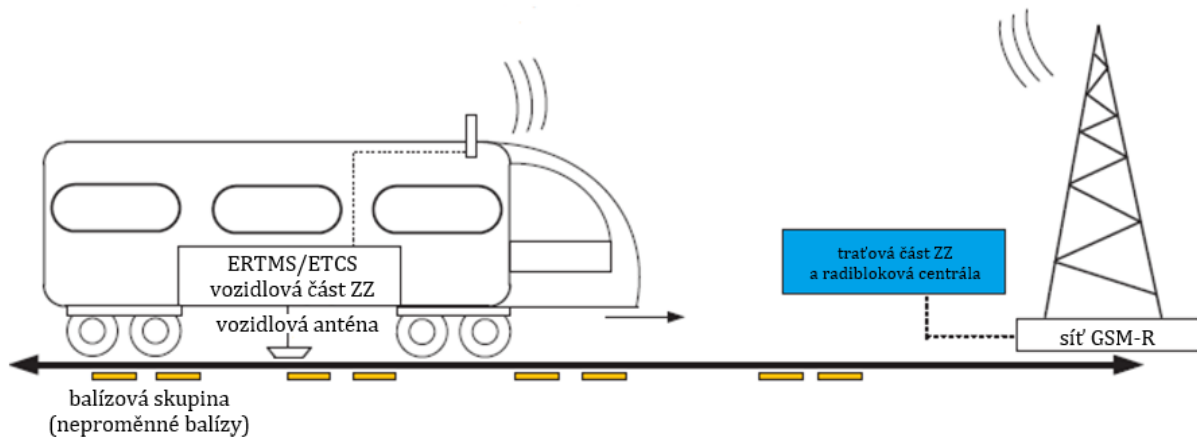


Obrázek 4 Schéma aplikační úrovně ETCS L2

Zdroj: (12) s úpravou autora

U aplikační úrovně L3 (obrázek 5) je systémem ETCS kontrolována i volnost koleje a RBC plně nahrazuje bezpečnostně-logické jádro stávajícího ZZ. Vlak nepřetržitě dává informace o svojí poloze v řízené oblasti komunikačním systémem GSM-R (případně některým

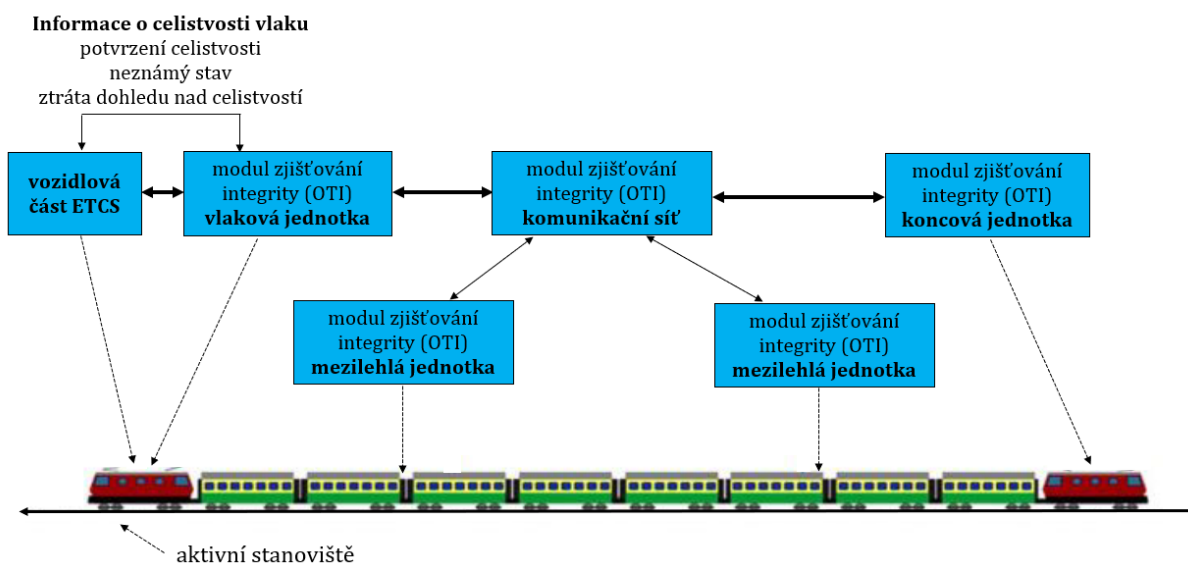
ze schválených systémů budoucí generace). Poloha vlaku je určena výpočtem podle rychlosti vlaku, ujeté vzdálenosti a definované polohy nepřepínatelných balíz. Kromě polohy jsou z mobilní části předávány do RBC i další klíčová data, jako jsou informace o celistvosti a aktuálním stavu vlaku. V této aplikační úrovni, již trať není rozdělena na pevné prostorové oddíly, ale vlaky se pohybují v tzv. pohyblivých prostorových oddílech. Takový provoz vyžaduje, aby všechny vlaky v řízené oblasti byly vybaveny ETCS L3. Provoz v pohyblivých prostorových oddílech otevírá možnosti pro další zvýšení kapacity tratí (10).



Obrázek 5 Schéma aplikační úrovně ETCS L3

Zdroj: (12) s úpravou autora

Jedním z kritických faktorů aplikační úrovně ETCS L3 je zjišťování integrity (celistvosti) vlaku. Při konvenčním způsobu provozu jsou pro zjišťování polohy vlaku a integrity vlaku používány kolejové obvody nebo počítače náprav. S využitím těchto prostředků je striktní rozdělení trati na pevné prostorové oddíly pro zjištění polohy vlaků. Schéma systému zjišťování integrity vlaku je uvedeno na obrázku 6.



Obrázek 6 Schéma systému zjišťování integrity vlaku

Zdroj: (14) s úpravou autora

V rámci evropského železničního prostoru je vyvíjen systém ETCS L3, který by tyto nevýhody eliminoval nahrazením konvenčních traťových zařízení dalšími systémy ZZ, umožňujícími provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Takový typ provozu umožňuje zvýšení kapacity trati, ale také dosažení značného snížení infrastrukturních nákladů. V této aplikační úrovni palubní moduly ETCS navíc zajišťují dohled nad bezpečnou jízdou vlaku tím, že nepřetržitě sledují integritu vlastního vlaku (14, 15).

Evropské provozní předpisy – EOR

V rámci standardizace a interoperabilního přístupu na všech úrovních řízení a zabezpečení železničního provozu bylo nutné definovat jednotná pravidla, která se označují jako Evropské železniční předpisy (EOR). Vnitrostátní dokumenty a předpisy musí podmínky stanovené EOR respektovat a jejich dodržování je pro členské státy závazné. EOR obsahují základní požadavky na bezpečnost železničního provozu a technické požadavky. Bezpečnostní požadavky stanoví Společná bezpečnostní metodika pro hodnocení a posuzování rizik – *Common Safety Method* (CSM). Závazné technické požadavky jsou stanoveny společnými technickými specifikacemi pro interoperabilitu – *Technical Specifications for Interoperability* (TSI).

Evropský standard provozního řízení – ETML

Pro harmonizaci ERTMS na úseku řízení provozu slouží Evropský standard provozního řízení (ETML). Standardy řízení provozu jsou mezi jednotlivými členskými státy rozdílné a je nutné mezi jednotlivými státy navzájem řešit způsob řízení provozu na hranicích států. V podmínkách ČR jsou vydávána takzvaná Místní ujednání pro řízení provozu a organizování drážní dopravy, která jsou vydávána pro každý hraniční přechod. Cílem ETML je dosažení takové úrovně standardizace řízení, aby mohlo docházet k bezproblémovému předávání vlaků a dat napříč celým evropským železničním systémem. Pro naplnění cíle integrace evropského železničního prostoru mohou v tomto případě sloužit inteligentní dopravní aplikace, které nabízí široký potenciál využití pro zvýšení efektivity a atraktivity celého systému.

System CBTC

Dalším z běžně nasazovaných systémů ATC je systém CBTC. Je určen pro vysokokapacitní systémy kolejové dopravy. Používá se zejména v městských a příměstských drážních systémech, jako jsou metro a příměstská železnice. Tento systém ATC je primárně určený pro segregované tratě, po kterých jsou vedeny vlaky se stejnými, nebo velmi podobnými parametry a pro tratě, kde je prakticky eliminováno riziko ohrožení železničního

provozu vnějšími vlivy (např. povětrnostními podmínkami, nedovoleným pohybem osob, silničními přejezdy atd.). Systém CBTC se odlišuje od ostatních konvenčních zabezpečovacích systémů především možností provozu vlaků v pohyblivých prostorových oddílech (stejně jako ETCS L3). Mobilní část systému CBTC dokáže s vysokou přesností určit přesnou polohu vlaku na trati a zároveň poskytnout podrobná data o stavu vlaku. Vzdálenost mezi následnými vlaky na stejné koleji se u těchto systémů určuje podle polohy konce předcházejícího vlaku, zábrzdné vzdálenosti následujícího vlaku a bezpečnostní rezervy. Pro tuto vypočtenou vzdálenost je systémem vlaku uděleno oprávnění k jízdě MA (16).

Z hlediska architektury systému se systémy CBTC skládají ze dvou dílčích subsystémů. Mobilní subsystém – *On-board subsystem* (BSS) je instalován přímo na vlaku a *Trackside subsystem* (TSS) – traťový subsystém je umístěn na trati a ve stanicích. Systém CBTC ve své architektuře zahrnuje i subsystém ATO a umožňuje, ve svých vyšších modifikacích, aplikaci zcela bezobslužného provozu vlaků. Při automatickém provozu vlaků je vždy implementován subsystém ATS, který kontroluje všechny vlaky v síti, kontroluje dodržování rychlostních omezení, jízdních řádů a funkci informačních systémů. Systém CBTC může integrovat a kontrolovat i funkce dalších přidružených systémů, jako funkci kolejových obvodů, trakčních zařízení a dalších částí infrastruktury (16).

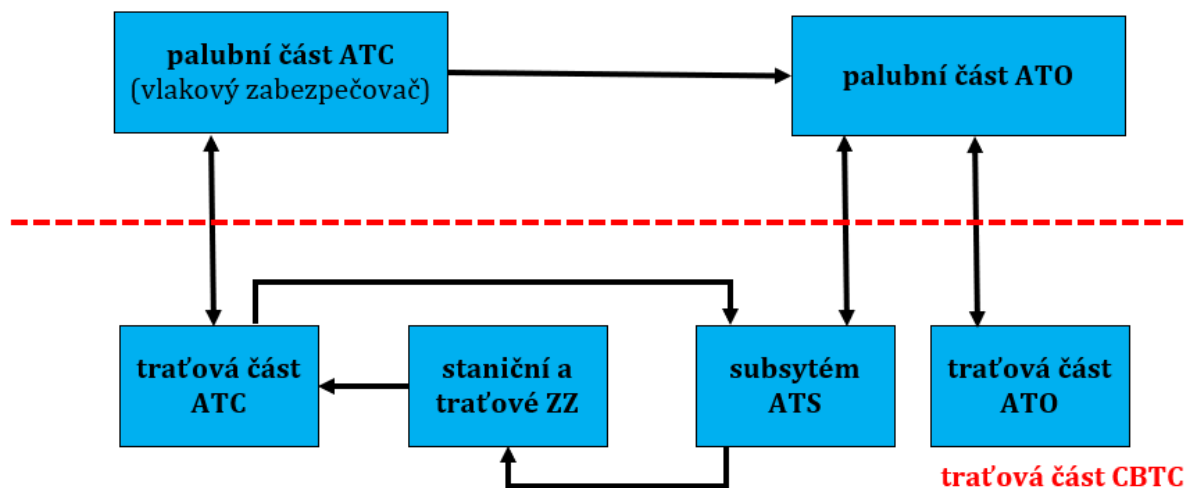
Komunikace mezi jednotlivými subsystémy systému CBTC je zajištěna pomocí instalace rádiové sítě nebo indukčních smyček v celé délce trati. Z hlediska nákladů je výhodnější variantou umístění komunikačních prvků v izolovaných bodech okolo celé trati. Ztrácí se tím však možnost provozu v pohyblivých prostorových oddílech. Pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech je nutná instalace liniových prostředků (17). Vlaková jednotka BSS si nepřetržitě předává zprávy s traťovou částí TSS. Pokud dojde ke ztrátě signálu nebo k jiné poruše (např. nesrozumitelnost zprávy), vlaková jednotka okamžitě (po uplynutí stanoveného časového intervalu) přejde do režimu rychločinného brzdění. Protože se jedná o ZZ, jsou komunikační větve vedeny duplicitně, přičemž aktivní může být vždy pouze jedna z těchto větví. Kromě redundance jednotlivých částí ZZ, jsou tyto části chráněny před přírodními vlivy a mechanickým poškozením (18).

TSS se obvykle skládá z radiomajáků rozmístěných podle trati ve vzdálenosti od několika desítek metrů do několika stovek metrů tak, aby byla pokryta všechna místa na trati. Vzdálenost radiomajáku je ovlivněna především místními poměry, jako jsou například směrové vedení trati a parametry tunelů. Radiomajáky mohou být upevněny na samostatných sloupcích, případně i na jiných vhodných částech vybavení trati. Radiomajáky jsou vzájemně

propojeny pomocí zdvojené sítě optických kabelů. BSS komunikuje s radiovou sítí pomocí vozidlové antény (18).

Systémy CBTC nemají aplikační úroveň jako systém ETCS. Úroveň automatizace se rozlišuje podle jednotlivých typů systémů, které vyrábí různí výrobci. Stejně jako pro systém ETCS, jsou i pro systémy CBTC definovány mezinárodními standardy, které upravují jejich vlastnosti z hlediska bezpečnosti a interoperability systémů od jednotlivých výrobců (18). Pro systémy CBTC jsou referenčními normami IEEE 1474.1-2004 a IEC 62290. Tyto normy nepředstavují průmyslovou normu pro architekturu systému, ale poskytují základ pro návrh systému CBTC. Schematické znázornění funkční struktury systému je uvedeno na obrázku 7 (19).

mobilní část CBTC



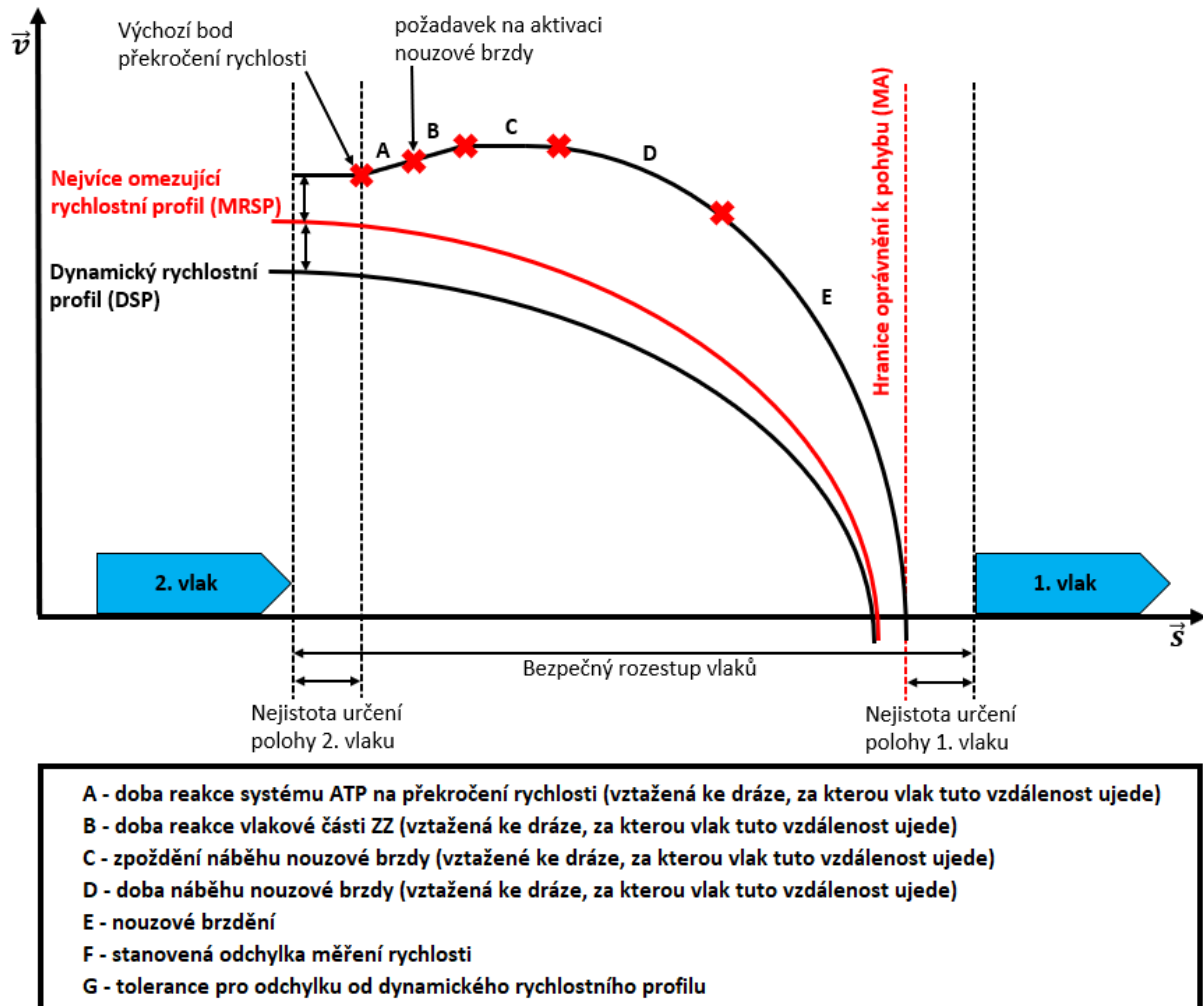
Obrázek 7 Funkční struktura systému CBTC

Zdroj: (19) s úpravou autora

Stejně jako všechny systémy ATC, je i systém CBTC funkčně členěn na subsystémy ATP, ATO a ATS. Subsystém ATP zajišťuje bezpečnost provozu při automatickém režimu jízdy vlaku a zajišťuje výpočet parametrů MA. Dohled a řízení vlakové dopravy zajišťuje subsystém ATS. Samotné řízení vlaku potom zajišťuje subsystém ATO. Subsystém ATO řídí jízdu vlaku s ohledem na limitní podmínky stanovené subsystémem ATP, s ohledem na přesnost dodržování jízdního řádu a optimalizaci spotřeby trakční energie. Významnou odlišností od systému ERTMS je právě definovaná existence a způsob využití subsystému ATO. Zatímco ETCS je jednotným vlakovým zabezpečovačem, systém CBTC je komplexním systémem, který je schopný zcela automatického vedení vlaku (19).

Hlavní předností CBTC je možnost provozu vlaků v pohyblivých prostorových oddílech – *Moving Blocks* (MB). Princip určení bezpečného rozestupu vlaků je uveden na obrázku 8. Tím je umožněno maximální zkrácení hodnoty následného mezidobí.

V systémech CBTC je však tento systém zpravidla doplněn i o možnost provozu v pevných prostorových oddílech s využitím konvenčních prostředků zjišťování nepřítomnosti kolejového vozidla na úseku trati. V některých aplikacích je umožněn i smíšený provoz ve fixních a pohyblivých prostorových oddílech (16).



Obrázek 8 Model bezpečného rozestupu vlaků

Zdroj: (19) s úpravou autora

Jak již bylo výše zmíněno, systém CBTC vyvíjí celá řada společností, které jsou obvykle i výrobci ZZ, případně vozidel a dalších nezbytných komponent železničního dopravního systému (16, 19, 20). Dále je uveden stručný popis zástupců komerčně provozovaných systémů CBTC.

Bombardier CITYFLO 450 a 650

Systém CITYFLO 650 je komplexním řešením pro automatizaci městských drah. Systém CITYFLO 650 je ATC, který nevyžaduje ke svému provozu použití izolovaných úseků. Systém je navržen tak, aby byl možný zcela bezobslužný provoz vlaků. CITYFLO 650 lze také použít jako systém řízení vlaků pro přechodný stav provozu při modernizaci v kombinaci

s využitím stávajících pevných prostorových oddílů. Systém tedy umožňuje realizaci smíšeného provozu vlaků vybavených, nebo naopak nevybavených mobilní částí systému ATC (21). Systém Bombardier CITYFLO 650 dosahuje teoretického nejkratšího intervalu následného mezidobí 75 s (v ideálních podmínkách). Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 101 do 111 s (11).

CITYFLO 450 je systém ATC navržený pro poloautomatické řízení vlaků. Pro svůj provoz rovněž nevyžaduje zřizování izolovaných úseků. Komunikace mezi vlakem a traťovou částí zařízení probíhá prostřednictvím obousměrného rádiového spojení. CITYFLO 450 lze použít i jako přechodný systém řízení vlaků při modernizaci stávajících systémů s pevnými prostorovými oddíly. Palubní zařízení EBICAB zajišťuje, že vlak nepřekročí stanovenou povolenou rychlost, ani neprojde EoA – jedná se tedy o systém ATP. Automatické vedení vlaku zajišťuje systém EBIDRIVE (ATO), který je součástí palubního zařízení EBICAB. V aplikaci CITYFLO 450 se využívá řídicí místnost EBISCREEN, která poskytuje operátorovi metra úplný přehled a kontrolu nad provozem (21).

Alstom Urbalis 400

Jedná se o druhou generaci systémů CBTC od společnosti Alstom. Alstom Urbalis 400 je pokročilý systém řízení jízd vlaků. Systém nabízí možnost implementace CBTC na úrovních GoA3 a GoA4. Systém, který je neustále aktualizován, nabízí značný rozsah funkcí, které zvyšují kapacitu trati a průměrnou rychlost. Mobilní část systému používá pro určení polohy vlaku eurobalízy, které jsou rozmístěny na trať obdobně jako u systému ETCS. V prostoru mezi balízami se poloha vlaku určuje pomocí odometrie. V některých implementacích může být zřízeno i sekundární zabezpečení (zpravidla prostřednictvím kolejových obvodů), které umožňuje zachování provozu při poruchách, nebo v případě jízdy vlaků nevybavených palubní částí systému (22).

Systém Alstom Urbalis 400 dosahuje teoretického nejkratšího intervalu následného mezidobí 85 s (v ideálních podmínkách). Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 90 s (16).

Thales SelTrac G8

Thales SelTrac je zařízení CBTC, které se v současnosti (rok 2024) dodává již ve své osmé generaci. Systém je navržen stavebnicově a je možné jej použít pro vybavení nových tratí nebo jako komplexní náhradu starších systémů ZZ. Systém umožňuje provoz na úrovních automatizace GoA3 a GoA4. Poslední generace systému klade důraz na subsystém

ATO a optimalizaci spotřeby trakční energie pro provozovatele metra ve výši 14-18 % oproti generaci předchozí (23).

Systém Thales SelTrac dosahuje teoretického nejkratšího intervalu následného mezidobí 60 s (v ideálních podmínkách). Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 90 s (16).

Hitachi Rail STS

V případě tohoto výrobce se jedná o fúzi podniků, kdy se italský výrobce Ansaldo STS stal členem skupiny Hitachi. Tento systém CBTC využívá pro určování polohy vlaku obousměrnou datovou komunikaci mezi vlakovou a vozidlovou částí ZZ. Systém je založen na použití pohyblivých prostorových oddílů. Vozidlová část odesílá informace o poloze vlaku do traťové části zabezpečovacího systému, který pak tyto informace využívá jako základ pro odesílání řídicích informací všem vlakům v řízené oblasti. Systém CBTC společnosti Hitachi splňuje mezinárodní normu IEEE 1474 a získal od evropské certifikační agentury certifikaci spolehlivosti, dostupnosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) na úrovni integrity bezpečnosti (SIL) 4 (24).

Systém Hitachi Rail STS dosahuje teoretického nejkratšího intervalu následného mezidobí 60 s (v ideálních podmínkách). Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 90 s (16).

Siemens Trainguard MT

Systém CBTC od společností Siemens se nazývá Trainguard MT. Systém umožňuje zajištění smíšeného provozu vlaků. Komunikaci mezi traťovou a vozidlovou částí CBTC zprostředkovává subsystém Airlink, který je určen pro obousměrnou datovou komunikaci. Subsystém Airlink je komunikační platformou, která se využívá pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotlivými komponenty systému. Pro určení polohy a rychlosti vlaku se používá i Dopplerův radar a odometrie. Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 80 s (16).

Řešení CBTC Trainguard MT společnosti Siemens Mobility je nejrozšířenějším systémem automatického řízení vlaků na světě a používá jej mnoho městských systémů metra včetně Paříže, Pekingu, New Yorku, Londýna, Hongkongu a Buenos Aires (25).

Nippon signal – SPARCS

Japonská společnost Nippon Signal dodává vlastní platformu CBTC, která se nazývá *SPARCS Radio Communication System Simple – Structure and High – Performance ATP*. Systém SPARCS je certifikován pro úroveň bezpečnosti SIL 4. Jedná se o vyspělý systém CBTC, který na základě skutečného provozu vlaků v systému ATS vytváří a okamžitě mění aktuální jízdní řád pro optimalizaci tras vlaků. Základní vlakový jízdní řád plánuje dopravní dispečer s podporou systému plánování pro vlakové jízdní řády. Tento systém dosahuje úrovně GoA4 (bezobslužný provoz vlaků) (20). Reálná provozní hodnota nejkratšího intervalu následného mezidobí je od 90 s (16).

Mezi další dodavatele zabezpečovacího systému CBTC patří například Toshiba, CRSC, Kyosan a CRRC Group (16).

System CTCS

Systém *China Train Control System* (CTCS) je systém řízení vlaků vyvinutý v Čínské lidové republice. CTCS je založen na principech ERTMS a některé jeho části mohou být s ERTMS vzájemně interoperabilní. Systém CTCS se rozděluje do pěti aplikačních úrovní (26).

CTCS-0 – Je založen na konvenčním způsobu zjišťování nepřítomnosti železničního kolejového vozidla pomocí kolejových obvodů. Používá se pro tratě a vlaky s maximální rychlostí do $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V této úrovni je nutné ponechat optická návěstidla. Lokomotivní signalizace je pouze doplňková (26).

CTCS-1 – Je založen na konvenčním způsobu zjišťování nepřítomnosti železničního kolejového vozidla pomocí kolejových obvodů, který je doplněn o transpondéry. Používá se pro tratě a vlaky s maximální rychlostí v rozpětí od 120 do $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (26).

CTCS-2 – Využívá systému digitalizovaných kolejových obvodů, transpondérů a systému ATP. Používá se na tratích s vyšší rychlostí než $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Přenos signalizace stále probíhá pomocí kolejových obvodů a transpondérů. Podél trati již nejsou instalována návěstidla. V této úrovni je však stále používán způsob rozdělení trati na fixní prostorové oddíly (26).

CTCS-3 – Je založen na principu rozdělení trati na virtuální fixní prostorové oddíly, ke komunikaci využívá transpondéry a síť GSM-R. V úrovni 3 se kolejové obvody již využívají pouze pro kontrolu volnosti koleje a zjištění integrity vlaku. Komunikace mezi traťovou a vlakovou částí ZZ již probíhá pomocí radiového spojení GSM-R. V této úrovni je však stále použit způsob rozdělení trati na fixní prostorové oddíly (26).

CTCS-4 – V této úrovni je uplatněn princip pohyblivého prostorového oddílu. Přenos informací mezi traťovou a vlakovou částí ZZ již probíhá pomocí radiového spojení prostřednictvím GSM-R. Kontrolu integrity vlaku provádí palubní jednotka (26).

Aplikační úrovně CTCS 2, 3 a 4 jsou zpětně kompatibilní. Aplikační úroveň CTCS-3 je ekvivalentní úrovni ETCS L2. Úroveň CTCS-4 je pak ekvivalentní k ETCS L3. Systém CTCS byl poprvé uveden do provozu v roce 2010 (26).

Systémy automatického vedení vlaku (ATO)

Vznik systémů ATO souvisí s postupným rozvojem komunikačních a řídicích technologií, kdy se ukázalo jako žádoucí nahradit tradiční systém ručního řízení vlaku. Ze začátku se tyto systémy vyvíjely v podstatě samostatně a byly téměř výlučně součástí vybavení konkrétního typu hnacích vozidel. Se stoupající náročností technologie provozu a s důrazem na zvýšení kvality plnění jízdního řádu, se systémy ATO rozšířily napříč celým odvětvím (27). Systém ATO lze v zásadě definovat jako: **Komplexní nástroj pro zefektivnění stávající železniční sítě prostřednictvím automatizace řízení provozu a řízení jízd vlaků, optimalizací provozních nákladů, zvýšením kapacity sítě a zlepšením kvality provozu vlaků.**

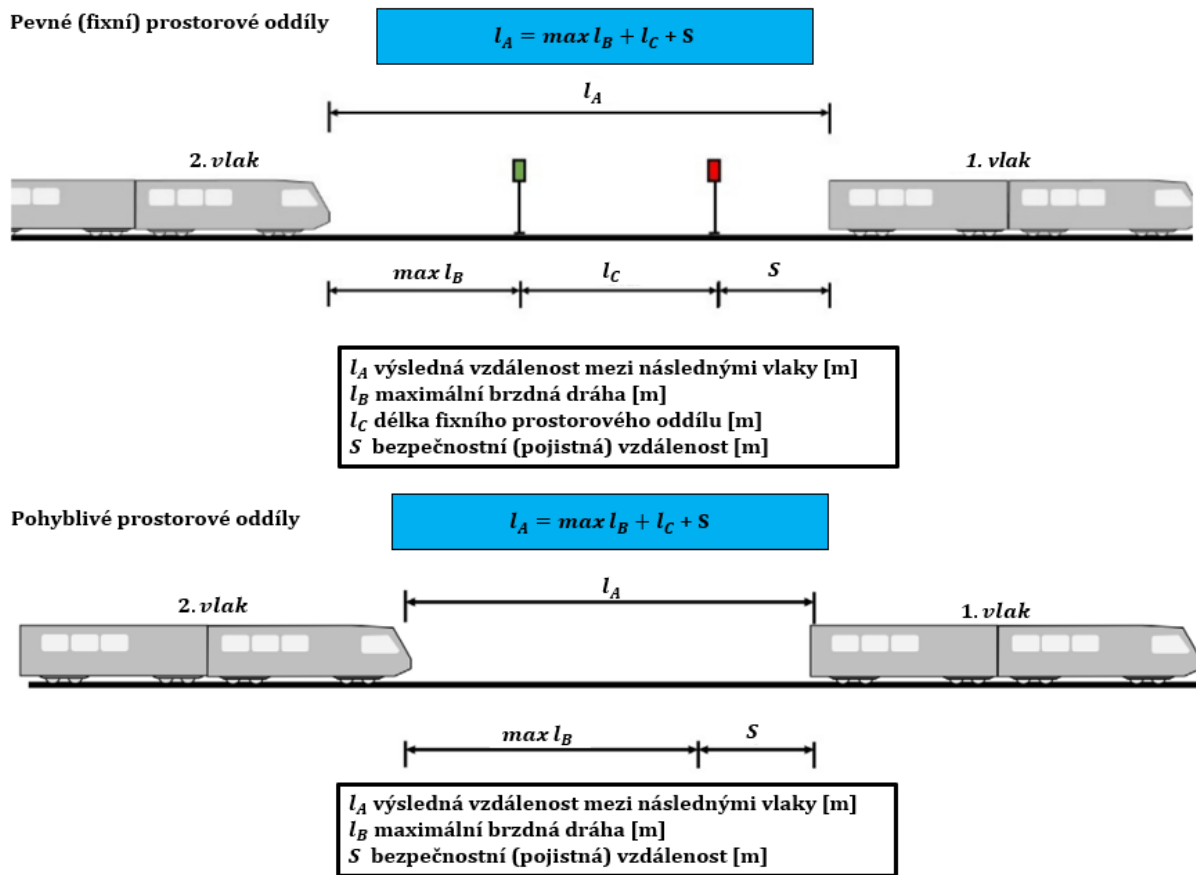
V současné době je hlavním segmentem železniční dopravy, kde je aktivně využívána technologie ATO, městská a příměstská železniční doprava. Lze však předpokládat, že v budoucnu se tyto systémy budou využívat i u ostatních segmentů železniční dopravy. Je pravděpodobné, že systémy ATO do budoucna zcela nahradí tradiční ruční řízení v městských a příměstských železničních systémech. Cílem ATO je obvykle zlepšit efektivitu provozu železničního provozu pomocí optimalizace rozjezdu, výběhu a brzdění vlaku. Vzhledem k současným problémům v oblasti životního prostředí a energetiky je využívání ATO také všeobecně uznáváno jako způsob, jak snížit spotřebu energie a emise uhlíku a zároveň zajistit lepší kvalitu služeb. Reálné nasazení technologií ATO se zatím stále omezuje na městské železniční tratě. Pro použití systému ATO na hlavních železničních tratích nebo VRT se stále provádí mnoho teoretických studií i praktických testů (27). Podrobnější analýza fungování systémů automatického vedení vlaku je uvedena v příloze A.

1.3 Zhodnocení systémů ETCS a CBTC

Z doposud provedené analýzy vyplývá, že ve světě existují dva dominantní systémy ERTMS a CBTC, přičemž každý z nich je primárně zaměřen na jiný subsystém železničního dopravního systému. V této kapitole je provedeno porovnání obou systémů, které je logickým krokem k určení závěrů analýzy systémů ATC a prozkoumání možností budoucí synergie systémů ERTMS a CBTC.

Systémy CBTC a ERTMS vznikaly odděleně od sebe. Vývoj ERTMS (ETCS) začal v 90. letech 20. století, a to z rozhodnutí Evropské unie. Systém ERTMS byl postupně nasazován nejenom v rámci členů Evropské unie, ale i v dalších zemích světa. Souběžně s vývojem systému ERTMS pro konvenční železniční tratě se v prostředí městské a příměstské kolejové dopravy začala rozvíjet celá řada systémů řízení vlaku, které se označují jako CBTC. Systémy CBTC jsou však na rozdíl od systému ERTMS proprietární, vzájemně neinteroperabilní technologií. Oba dominantní systémy ATC (ERTMS i CBTC) však vyrábějí stejní výrobci zabezpečovacího zařízení. Je proto přirozené, že s pokračováním vývoje a vzniklou potřebou standardizace a interoperability dojde k postupné konvergenci obou systémů. Z hlediska funkčního chování obou těchto systémů je zcela zásadní optimální využití jejich klíčových vlastností. Systém ERTMS byl vyvinut především pro hlavní a vysokorychlostní tratě. Systémy CBTC jsou naopak zaměřeny na městské a příměstské tratě. Z hlediska provozování dopravy je však výhodné oba tyto systémy propojit. Principálně by se jednalo o systém CBTC na bázi ETCS L2 pro provoz ve fixních prostorových oddílech a CBTC na bázi ETCS L3 pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech (28). Schématické porovnání provozu ve fixních a pohyblivých prostorových oddílech je na obrázku 9.

Jak již bylo výše uvedeno, je logickým záměrem postupná konverze těchto systémů do jednoho komplexního systému – NGTC. V příloze B je podrobněji rozveden očekávaný budoucí vývoj v oblasti systémů ATC. Na ni ještě navazuje příloha C, kde je provedeno porovnání provozně funkčních vlastností systému ETCS a CBTC.



Obrázek 9 Porovnání fixních a pohyblivých prostorových oddílů

Zdroj: (26) s úpravou autora

Pro postupnou konverzi systémů je zapotřebí sjednotit softwarové a hardwarové náležitosti. Z hlediska přenosu komunikace je zásadním problémem vyřešení jednotné přenosové sítě. Z hlediska ERTMS jsou požadavky definovány směrnicí 2008/57/ES. Systém GSM-R je jednotným interoperabilním systémem pro komunikaci v režimu ETCS L2 a ETCS L3. Systémy CBTC využívají standard IEEE 802.11 Wi-Fi, případně IEEE 1474.1-2004. Problémem systému GSM-R je jeho nedostatečná kapacita v oblasti přenosu dat. V době, kdy byly požadavky na tento systém definovány, nebyly požadavky takové jako nyní. Budoucnost systému by měla být založená na podpoře standardu vysokorychlostního přenosu dat – *Long Term Evolution* (LTE). V budoucnu bude účelné definovat jednotný standard založený na technologii LTE, který odstraní poslední podstatnou překážku sjednocení standardů systémů ERTMS a CBTC. V literatuře (26) je možné setkat se s pojmem budoucí železniční telekomunikační systém – *Future railway mobile communication system* (FRMCS). Porovnání jednotlivých standardů datové komunikace z hlediska rychlosti přenosu dat je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4 Rychlost přenosu dat v jednotlivých standardech datové komunikace

Nejvyšší rychlost přenosu	GSM-R	GPRS	EDGE	LTE
Uplink (UL)	9,6 kb·s ⁻¹	40 kb·s ⁻¹	500 kb·s ⁻¹	75 Mb·s ⁻¹
Downling (DL)	9,6 kb·s ⁻¹	60 kb·s ⁻¹	1,6 Mb·s ⁻¹	300 Mb·s ⁻¹

Zdroj: (26) s úpravou autora

Systém ETCS je navržen jako interoperabilní zařízení s tzv. vnitřní bezpečností (tedy jako zabezpečovací zařízení). Zařízení kontroluje dodržování vypočtených rychlostních limitů, ale součástí zařízení není subsystém ATO. Významným problémem ETCS je přílišná složitost schvalovacího procesu technických specifikací interoperability, která snižuje atraktivitu a konkurenceschopnost tohoto systému. Systém CBTC naopak dosáhl největšího pokroku v implementaci subsystému ATO a skutečně bezobslužného provozu vlaků. Systém CBTC poskytuje individuální technické řešení přímo podle místa a způsobu určení. Nabízí tak mnohem vyšší variabilitu řešení a rychlejší možnost rozvoje. Nevýhodou je, že takto nelze dosáhnout vzájemné interoperability systémů jednotlivých výrobců (29).

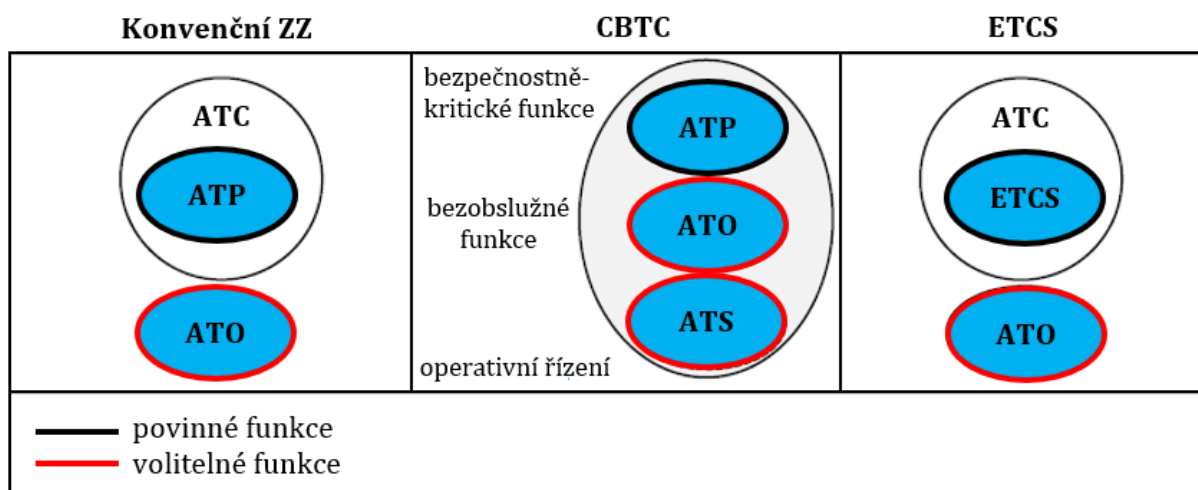
Systémy CBTC a ETCS lze rozdělit do kategorií podle jednotlivých stupňů automatizace GoA. Vzájemné porovnání samostatných schopností jednotlivých systémů je uvedeno v tabulce 5. Schéma základních funkcionalit systémů podle typu je uvedeno na obrázku 10.

Tabulka 5 Porovnání systémů podle úrovně automatizace

Stupeň automatizace	Typ řízení jízdy vlaku	Uvedení vlaku do pohybu	Zastavení vlaku	Provoz v případě poruchy	Zástupci systému
GoA1	ATP (X)	X	X	X	ETCS L1 CTCS L1, L2
GoA2	ATP, ATO (X)	S	S	S	ETCS L2 CTCS L3, L4
GoA3	S	S	A	A	CBTC
GoA4	S	S	S	S	CBTC

ATP – Automatic train protection
 ATP (X) – Automatic train protection – za spolupráce strojvedoucího
 ATP, ATO – Automatic train protection, Automatic train operation
 ATP, ATO (X) – Automatic train protection, Automatic train operation – za spolupráce strojvedoucího
X – strojvedoucí
S – zajišťováno automaticky systémem
A – vlakový doprovod

Zdroj: (26) s úpravou autora



Obrázek 10 Základní funkcionality jednotlivých systémů podle typu

Zdroj: (26) s úpravou autora

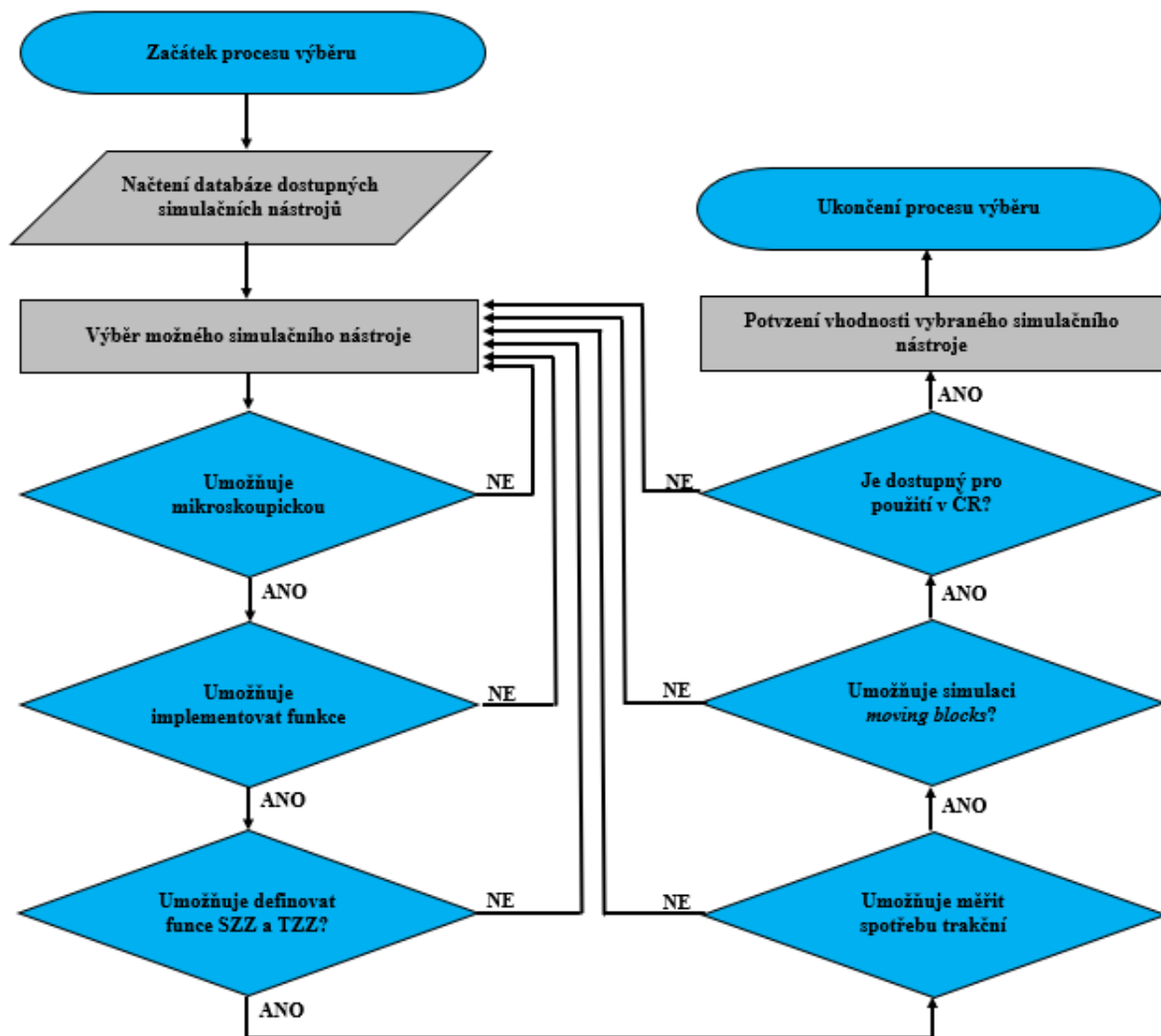
2 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI VYUŽÍVANÝCH SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ

Simulační modelování je jedním z progresivních nástrojů pro hodnocení efektivity a kvality železničního provozu. Při modelování jsou reálné parametry a vazby přeneseny do modelu. V závislosti na podrobnosti modelu je skutečnost odpovídajícím způsobem zjednodušena. Pro simulaci železničního provozu se v současnosti využívají specializované simulační programy. Přístup k simulaci se liší podle zvoleného simulačního nástroje, ale základní rysy zůstávají pro všechny typy modelů stejné. V každém simulačním modelu je nutné definovat řešenou dopravní infrastrukturu, použitá vozidla a jejich charakteristiky a zpravidla i jízdní řád, případně počet a směr vlaků v daném úseku. Simulační modelování je založeno na opakování experimentu. Pro vypovídající výsledky simulace je nutné stanovit několik simulačních scénářů. Volba simulačních scénářů je částečně závislá na rozhodnutí řešitelského týmu. První skupina simulačních scénářů by měla umožnit zachytit situace, ke kterým může na zkoumaném úseku železniční sítě skutečně dojít. Druhá skupina simulačních scénářů naopak zachycuje i méně pravděpodobné provozní stavy (s využitím teorie pravděpodobnosti) a umožňuje tak poskytnout komplexnější pohled na kapacitu zkoumané části železniční infrastruktury. Dané simulační scénáře jsou následně podrobeny násobným simulacím, kdy se postupně mění vstupní parametry simulace (typicky vstupní zpoždění). Násobná simulace se provádí v několika desítkách až stovkách replikací, v závislosti na rozsahu modelu. Na rozdíl od analytických metod pro posuzování kapacity železničních tratí, je při simulaci zkoumána také stabilita a kvalita jízdního řádu. Mezi hodnotící ukazatele potom patří například čekání v provozu, přírůstek zpoždění a další přidružené ukazatele, které řešitelskému týmu přinesou vypovídající výsledky pro řešení daného vědeckého problému (32 s. 102-188).

2.1 Vývoj a použití simulačních nástrojů

Pro stanovení vhodného simulačního nástroje je nutné nejdříve vybrat správný rozsah simulace. Simulační modely železničního provozu lze klasifikovat podle různých kritérií. Prvním kritériem je úroveň podrobnosti modelu sítě. Podle podrobnosti modelu se rozlišuje mezi makroskopickým, mezoskopickým a mikroskopickým modelem. Druhým kritériem, podle kterého se simulační modely rozlišují, je proměnlivost systému v čase. Simulace se podle tohoto kritéria dělí na diskrétní (asynchronní), spojité (synchronní) a kombinované. Dále je simulace možné dělit dle předvídatelnosti událostí na stochastické a deterministické (33 s. 121-188).

Cílem této kapitoly je provedení analýzy používaných simulačních nástrojů. Při analýze jednotlivých simulačních nástrojů je kladen důraz zejména na možnost jejich využití pro zadaný vědecký problém. Jednotlivé simulační nástroje jsou v kapitole začleněny na základě rozlišovací úrovně simulace. Ještě před provedením samotné analýzy simulačních nástrojů bylo nutné definovat nároky na vhodný simulační software (SW). Simulační software musí splňovat následující kritéria: modelování na mikroskopické rozlišovací úrovni, možnost implementace použití vlakových zabezpečovačů, přesné definování parametrů staničního a traťového zabezpečovacího zařízení, možnost měření a optimalizace spotřeby trakční energie, simulace využití pohyblivých prostorových oddílů a dostupnost simulačního SW v České republice. Tato klíčová kritéria přijetí jsou ještě doplněna na základě provedené analýzy stavu vědeckého poznání v této oblasti. Proces výběru vhodného simulačního nástroje je popsán na vývojovém diagramu na obrázku 11.



Obrázek 11 Vývojový diagram výběru vhodného simulačního nástroje

Zdroj: autor

2.2 Typy a využitelnost simulačních nástrojů

V této kapitole jsou analyzovány jednotlivé simulační nástroje, se kterými se autor v rámci studia pramenů pro tuto práci setkal. Rozčleněny jsou podle podrobnosti modelu, tedy na makroskopické, mezoskopické a mikroskopické simulační nástroje.

Makroskopické simulační nástroje

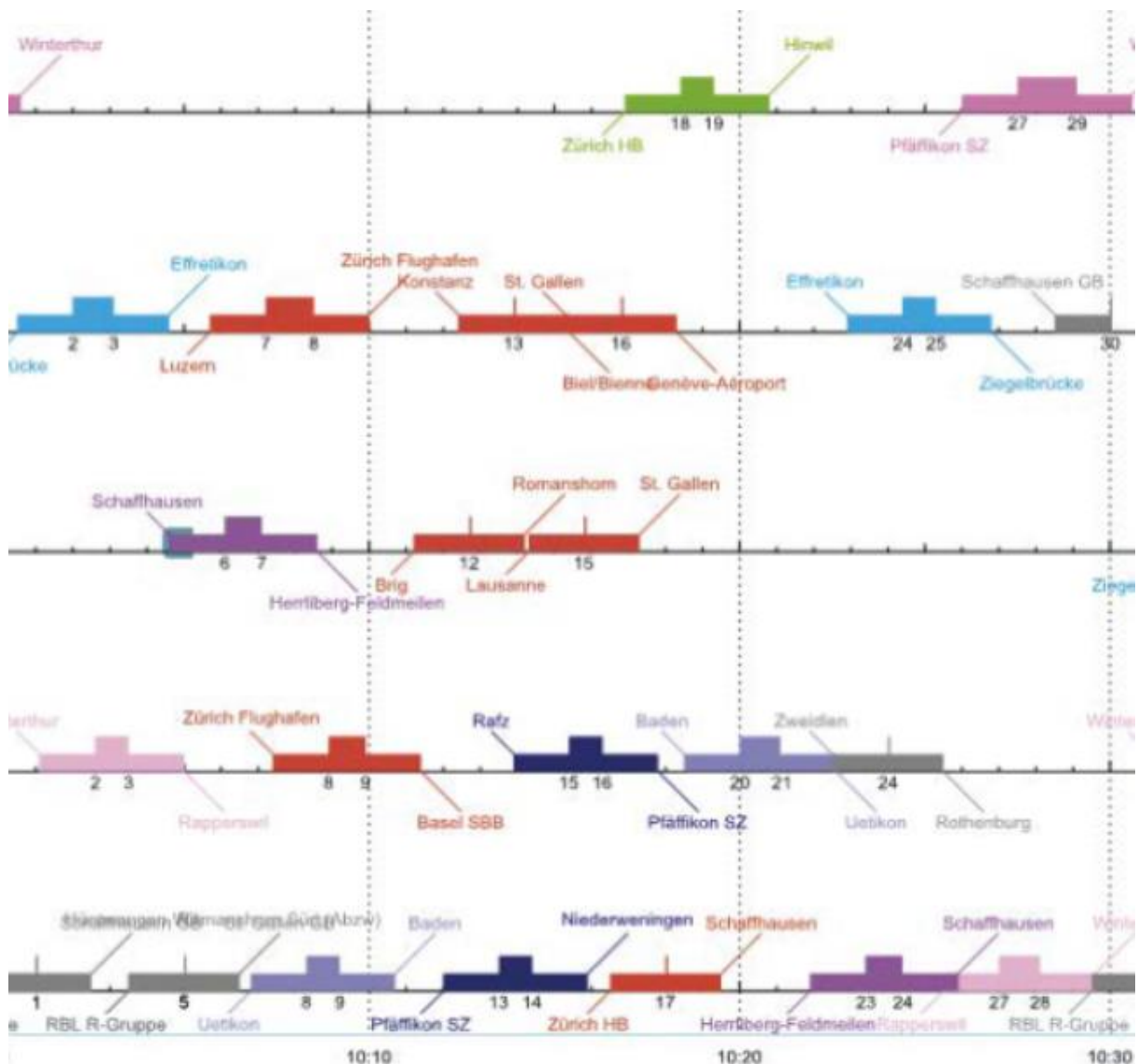
Makroskopické modely železniční sítě popisují infrastrukturu pomocí síťového grafu, jehož uzly označují různé stanice. Hrany obvykle zjednodušeně definují železniční trať mezi těmito uzly. Zjednodušení spočívá především v omezení podrobnosti vstupních parametrů, kterými mohou být například různé aproximace jízdních dob, předem definovaná kapacita stanic a tratí atd. Hlavní výhodou makroskopických modelů je nižší výpočetní náročnost simulace. Z tohoto důvodu umožňuje makroskopický simulační model obsáhnout rozsáhlé infrastrukturní sítě s přiměřenou výpočetní náročností. Tyto modely jsou vhodné především pro strategické rozhodování související s různými scénáři infrastruktury nebo řešení problémů se směřováním přepravních proudů. Nízký stupeň podrobnosti přijatý pro reprezentaci sítě však ovlivňuje přesnost výsledků. Tyto simulační modely obvykle obsahují mnohem méně uzlů a rozhodných bodů ve srovnání s podrobnějšími modely. Jsou také charakteristické vysokým stupněm abstrakce dopravní sítě. Tyto modely potom nejsou schopny do výpočtu zahrnout některé aspekty, jako jsou instalované zabezpečovací zařízení, uspořádání kolejí ve stanicích, další faktory ovlivňující kapacitu dopravní sítě, provozní intervaly a případné konflikty tras vlaků (34, 35). V následujícím textu jsou popsány vybrané softwarové nástroje pro provádění makroskopických simulací.

Viriato

Viriato je švýcarský simulační nástroj určený pro sestavu jízdního řádu. Zahrnuje možnost přiřazení jednotlivých kolejových vozidel každému vlaku. Na základě vstupních parametrů je následně proveden výpočet jízdních dob pro jednotlivé kategorie vlaků. Nástroj Viriato je vhodný především ke konstrukci periodických jízdních řádů, kde je možné pravidelným kopírováním spojů rychle sestavit jízdni řád. Do takto sestaveného jízdního řádu je pak možné vkládat dodatečné trasy dalších vlaků. Viriato také umožňuje rychlou konstrukci periodických jízdních řádů pro provoz městské železnice. Balíček Viriato umožňuje zobrazení jízdních řádů v několika uživatelsky přívětivých formátech a umožňuje optimalizaci navazujících služeb. Viriato má výstupy v mnoha formátech, včetně MS Excel a RailML. Nástroj Viriato umožňuje, kromě sestavy jízdních řádů, vytvářet například plány

obsazení dopravních kolejí ve stanicích (obrázek 12). Exportované výstupy (jízdní řády) lze snadno použít k testování spolehlivosti a robustnosti jízdních řádů například v SW OpenTrack (36).

Simulační nástroj Viriato se používá zpravidla pro makroskopickou simulaci, kde jsou následně porovnávány jednotlivé navržené scénáře a také jako podklad pro podrobnější simulaci. Podle zdroje (37) byl použit například pro makrosimulaci při sestavě jízdních řádů v případové studii trati Aberdeen-Inverness ve Velké Británii.



Obrázek 12 Plán obsazení dopravních kolejí sestavený v SW Viriato

Zdroj: (38)

SIMONE

Simulační nástroj SIMONE patří mezi makrosimulační nástroje. Základem simulačního modelu vytvořeného v prostředí SIMONE je již sestavený jízdní řád. Jízdním řádem jsou

určeny příjezdy a odjezdy do stanic a hranové časy mezi jednotlivými vrcholy sítě (stanicemi). Uživatel může v modelu nastavovat primární (vstupní) zpoždění. Může buď definovat omezující prvek infrastruktury nebo přiřadit omezení vybranému dopravnímu kompletu (vlaku) v centrálním jízdním řádu. Software SIMONE umožňuje znázorňovat vliv primárních zpoždění na ostatní vlaky a generování sekundárních zpoždění (39).

Simulační prostředí SIMONE bylo využito při řešení problému zaústění linek do železniční stanice Hengelo v Nizozemí a byl použit i zdejším ministerstvem dopravy pro řešení problémů přepravních vztahů na železniční síti (39).

TransCAD

TransCAD je geografický informační systém (GIS) navržený speciálně pro oblasti dopravního plánování. TransCAD kombinuje funkce GIS a dopravního modelování. TransCAD lze použít pro všechny druhy dopravy. Primárně je určen pro makrosimulaci. Má nástroje pro mapování a vizualizaci dopravních situací. Z hlediska železniční dopravy je vhodný primárně pro určování širších přepravních vztahů. Výsledky získané z modelu v SW TransCAD mohou být uplatněny pro další simulace ve specializovaných SW pro železniční dopravu (40).

Ostatní makroskopické simulační nástroje

V této podkapitole jsou stručně popsány SW nástroje, které nejsou vhodné pro další využití v této práci nebo k nim nejsou k dispozici dostatečně kvalitní literární zdroje pro zpracování analýzy. Jedná se například o SW SABINE (41), který má využití především pro modelování dopravního toku. Simulační nástroj ANKE (42) je určen k nastavování optimální kapacity vybraných částí železniční sítě a uzlů. Simulační SW NEMO (43) je určen pro sestavu předpokládaných JŘ na síti *Österreichische Bundesbahnen* (ÖBB).

Mikroskopické modely

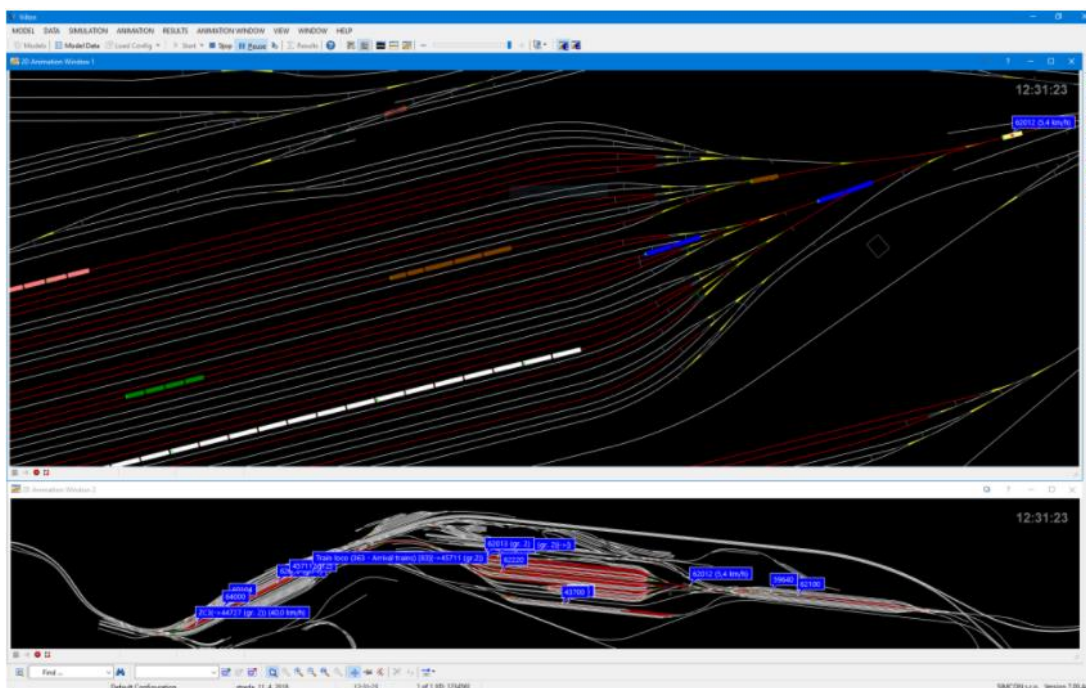
Mikroskopické modely naopak modelují dopravní síť velmi podrobně. Tyto modely zahrnují všechny podstatné informace o infrastruktuře, zejména se jedná o sklonové a směrové parametry kolejí, počet traťových kolejí, délku a počet prostorových oddílů a omezující traťové rychlosti. Umožňují rovněž zahrnout do výpočtu vlastnosti zabezpečovacího zařízení, jako jsou viditelnost a poloha návěstidel, prokluzová vzdálenost, jednotlivé kolejové úseky, brzdné křivky a další specifické parametry zabezpečovacího zařízení. Mikroskopické modely také umožňují uspokojivě popsat všechny parametry dopravy s kolejovým rozvětvením, zejména pak železniční stanice. Těmito parametry jsou zejména počet a parametry staničních kolejí,

délka nástupišť, posunové cesty a charakteristiky staničních zhlaví. Tyto modely zároveň umožňují velmi podrobně simulovat vlastnosti železničních vozidel, jako jsou funkce zrychlení a zpomalení, trakční charakteristiky, vozidlové odpory, adhezní charakteristiky a další ovlivňující faktory. Tyto modely také obvykle zahrnují provozní informace, jako jsou časy příjezdů a odjezdů, výběr nástupišť, časovou polohu, doby pobytů a přípojných vazby. Takové modelování infrastruktury je výborným prostředkem pro ověření konceptů navrhovaných infrastrukturních řešení a k analýze jejich dopadu na reálný provoz. Podrobně sestavený simulační model lze využívat pro výpočty jízdnicích dob, tvorbu jízdnicích řádů, identifikaci konfliktů vlakových tras a ověření teoretické kapacity sítě. Tyto modely poskytují velmi přesné výstupy. Jejich nevýhodou je však značná výpočetní náročnost a jisté omezení týkající se velikosti modelované dopravní sítě. Výstupy mikroskopických modelů, po nezbytné aproximaci údajů, mohou posloužit pro sestavu obecněji zaměřených mezoskopických, či makroskopických modelů (34, 35). V následujícím textu jsou popsány vybrané softwarové nástroje pro provádění mikroskopických simulací.

Villon

Simulační nástroj Villon se řadí mezi mikroskopické simulační nástroje. Jakožto takový není určen k modelování rozsáhlých částí železniční infrastruktury. Mezi oblasti modelování, pro které je SW Villon vhodným simulačním nástrojem, patří zejména seřadovací stanice, osobní stanice, malé (uzavřené železniční sítě) a intermodální terminály (44).

Na rozdíl od ostatních simulačních nástrojů není model infrastruktury reprezentován pouze schematicky. SW Villon umožňuje sestavit přesný model infrastruktury, který reprezentuje všechny podstatné fyzikální parametry infrastruktury. Tento model navíc může být sestaven v přesném měřítku. Ukázka simulačního prostředí SW Villon je uvedena na obrázku 13. Každý simulační proces je zde definován formou vývojového diagramu, který je přiřazen každému vlaku v systému. Villon obsahuje základní předdefinované procesy, které lze standardně modelovat. V případě specifických procesů může dodavatel SW upravit nástroj individuálně podle potřeb zákazníka (44, 45, 46).



Obrázek 13 Simulační nástroj Villon

Zdroj: (47)

Praktické využití simulačního nástroje Villon je zaměřeno na simulaci provozu železničních terminálů, jako například ve článku (48), kde se autoři zabývají optimalizací procesů železničních terminálů, a to jak osobních, tak těch určených pro nákladní dopravu. V dalších publikacích je řešen například problém výběru při rozhodování o operativním využití staničních kolejí a nástupištních hran (49).

AnyLogic

Jedná se o mikrosimulační nástroj, který je zaměřený na simulace navržených technologických řešení v oblasti železniční infrastruktury. Tento nástroj umožňuje také simulaci provozu multimodálních terminálů, umožňuje vypracovat analýzu a otestovat projekty ještě před zahájením výstavby. Zabývá se simulací navržených jízdnicích řádů vlaků a zpracovává ukazatele pro určení dopravní kapacity stanic. Zabývá se optimalizací výběru vozidlového parku a zdrojů využitelných na řešenou část železniční sítě. Umožňuje ověřit využití jednotlivých zdrojů simulovaných subsystémů, jako jsou hnací vozidla, tažená vozidla a jejich alokace na odstavných kolejích. Cílem je vytvořit podklady pro následnou kalkulaci efektivity investic do infrastruktury a vozidel. Součástí nástroje AnyLogic je také rozsáhlý nástroj vizualizace. AnyLogic obsahuje také takzvanou *Rail Library*, tedy speciálně navrženou sadu nástrojů, která zjednodušuje simulaci a vizualizaci železničního provozu a navazujících logistických procesů (50).

Většina praktických vědeckých prací, kde je využíván nástroj AnyLogic, je zaměřena na multimodální terminály a nákladní terminály. Například podle zdroje (51) je možné simulační nástroj využít pro optimalizaci procesů v nákladních terminálech. Na obdobné využití poukazují i publikace dle zdrojů (52, 53).

RailGENIE

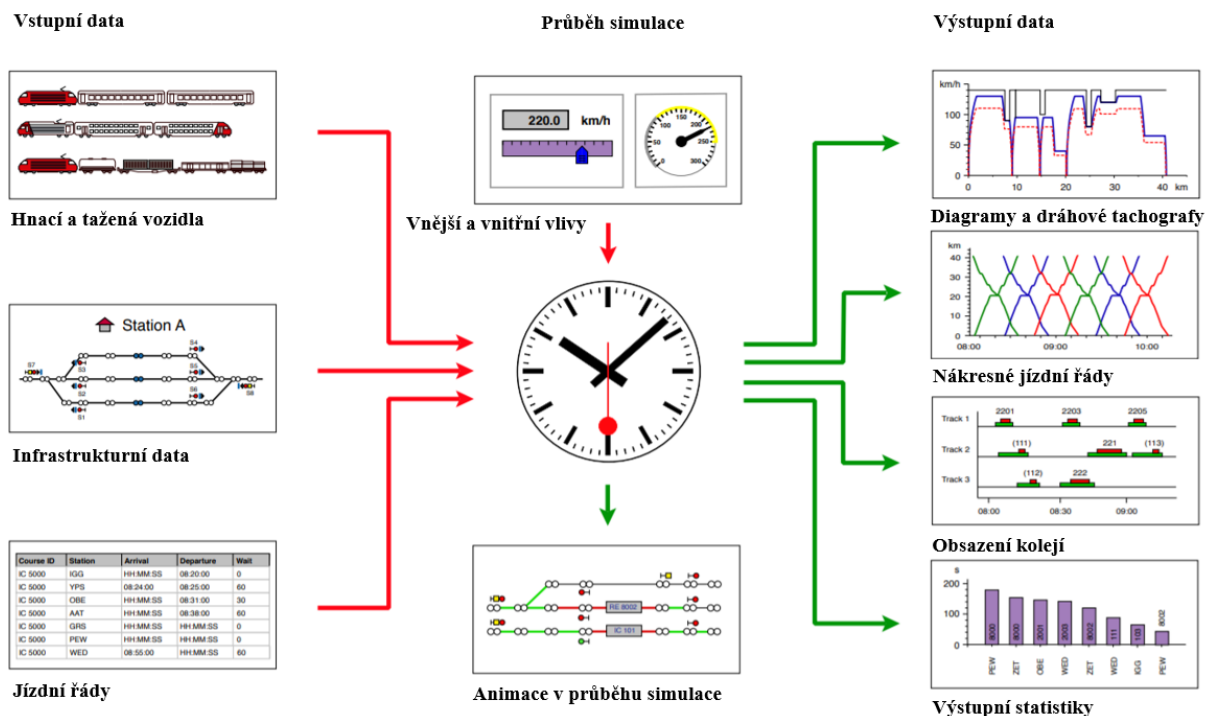
Simulační program RailGENIE je produktem nizozemské společnosti MACOMI. Jedná se o mikrosimulační program zaměřený především na železniční stanice a navazují logistické procesy. Nástroj RailGENIE obsahuje několik modulů, které nabízí celkový přehled o infrastruktuře, a to od koncepčního plánování až po provoz a údržbu. Simulace jsou zaměřeny na čtyři klíčové parametry železniční a navazující infrastruktury. Prvním parametrem je kapacita infrastruktury. Pro zjednodušení simulací železničního provozu je SW vybaven možností automatického generování čísel vlaků, automatické přiřazení hnacího vozidla a možností sestavy oběhů souprav. Dalším parametrem je infrastrukturní plánování, kde se kromě kapacitních možností infrastruktury řeší i servisní náročnost. Třetím parametrem, který navazuje na železniční infrastrukturu a provoz, je simulace navazujících logistických procesů. Posledním parametrem, který slouží k podpoře plánování, je vypracování analýzy rizik. Software RailGENIE je dodáván v otevřené platformě a jednotlivé moduly jsou doplňovány podle požadavků zákazníků (54).

Simulační nástroj RailGENIE byl použit například pro výzkum kapacity kolejiště a simulaci navazujících logistických procesů v multimodálním terminálu Rotterdam. V rámci tohoto výzkumu bylo uvažováno s podrobným modelem kolejiště, včetně všech náležitostí týkajících se posunu a přiřazování hnacích vozidel (55).

OpenTrack

Software OpenTrack je specializovaný produkt *Swiss Federal of Technology Institute for Transport Planning and Systems*. Je navržen tak, aby umožňoval simulovat všechny druhy kolejové dopravy. Z hlediska rozlišovací úrovně simulací je OpenTrack určen především pro mikrosimulace. Existující nebo navrhovaná dopravní síť je zde zastoupena pomocí síťového grafu, který obsahuje informace o parametrech infrastruktury. Vrcholy tohoto grafu jsou zastoupeny tzv. dvoubody, které „reprezentují“ významné body na trati, kde se nachází některý z rozhodných infrastrukturních prvků nebo se mění parametry trati. Jednotlivé vrcholy jsou spojeny hranami, které „reprezentují“ jednotlivé úseky tratě. Hrany obsahují informace o maximální rychlosti a sklonových poměrech daného úseku trati. Dalšími vstupními daty jsou data o jízdách cestách. Veškeré dovolené jízdni cesty je zapotřebí přenést do modelu. Je přitom

nutné respektovat dopravní program stanice a závěrovou tabulku. Informace o jízdách umožňují realisticky simulovat skutečnou činnost zabezpečovacího zařízení, a to jak traťového, tak staničního. Dalšími vstupními daty jsou data o tažených a hnacích drážních vozidlech a jízdni řady. Z hlediska využití simulace v oblasti vlakových zabezpečovačů nabízí OpenTrack několik možností. Součástí verze 1.10, která je k dispozici v laboratoři KTRD, je například možnost implementace systémů ETCS a CBTC, ale také starší systémy bodového nebo liniového přenosu signálu vlakového zabezpečovače. Z hlediska systémů automatického vedení vlaku, umožňuje OpenTrack simulovat optimalizovanou časovou polohu vlaků s přihlédnutím na spotřebu trakční energie. Případně je možné do modelu začlenit vnořenou charakteristiku jízdy vlaku zjištěnou pomocí externích výpočtů. OpenTrack se používá především pro ověřování kapacity železničních tratí, kapacity železničních stanic a vzhledem k podrobnosti simulace je v něm možné simulovat i další charakteristiky týkající se jízdy vlaku a spotřeby trakční energie. V praxi se také používá pro ověřování vlivu navržených opatření a úprav dopravní infrastruktury na skutečný provoz. Výstupem simulace jsou dráhové tachografy, diagramy jízdy vlaku, statistiky jízdy vlaku a plnění jízdniho řádu, plány obsazení dopravních kolejí a nákrese jízdni řady (56, 57). Vstupní a výstupní parametry jsou znázorněny na schématu na obrázku 14.



Obrázek 14 Vstupní a výstupní data simulačního nástroje OpenTrack

Zdroj: (32) s úpravou autora

Simulační nástroj OpenTrack byl použit například ve studii zabývající se kapacitou vysokorychlostní tratě Beijing – Shanghai, kde autoři řešili vliv jízdy vlaků ve svazku

na kapacitu trati (58). Další studie je zaměřena na rekonstrukci tratě R 201 Zaprešić – Zabok (Chorvatsko). Pomocí SW OpenTrack byl simulován výhledový jízdní řád. Součástí studie bylo také posouzení výběru vhodného vlakového zabezpečovače. Při simulaci jednotlivých scénářů však nebyl jednoznačně prokázán přínos implementace systému ETCS oproti národnímu vlakovému zabezpečovači (68). Následující studie se zabývá posouzením kapacity tratě Záhřeb – Rijeka M202 (Chorvatsko), která je součástí sítě TEN – T. Záměrem studie bylo určit možnosti výhledového navýšení kapacity po rekonstrukci tratě. Ve studii byla provedena změna organizace dopravy tak, aby byla navýšena kapacita pro nákladní dopravu. Simulací bylo prokázáno, že rekonstrukcí tratě a změnou organizace dopravy by došlo k navýšení volné kapacity tratě pro nákladní dopravu přibližně o 23 % (60).

PULsim

Jedná se o mikrosimulační nástroj pro plánování železničního provozu. Model sestavený v SW PULsim vyžaduje následující vstupní parametry: infrastrukturní data, kolejová vozidla a zabezpečovací systémy. Tyto parametry se používají k popisu statické a dynamické části simulace. Simulační model vytvořený v PULSim může být použit pro simulaci na libovolné rozlišovací úrovni. Vzhledem k tomu, že pro sestavu simulačního modelu je zapotřebí infrastrukturu podrobně popsat, hodí se tento nástroj především pro mikroskopickou simulaci. Dopravní infrastruktura je modelována, analogicky s většinou ostatních mikrosimulačních nástrojů na této bázi, pomocí síťového grafu. Z hlediska struktury simulace, se každá hrana grafu může nacházet ve dvou stavech. Může být buď volná nebo obsazená. V dynamické části simulace jsou pak, pomocí stavu jednotlivých prvků, simulovány uskutečňované jízdní cesty a sledovány vzájemné konflikty vlakových tras. Z hlediska možností zapracování systémů ATO a ATP je v prostředí PULsim prozatím uvažován pouze systém ETCS (61).

Podle zdroje (61) je simulačním modelem v programu PULsim řešena studie vlivu dispečerského rozhodování na kvalitu dopravního provozu na vybrané části sítě *Deutsche Bahn* (DB). Celkem bylo do modelu zapojeno 71 stanic a model byl výpočetně velice náročný. Cílem této studie byla konečná optimalizace čekací doby na dispečerské rozhodnutí v konfliktních situacích, s cílem optimalizovat plynulost jízdy vlaků a kvalitu dodržování jízdního řádu.

RailSys

RailSys je softwarový nástroj, který je určen primárně pro vytváření mikroskopických simulací. Do simulačního modelu jsou zahrnuty podrobné parametry infrastruktury a jízdní řády. Pro podporu rozhodování v konfliktních situacích je vybaven pokročilým automatizovaným dispečinkem. V průběhu simulace lze sledovat vizualizaci plnění jízdních řádů a v čase

identifikovat situace, při kterých dochází ke konfliktním stavům v jízdním řádu a vzniku zpoždění. Mezi pokročilé funkce simulačního programu RailSys lze zařadit automatické vyhledávání bezkonfliktních tras, které je možné dodatečně vložit do sestaveného jízdního řádu. Primárně je tento produkt určen k ověřování robustnosti sestaveného jízdního řádu, ověřování provozních konceptů a propustnosti vybrané části infrastruktury (62).

Ostatní mikroskopické simulační nástroje

V této podkapitole jsou stručně popsány simulační nástroje, které nejsou vhodné pro další využití v této práci nebo k nim nejsou k dispozici dostatečně kvalitní literární zdroje pro zpracování analýzy. Jedná se například o SW DONS, který je určen k simulování průjezdu a výběru vhodných jízdních cest ve stanicích u vlaků ze sestaveného jízdního řádu (40). Softwarový nástroj RUT je využíván DB k řešení konfliktů tras. Obsahuje velmi podrobnou databázi infrastruktury (63).

Mezoskopické modely

Mezoskopické modely představují kompromisní přístup mezi makroskopickými a mikroskopickými simulačními modely. Umožňují modelování sítě pomocí agregovaných proměnných, které na rozdíl od mikroskopických modelů nesimulují přímo, ale podle dříve stanovených charakteristik. Zde se jedná především o kapacitní výpočty, či výpočty přepravních proudů v omezené oblasti. Provoz zde může být zastoupen množinou prvků, přičemž každý z těchto prvků reprezentuje jeden dopravní komplet. Jednotlivé množiny prvků jsou tvořeny prvky se stejnými vlastnostmi. Hlavní výhodou těchto modelů je minimalizace úsilí potřebného k výpočtu požadovaných výsledků. Tyto modely umožňují agregaci nebo úplné vynechání některých, ne zcela relevantních parametrů, které nejsou důležité pro naplnění účelu simulace (34, 64).

INCONTROL

Software INCONTROL je nizozemský mezoskopický simulační nástroj pro simulaci železničních sítí. V literatuře (65) je u tohoto produktu možné najít odkaz na systém SIMONE, ze kterého tento nástroj vychází. Simulační nástroj INCONTROL patří do skupiny simulačních nástrojů využívajících simulační platformu *Enterprise Dynamics*. Simulační program INCONTROL byl vyvinut pro nizozemského manažera infrastruktury ProRail. Nástroj INCONTROL umožňuje uživatelům simulovat velké železniční sítě na mezoskopické úrovni. Integrovaný nástroj flexibilní železniční simulace provozu FRISO umožňuje automatické generování kompletního simulačního modelu z datových zdrojů manažera infrastruktury.

Informace z datových zdrojů obsahují infrastrukturní parametry, údaje o kolejových vozidlech, jízdní řády vlaků a konfigurační data řízení provozu. V prostředí programu INCONTROL je možné simulovat činnost vlakového zabezpečovače NS'54, který je používán v Nizozemsku a také systémů ATB-NG a ETCS. Pohyb vlaků je modelován podle jejich fyzikálních vlastností a vnějších faktorů (sklon, odpor a napájení). Účinek lidského faktoru na provoz lze modelovat pomocí agentově orientované simulace. Výstupními funkcemi programu INCONTROL jsou například dráhové tachografy a diagramy obsazení kolejí. INCONTROL umožňuje vyhodnotit kvalitu jízdních řádů a infrastruktury. V roce 2018 byl do INCONTROL přidán modul, který simuluje činnost ATO. Modul vypočítá požadovaný rychlostní profil vlaku, aby vlak včas dosáhl plánovaných cílů (65).

Simulační nástroj, jak již bylo zmíněno, využívá zejména nizozemský manažer infrastruktury ProRail. Zajímavou vlastností simulačního nástroje je možnost simulace systémů automatického vedení vlaků, ale také agentově orientovaná simulace chování strojvedoucího.

SimuT

Tento simulační nástroj slouží pro ověřování kapacity tratí v českých podmínkách. Autory tohoto simulačního SW jsou Ing. Pavel Krýže, Ph.D. a Ing. René Amcha, kteří pracují pro Správu železnic, s. o. Nástroj je navržený tak, že hodnotí jednotlivé varianty pomocí vah kritérií. Počítačová simulace v SW SimuT je výhodná pro možnost univerzálního použití na jakémkoliv PC. Simulační program je dostupný v prostředí MS Excel, kde je možné také zadávat vstupy. Samotný SimuT je naprogramován pomocí programovacího jazyka Visual Basic. Tento simulační nástroj je možné využít k ověřování kapacity v souladu se směrnicí SŽDC SM 124. Vzhledem k užití v českých podmínkách, je výhodná možnost propojení tohoto simulačního nástroje se systémem sestav jízdního řádu KANGO, ze kterého lze prostřednictvím výměnných souborů rychle získat požadovaná data (66).

Kromě využití simulačního nástroje SimuT pro českého správce infrastruktury Správu železnic, s. o., byl tento simulační nástroj využit například i pro posouzení vlivu periodického jízdního řádu na kapacitu tratí (67).

Ostatní mezoskopické simulační nástroje

V této podkapitole jsou stručně popsány SW nástroje, které nejsou vhodné pro další využití v této práci nebo k nim nejsou k dispozici dostatečně kvalitní literární zdroje pro zpracování analýzy. Jedná se například o SW RTC (68), který je zaměřen na simulaci dispečerského řízení středně velkých dopravních sítí. Simulační nástroj STRELE (69) je určen především pro zkoumání kapacity hlavních tratí. Simulační SW STRESI (70) se používá

zejména pro konstrukci jízdního řádu na dvoukolejných tratích. Nástroj BABSÍ (69) je využíván k přidělování vlakových tras na základě jejich vhodnosti pro danou soupravu. MesoRail (71) je experimentální nástroj pro automatizovaný výpočet topologie tras na tratích, včetně přiřazení trasy ke konkrétním typům vozidel.

2.3 Zhodnocení a výběr vhodných simulačních nástrojů

Z analýzy vyplývá, že existuje rozsáhlé množství využitelných simulačních nástrojů. Základní podmínkou pro výběr simulačního nástroje je možnost implementace systému ATC do modelu. V návaznosti na závěry uvedené v kapitole 1, se autor rozhodl pro výběr simulačního nástroje, který umožní simulaci ETCS (případně CBTC), bez nutnosti zpracovávání externích výpočtů nebo používání vnořených simulací. Další podmínkou výběru vhodného simulačního nástroje je možnost simulace subsystémů ATO, které optimalizují spotřebu trakční energie a umožňují navádění vlaků do optimální (cílové) časové polohy.

Dalším krokem pro určení vhodného simulačního nástroje je stanovení požadované hladiny podrobnosti výsledného simulačního modelu. Autor pracoval s předpokladem, že v této disertační práci bude nutné provádět řadu velmi podrobných simulací. Pro optimální vypovídací schopnost výsledků simulací, bude v první fázi simulačních experimentů zkoumán vliv systémů ATC pouze na jednotlivé části železniční infrastruktury (staniční zhlaví, traťové koleje, staniční koleje). Teprve v navazujícím výzkumu bude vytvořen model, který bude zastupovat kompletní železniční síť. Proto se autor, z hlediska podrobnosti simulace, rozhodl pro využití mikrosimulačních nástrojů.

Z výsledků provedené analýzy vyplývá, že se jako vhodné jeví nástroje Villon, RailSys, PULsim, INCONTROL a OpenTrack. Simulační nástroj Villon umožňuje velmi podrobnou simulaci, je však určen spíše k provádění specifických simulací provozu dopravních terminálů (44, 48). Software RailSys by rovněž umožnil zpracování simulace na velmi podrobné úrovni, a přestože přímo nenabízí implementaci funkcí systémů ATC, nabízí rozsáhlou nabídku doplňkových modulů, kterými by bylo možné do modelu zahrnout i simulaci systémů ATC. Nevýhodou SW RailSys je, že je určen k přímému prověřování robustnosti již sestavených jízdních řádů, bez možnosti zasáhnout do průběhu simulace v jejich jednotlivých krocích (62). Dalším vhodným nástrojem je PULsim, který v podstatě umožňuje zahrnout všechny požadované parametry do modelu. Nástroj je však přizpůsoben přímo pro nizozemského manažera infrastruktury a z hlediska použití by bylo obtížné eliminovat národní specifika tohoto SW (62). Nástroj INCONTROL také splňuje kritérium implementace systémů ATC

do modelu. Z hlediska určení však tento nástroj nevyhovuje požadovanou podrobností simulace (65).

Posledním z vhodných simulačních nástrojů je OpenTrack. Tento nástroj splňuje kritérium možnosti implementace systému ATC do modelu i požadovanou podrobnost simulačního modelu. Tento nástroj zároveň umožňuje logickou výstavbu simulačního modelu, která dovoluje přenést do modelu specifické vazby různých zabezpečovacích systémů. Pro výběr tohoto nástroje hovoří i fakt, že autor má již značné zkušenosti s jeho používáním. Důležitým faktorem je také dostupnost programu pro zpracování této disertační práce. Ve školní laboratoři na Katedře technologie a řízení dopravy je k dispozici SW OpenTrack ve verzi 1.10. Tato softwarová verze plní všechny požadavky stanovené autorem pro výběr vhodného simulačního nástroje.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VĚDECKÉHO POZNÁNÍ

V této kapitole se autor věnuje analýze současného stavu poznání v oblasti simulačního modelování, s důrazem na implementaci systémů ATC do simulačního modelu. Očekávaným výsledkem této analýzy je možnost využití poznatků z již provedených studií k rozšíření vlastního výzkumu. Zároveň jsou v této kapitole uvedeny metody vědecké práce, které v těchto studiích našly uplatnění. Na základě této analýzy následně budou autorem vybrány metody zkoumání, které jsou uvedené v kapitole 5 a které umožní naplnění cíle disertační práce. Vzhledem k tomu, že ve světě existuje několik přístupů k řešení problematiky, stejně jako řada přístupů k technologii provozování železniční dopravy, jsou zkoumané vědecké publikace v následujícím textu rozčleněny z geografického hlediska.

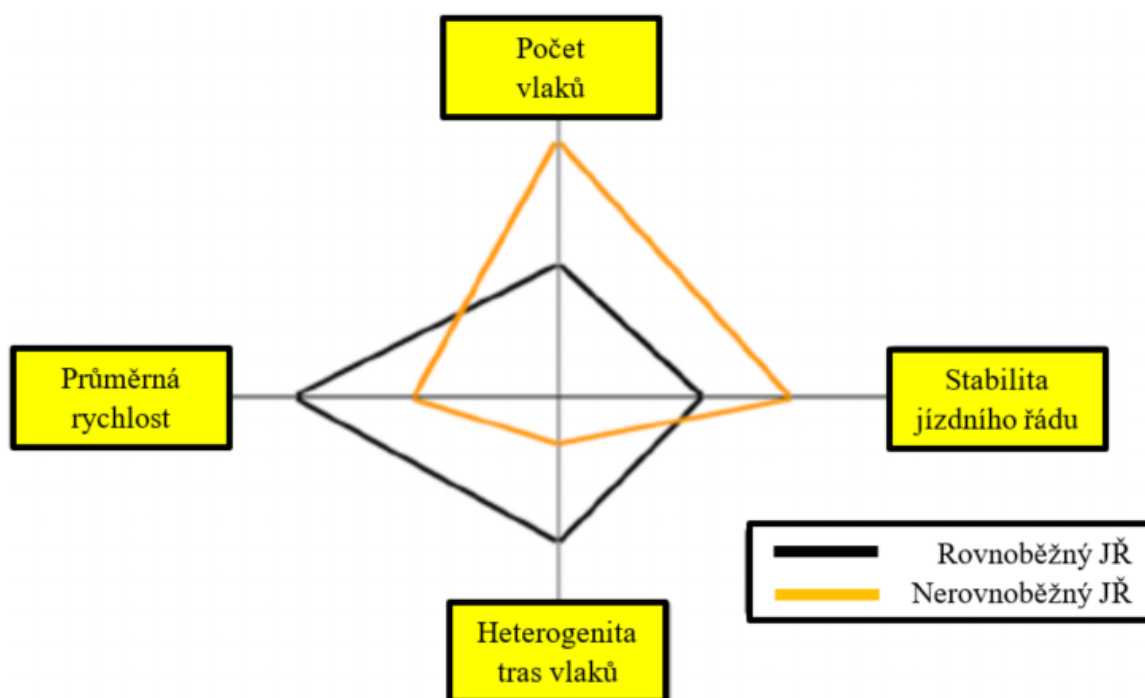
3.1 Analýza předpisů a norem vztahujících se ke kapacitě tratí

V této kapitole jsou analyzovány normy, které se zabývají určováním kapacity železničních tratí. Jejich znalost je klíčová pro správné vyhodnocení výsledků simulace, ale i z důvodu samotné tvorby simulace. Při výstavbě modelu je nutné nejdříve dekomponovat celý modelovaný systém a podle platných závislostí následně provést skladbu simulačního modelu. Simulační model musí respektovat obecné principy obsažené v těchto normách a předpisech, které se zabývají kapacitou tratí. V neposlední řadě je vždy přínosné výsledky simulací porovnat s výsledky dosaženými pomocí analytických metod.

V současné době je ke stanovování kapacity železniční dopravní cesty přístupováno podle jednotné metodiky obsažené v kodexu UIC 406. V České republice byla do roku 2019 pro výpočet propustné výkonnosti používána metodika stanovená předpisem SŽDC (ČSD) D 24 (tato metodika byla a je principiálně stále používána i na Slovensku, v podmínkách České republiky zůstávají v platnosti pouze její dílčí části). V roce 2019 byla vytvořena nová metodika zjišťování kapacity dráhy SŽDC SM 124 Zjišťování kapacity dráhy, která částečně vychází z kodexu UIC 406 a dále rozvíjí nové metody zjišťování kapacity dráhy. Metodika SŽDC SM 124 uvažuje i se simulací jako jedním z nástrojů pro určování kapacity dráhy. Kromě metod zabývajících se výhradně propustností železničních tratí, je zde popsána i směrnice SŽDC č. 104 Provozní intervaly a následná mezidobí, kde jsou stanoveny základní vztahy a technologické časy, které je rovněž nutné zahrnout do simulačního modelu.

Kodex UIC 406

Jeden z moderních přístupů ke zjišťování kapacity železničních tratí nabízí Kodex UIC 406 *Capacity*. Tento kodex je platný od 1. června 2004 a je určen pro všechny členy mezinárodní železniční unie – *International Union of Railways* (UIC). Kapacita dopravní infrastruktury (DI) je zde definována jako maximální možný počet tras vlaků uskutečnitelný v definovaném časovém období při zohlednění druhů a složení vlaků (heterogenita). Na druhou stranu kodex UIC 406 připouští, že pojem „kapacita“ neexistuje, protože záleží na způsobu, jakým je infrastruktura využívána. Pro stanovení kapacity kodex UIC 406 určuje základní faktory, které ji ovlivňují. Mezi tyto základní faktory patří počet vlaků, rychlost vlaků, stabilita jízdního řádu, heterogenita tras v sestaveném jízdním řádu. Výpočet kapacity je založen na vyhodnocení zkonstruovaného jízdního řádu. Jízdní řád může být zkonstruován bez ohledu na to, zda se jedná o existující infrastrukturu nebo o případovou studii nově navrhované infrastruktury, případně změn parametrů existující infrastruktury. Na obrázku 15 je uvedena bilance kapacity, jak je nastavena kodexem UIC 406 (72).



Obrázek 15 Kapacitní bilance dle UIC 406

Zdroj: (73) s úpravou autora

Kodex UIC 406 uznává dva přístupy ke stanovování kapacity. Jedná se o grafickou a analytickou metodu. Grafická metoda je založena na kompresi zkonstruovaných tras na minimální přípustné hodnoty provozních intervalů. Analytická metoda vychází ze dvou základních vztahů [1] a [2], které jsou detailněji popsány v publikaci (50). Vypočtená hodnota K [%] je následně porovnána s doporučenými hodnotami pro jednotlivé typy tratí.

$$k = A + B + C + D \quad [1]$$

kde: k ... celková doba využití infrastruktury [min],

A ... doba obsazení [min],

B ... doba mezery [min],

C ... doba mezery pro jednokolejné tratě [min],

D ... doba údržby [min].

$$K = \frac{k \cdot 100}{U} \quad [2]$$

kde: K ... využití kapacity [%],

k ... celková doba využití infrastruktury [min],

U ... výpočetní čas [min].

Kodex UIC 406 je založen, stejně jako většina moderních metod, na principu porovnání vypočítaných hodnot s definovanými doporučenými hodnotami, které udávají hraniční hodnotu ukazatele, která je ještě přípustná z hlediska zachování požadované kvality dopravního provozu. Tyto hodnoty jsou stanoveny na základě dlouhodobého výzkumu a provozních zkušeností. Nemohou však vždy reflektovat na další parametry ovlivňující kapacitu infrastruktury, jako například provozní spolehlivost infrastruktury a kolejových vozidel, provázanost provozu na zkoumané části infrastruktury s provozem na navazujících částech infrastruktury, požadovaná úroveň kvality (např. odřeknutí spoje v případě většího zpoždění), odchylky od stanovených jízdních dob, počet vlaků ve špičkovém intervalu, předjíždění vlaků, křížování vlaků a operativní řízení provozu (72). V tabulce 6 jsou uvedeny doporučené hodnoty využití kapacity na jednotlivých typech tratí.

Tabulka 6 Doporučené hodnoty využití kapacity dle kodexu UIC 406

Typ tratě	Využití kapacity		Poznámka
	Dopravní špička	Dopravní sedlo	
Segregovaná příměstská trať	85 %	70 %	Vysoký stupeň využití kapacity je možný z důvodu možnosti odřeknutí některých tras.
Segregovaná vysokorychlostní trať	75 %	60 %	
Trať se smíšeným provozem	75 %	60 %	Stupeň využití kapacity může být vyšší, pokud je nízký počet vlaků s vysokou heterogenitou.

Zdroj: (74) s úpravou autora

Pokud je výsledná hodnota výpočtů podle vztahů [1] a [2] nižší, než hodnoty doporučené v tabulce 6, lze předpokládat, že kapacita dané části infrastruktury není zcela využita. Kapacitní rezervu je však nutné prokázat dalším zkoumáním infrastruktury. Metoda je založena na tom, že se vkládáním dalších tras ověřuje možnost zkonstruování dodatečných tras vlaků. Tento pokus se opakuje do doby, než hodnota využití kapacity nedosáhne doporučených hodnot. Přístup založený na porovnání výsledků s mezními hodnotami stanovených ukazatelů je zahrnut i v české metodice SŽDC SM 124 (75).

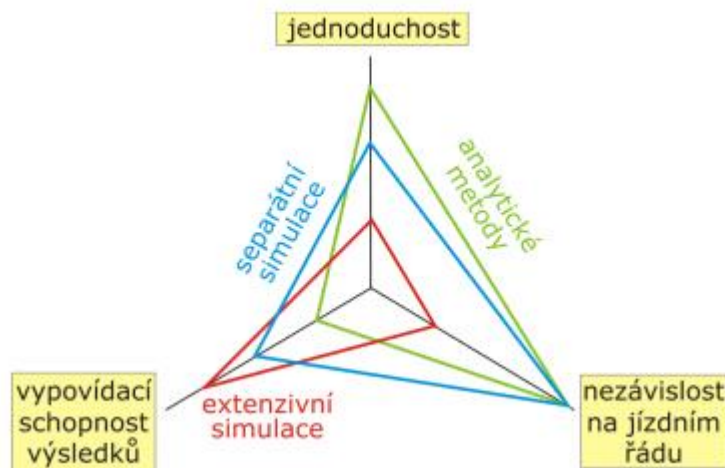
SŽDC SM 124

Ve směrnici jsou definovány základní pojmy, jejichž znalost je nezbytná pro pochopení jednotlivých výpočtů. Dále jsou popsány zásady, pomocí nichž jsou stanoveny jednotlivé metodiky zjišťování kapacity dráhy. Ve směrnici se rozlišují metody konstrukční, analytické a simulační. Simulační metody se dále člení na separátní a extenzivní simulaci. Pro každou metodu jsou stanoveny ukazatele, kterými lze hodnotit kvalitu provozu. Podle hodnoty ukazatele lze určit, zda zkoumané zařízení kapacitně vyhovuje nebo nikoliv. Pro definované ukazatele kvality jsou stanoveny limitní hodnoty ukazatelů, tam, kde to není možné nebo účelné, tyto limitní hodnoty stanoveny nejsou. V tabulce 7 je uveden vztah mezi mírou zatížení zařízení a hodnotou ukazatele kvality. Na obrázku 16 je uvedeno grafické srovnání základních charakteristik analytických metod, separátní a extenzivní simulace (75).

Tabulka 7 Funkce systému v jednotlivých stupních automatizace

Zatížení zařízení	Vztah zjištěných ukazatelů kapacity k příslušným limitním hodnotám	Úroveň kvality	Předpokládaná hodnota zpoždění
Zařízení s kapacitními rezervami	ukazatele kapacity jsou nižší než optimální hodnoty	optimální	pokles
přiměřeně zatížené zařízení	ukazatele kapacity dosahují optimálních hodnot		přibližně stejná
silně zatížené zařízení	ukazatele kapacity jsou vyšší než optimální a současně nižší než kritické hodnoty	riziková	nárůst
přetížené zařízení	ukazatele kapacity překračují kritické hodnoty	nedostatečná	výraznější nárůst

Zdroj: (75) s úpravou autora



Obrázek 16 Srovnání základních vlastností metod pro určování kapacity

Zdroj: (75)

Analytické metody popsané v této směrnici jsou navrženy pro určení kapacity traťových kolejí, staničních zhlaví a kolejových skupin. Separátní simulace a metoda přepočtu čekání na přírůstek zpoždění je určena pro určování kapacity traťových kolejí a staničních zhlaví. Extenzivní simulace je pak uchopitelná komplexněji a v závislosti na metodě se dá použít pro ucelený systém, který se skládá z traťových kolejí, staničních zhlaví a kolejových skupin. V metodice jsou taky navrženy hodnotící ukazatele kapacity. U analytických metod jsou to například: stupeň obsazení, propustnost, využití propustnosti, plánované čekání, stupeň obsazení a koeficient koliznosti. U simulačních metod se používá především hodnota přírůstku zpoždění. V závislosti na použitém simulačním nástroji, je možné uvažovat i o dalších ukazatelích hodnotících kvalitu dopravního provozu, jako například podíl dodržených přestupních vazeb nebo podíl odřeknutých vlaků (75).

Směrnice částečně implementuje postupy uplatněné v Kodexu UIC 406. Z hlediska tvorby této disertační práce je důležité, že jsou ve směrnici zakotveny i simulační techniky. Pro podporu výsledků simulace lze dále použít vybrané analytické metody.

Směrnice SŽDC č. 104

Směrnice SŽDC č. 104 (76) se zabývá stanovováním provozních intervalů a následných mezidobí. Znalost ustanovení této směrnice je klíčová z hlediska správné sestavy modelu. Ve směrnici jsou také stanoveny technologické časy k jednotlivým technologickým a dopravně-přepravním úkonům, které je nutné rovněž zahrnout do modelu. V této kapitole jsou definovány klíčové pojmy a možnosti výpočtu technologických časů, ale také vysvětlen význam technologických časů stanovených směrnicí, které jsou důležité pro sestavu simulačního modelu.

Prvním z klíčových pojmů je následné mezidobí. Jeho velikost se stanovuje jako maximum ze třech dílčích hodnot (dílčího mezidobí pro přední dopravnu, dílčího mezidobí pro zadní dopravnu a dílčího mezidobí pro trať). Následné mezidobí se souhrnně označuje proměnnou M a jeho hodnota se vypočte podle vztahu [3]. Dílčí mezidobí pro trať, je pak opět určeno jako maximum z dílčích mezidobí pro jednotlivé prostorové oddíly. Správné určení následného mezidobí je velmi důležité nejen pro výpočet kapacity, ale zejména pro konstrukci stabilního grafikonu a plynulost drážní dopravy. V podmínkách ČR se toto mezidobí vždy zaokrouhluje na půlminuty dle všeobecných zásad. Samotný výpočet však umožňuje určení tohoto mezidobí s přesností na sekundy (76).

$$M = \max(M_Z, M_P, M_T) \quad [3]$$

kde: M ... hodnota následného mezidobí [min],

M_Z ... dílčí mezidobí pro zadní dopravnu [min],

M_P ... dílčí mezidobí pro přední dopravnu [min],

M_T ... dílčí mezidobí pro trať (maximální hodnota z těchto mezidobí) [min].

Pojem provozní interval je definován jako nejkratší doba potřebná na splnění všech úkonů pro zajištění bezpečnosti a plynulé jízdy vlaků v místech, kde může dojít k vzájemnému ohrožení jízdy vlaků (konfliktu tras) v dopravnách a na širé trati. Provozní interval je tedy nejkratší možná doba mezi příjezdem, odjezdem nebo průjezdem prvního vlaku a příjezdem, odjezdem nebo průjezdem druhého vlaku. Délka provozního intervalu závisí na druhu zabezpečovacího zařízení, způsobu stavění jízdnicích cest, způsobu detekce celistvosti vlaku, na kolejovém uspořádání, na parametrech vlaků, na počtu a úkonech zúčastněných zaměstnanců a na výskytu přejezdů ovlivňujících hodnotu provozního intervalu. Hodnoty jednotlivých provozních intervalů a dílčích následných mezidobí se skládají z pěti dílčích časů (76). Při výpočtu těchto hodnot se postupuje podle vztahu [4].

$$M_{Z,P,T} = j_1 + r + p + j_2 + d \quad [4]$$

kde: M_Z ... dílčí mezidobí pro zadní dopravnu [min],

M_P ... dílčí mezidobí pro přední dopravnu [min],

M_T ... dílčí mezidobí pro trať (maximální hodnota z těchto mezidobí) [min],

j_1 ... jízda prvního vlaku k uvolnění místa ohrožení [min],

r ... doba rušení vlakové cesty po prvním vlaku [min],

p ... příprava vlakové cesty pro druhý vlak [min],

j₂... jízda druhého vlaku od obsazení [min],

d... dohlednost návěstidel nebo výprava druhého vlaku [min].

Vzhledem k tomu, že veškeré technologické časy nelze stanovit výpočtem, stanovuje tato směrnice technologické časy, jejichž hodnota je fixní a mění se pouze na základě stanoveného parametru (vzdálenost, druh vlaku, délka vlaku, obsazení vlaku, počet obslužných úkonů atd.). Mezi základní takto stanovené technologické časy patří doba přípravy vlakové cesty, doba přestavování výhybek, délky dopravních hovorů, doba zpoždění rozsvícení návěstidla, odhláška, změna traťového souhlasu, zjištění konce vlaku, dohlednost, výprava vlaku a doba reakce zabezpečovacího zařízení. Všechny tyto stanovené technologické časy musí být zapracovány do simulačního modelu, aby byla dosažena co nejvyšší přesnost výsledných hodnot simulací (76).

Shrnutí a porovnání používaných metod

Metody popsané v kodexu UIC 406 a směrnici SŽDC SM 124 stanovují základní principy k přístupu ke stanovení kapacity. Základními metodami jsou metody analytické. Tyto metody umožňují, při relativní jednoduchosti výpočtů, stanovení reálných předpokladů o možnostech kapacity vybrané části železniční infrastruktury. Obvykle se používají i pro prvotní výpočty v rámci případových studií, kde slouží pro nastavení základních kapacitních charakteristik zkoumaných úseků. Nevýhodou těchto metod je, že do nich nelze přesně promítnout specifické provozní podmínky a sestavený jízdní řád. Zároveň je v rámci těchto metod obtížné kvantifikovat doby nepřímého obsazení, vliv periodického jízdního řádu a omezení kapacity plynoucí z narůstající heterogenity vlaků. Analytické metody využívají ke stanovení kapacity především prostý výpočet počtu vlaků za výpočetní období. U metodiky dle UIC 406 se používá procentuální vyjádření. Metodika UIC 406 dokonce připouští tezi, že kapacita neexistuje. Analytické metody dle směrnice SŽDC SM 124 jsou vhodné pro rychlé stanovení kapacity dílčích částí infrastruktury, kde umožňují rychlé dosažení relativně přesných hodnot. Metodika UIC 406 je přesnější při vyjadřování spotřebované kapacity pro danou část sítě.

V případě analytických metod je však problematické popsat specifické jevy, které nastávají při konstrukci jízdního řádu. V tomto případě se jedná především o periodické jízdní řády, jejichž konstrukce může negativně ovlivnit kapacitu trati, aniž by to bylo možné zmíněnými metodami popsat. Zároveň je problematické do těchto výpočtů zahrnout přípojné vazby mezi vlaky a další technologické úkony. Z hlediska zpracování a dosažení konkrétních

výsledků disertační práce je u těchto metod nanejvýš problematické zařazení vlivu systémů ATC do výpočtu. Vliv systému ATC by bylo nutné zpracovat již při stanovování jízdních dob a tvorbě jízdního řádu. Vzhledem k tomu, že u ATC se jedná o dynamický systém, který v průběhu reálného provozu reaguje operativně na změnu vstupních parametrů, není využití analytických metod, jako hlavního prostředku pro stanovení vlivu systémů ATC na kapacitu tratí vhodné.

Metodiky dle UIC 406 a směrnice SŽDC SM 124 také uvažují s využitím simulačních SW pro určování kapacity železničních tratí. V metodice SŽDC SM 124 se simulace ještě dělí na separátní a extenzivní. Simulační metody umožňují lépe modelovat reálně sestavený jízdní řád i parametry infrastruktury. Jejich nevýhodou je výpočetní a časová náročnost na přípravu modelu a provedení dostatečného množství simulací. Výsledky simulačních metod zároveň neposkytují žádné optimální řešení. Vyhodnocení je tedy závislé na stanovených hraničních hodnotách ukazatelů a také na přístupu řešitelského týmu. Vzhledem k problematice zkoumané v této disertační práci jsou však simulační techniky vhodnější než analytické metody. Význam analytických metod výpočtu kapacity tratí však zůstává ve stanovení základního přehledu o kapacitě vybraných prvků infrastruktury. Jejich důkladná znalost je nutnou podmínkou pro sestavení simulačního modelu, který bude poskytovat kvalitní výsledky pro zpracování výzkumného cíle disertační práce.

3.2 Analýza stavu současného vědeckého poznání ve světě

Tato podkapitola se zabývá analýzou současného stavu poznání v oblasti simulačního modelování ve světě, respektive ve státech, kde je rozšířená železniční doprava. Podkapitola je dále členěna na studie obecně se zabývající výzkumem kapacity železničních tratí pomocí simulačních metod a na studie zabývající se simulováním systémů ATC. Vybrané publikace jsou, z hlediska implementace systémů ATP a ATO do modelu, zaměřeny především na systém CBTC a ERTMS.

Studie a publikace zabývající se výzkumem kapacity železničních tratí pomocí simulace ve světě

Studie dle zdroje (58) je zaměřena na simulaci provozu na vysokorychlostní trati Peking – Šanghaj. V této studii byl zkoumán vliv zkracování následných mezidobí na navýšení kapacity tratě. Výchozí následné mezidobí bylo stanoveno na 5 minut. Postupně byly simulovány scénáře, kdy bylo následné mezidobí sníženo postupně až na hodnotu 3 minuty. Omezujícím prvkem se ukázaly doby pobytu ve stanicích, proto při snížení hodnoty následného

mezidobí muselo být přikročeno ke zkracování těchto pobytů nebo vynechávání jednotlivých skupin zastávek. Zároveň, vzhledem k délce posuzovaného úseku (1318 km), nebylo možné komplexně simulovat celou délku trati. Zkrácením následného mezidobí z pěti na tři minuty by došlo k teoretickému navýšení kapacity o 72,7 %. Autoři studie využili pro zpracování simulací simulační nástroj PULsim (58).

Simulační metody využívají i autoři článku *Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules* (77). Článek se zabývá rozdíly mezi přístupy ke konstrukci jízdních řádů v Evropě a v USA. Autoři vyslovili hypotézu, že tvorba vysoce strukturovaného jízdního řádu, dle evropského vzoru vede k navýšení kapacity trati, při zachování požadované úrovně kvality jízdního řádu. Cílem této studie bylo prozkoumat možnosti využití evropského přístupu pro zlepšení kapacity na tratích v USA. Tato studie využívá hybridní simulační přístup. Výsledky simulace v americkém simulačním nástroji RTC se používají jako vstup pro simulaci jízdního řádu pomocí evropského simulačního nástroje RailSys. Autoři stanovili celkem 28 simulačních scénářů a provedli celkově 12 000 replikací. Výsledky studie však nebyly v oblasti kvantifikace navýšení kapacity trati jednoznačné. Sestava jízdního řádu pomocí nové metodiky však zajistila zvýšení kvality dodržování jízdního řádu (77).

Ve studii zpracované autorem – Francesco Rotoli (78), jsou uvedeny různé přístupy k určování kapacity v rámci Evropské unie. Je zde zdůrazněna nejednotnost užívaných metodik a potřeba jejich sjednocení. Ve studii jsou shrnuty základní metody využitelné pro stanovování kapacity tratí, které respektují metodiku uvedenou v kodexu UIC 406. Jsou zde popsány syntetické a analytické metody, které popisují kapacitu prostým použitím matematických rovnic, bez použití simulace. Dalšími popsanými metodami jsou asynchronní metody, které využívají pro určení kapacity existující jízdní řád. Optimalizací a doplňováním dalších tras vlaků do sestaveného jízdního řádu je určena praktická propustnost a doba mezer. Synchronní metody (simulační metody) umožňují nejlepší popis skutečnosti a ověření praktické propustnosti vybrané části infrastruktury. Autoři se odkazují na dynamické simulační SW, jako jsou OpenTrack, RailSys a Rail Traffic Controller (78).

Ve studii autora Fabrizio Cerreto (79) se pojednává o stanovení ukazatelů kapacity a jejich vyhodnocení při použití mikrosimulačních metod. Mezi ukazatele, které autor do studie zahrnuje, patří stupeň využití kapacity (dle UIC 406), celkové zpoždění, doba mezery, počet zpožděných vlaků a doba průměrného zpoždění. Citlivost jednotlivých ukazatelů robustnosti sestaveného jízdního řádu na primární zpoždění se odhaduje pomocí regresní analýzy. Dispečerské řízení je ze simulace záměrně vyjmuta a v případě zpoždění je pořadí vlaků

určováno systémem *First-In First-Out*. Pro sestavu modelu a následnou simulaci je v této studii využít SW OpenTrack. Verifikace modelu a stanovení míry citlivosti navržených ukazatelů je následně provedena na případové studii provozu na trati z Haagu do Rotterdamu (79).

Vědecký článek kolektivu autorů Vaahida Ranjbara, Nilse O. E. Olssona a Hanse Sepilä (80) je zaměřený na vliv zabezpečovacích systémů na kapacitu trati. V tomto článku je provedeno srovnání zabezpečovacích systémů původní koncepce a systémů ETCS L2 a hybridního systému ETCS L3 (HL3). Je zároveň proveden popis těchto systémů a využita možnost rozdělení trati do virtuálních prostorových oddílů bez použití konvenčních prvků pro zjišťování volnosti úseků. Cílem článku je vyčíslení skutečné spotřeby kapacity na jednotlivých úrovních prostřednictvím mikroskopické simulace. Prostřednictvím simulace byly prováděny experimenty na třech předem zvolených simulačních scénářích (80):

- 1. scénář – simulace a vyhodnocení výsledků původního švédského národního vlakového zabezpečovače ATC 2.
- 2. scénář – simulace a vyhodnocení na stejné trati s využitím systému ETCS L2.
- 3. scénář – simulace a vyhodnocení na stejné trati s využitím systému ETCS HL3.

Výsledkem článku je porovnání jednotlivých provozních scénářů podle parametrů: doba obsazení, stupeň obsazení, spotřebovaná kapacita, minimum následného mezidobí, srovnání se systémem ATC 2. V tabulce 8 je provedeno porovnání celkových výsledků.

Tabulka 8 Srovnání výsledků simulace systémů ATC2, ETCS L2 a ETCS HL3

Parametr srovnání	ATC 2	ETCS L2	ETCS HL3
doba obsazení [s]	3090	2805	2247
stupeň obsazení [%]	43	39	31
spotřebovaná kapacita [%]	51	46	37
následné mezidobí [s]	104	94	77
srovnání následného mezidobí [%]	100	90	74

Zdroj: (80) s úpravou autora

Studie a publikace zabývající se simulováním systémů ATC ve světě

Studie dle zdroje (81) se zabývá vlivem systému CBTC a systémem pozitivního řízení vlaků – *Positive Train Control* (PTC) na kapacitu tratí. Studie vznikla v kontextu zvyšujících se přepravních nároků v oblasti nákladní dopravy v USA. Zabývá se kvantitativními a kvalitativními faktory ovlivňujícími kapacitu tratí. Obdobně jako evropské studie zahrnuje mezi ukazatele kapacity praktickou a teoretickou propustnost a jako ukazatel kvality dopravního provozu míru přírůstku zpoždění. Pro simulaci je zde využít nástroj *Rail Traffic Controller* (RTC). Metodou vnořené simulace, pomocí nástroje *Train Performance Calculator*

(TPC), jsou do modelu zahrnuty vlivy systémů ATP a ATO. Autor studie došel k závěru, že systémy ATP a ATO mají přímý vliv na kapacitu. Dosažené výsledky se liší podle uvažovaného provozního scénáře a nastavení brzdných křivek. Proto autor stanovil závěr, že je nutné jejich vliv na kapacitu tratí posuzovat individuálně pro každou železniční síť (81).

Studie podle zdroje (82) se zabývá implementací jednotlivých aplikační úrovní ETCS a jejich vlivem na kapacitu tratí. Ve studii jsou rozvedeny především aplikační úrovně L2 a L3. Autoři, na základě provedených simulací, předpokládají potenciál navýšení kapacity tratí při použití těchto systémů, za předpokladu vyšších traťových rychlostí (nad 200 km·h⁻¹). Autoři k prokázání této teze však využívají pouze analytické metody výpočtů a o simulaci se zmiňují pouze jako o jedné z možností řešení (82).

Obdobně ve studii W. A. M. Bartera (83), která se zabývá srovnáním aplikační úrovně ETCS L2 s konvenčními systémy ATP, je použito především analytických metod. Autoři, na základě analytických metod výpočtu, došli k závěru, že na síti s charakterem příměstské železnice může dojít k reálnému navýšení kapacity až o 10 %. Případová studie je zpracována pro vybrané příměstské tratě v okolí Londýna. Simulační metody jsou zde autory doporučeny pro podporu výsledků zjištěných metodami analytickými, nicméně simulace ve studii aplikovány nejsou (83).

Další analyzovaná studie (84) se zabývá srovnáním provozování konvenčních systémů ATP a systému ERTMS v jednotlivých aplikačních úrovních systému ETCS. Nárůst kapacity železniční trati je zde prokázán pouze v aplikační úrovni ETCS L3. U ostatních aplikačních úrovní je zaznamenán minimální rozdíl oproti stávajícím systémům a v závislosti na nastavení brzdných křivek se připouští i mírné zhoršení kapacity trati. V této studii bylo pro potvrzení teoretických výpočtů využito simulace v SW OpenTrack. Jako klíčový faktor se ukázalo nastavení brzdných křivek pomocí nástroje EraTool a jejich následné vložení do modelu (84).

Další studie se zabývá posouzením kapacity tratě Záhřeb – Rijeka M 202 (Chorvatsko), která je součástí sítě TEN – T. Záměrem studie bylo určit možnosti výhledového navýšení kapacity po rekonstrukci tratě a zavedení ETCS. Ve studii byla provedena změna organizace dopravy tak, aby byla navýšena kapacita trati pro nákladní dopravu. Simulací v SW OpenTrack bylo prokázáno, že rekonstrukcí tratě a změnou organizace dopravy by došlo k navýšení volné kapacity tratě pro nákladní dopravu přibližně o 23 %. Studie však nezkoumá přímo vliv ETCS, ale celkový vliv rekonstrukce tratě, což výsledek podstatně zkresluje (59).

Následující studie je zaměřena na rekonstrukci tratě R 201 Zaprešić – Zabok (Chorvatsko). Pomocí SW OpenTrack byl simulován výhledový jízdní řád. Součástí studie bylo také posouzení výběru vhodného vlakového zabezpečovače. Při simulaci jednotlivých scénářů

však nebyl jednoznačně prokázán přínos implementace systému ETCS oproti národnímu vlakovému zabezpečovači. Ve studii byly zhodnoceny přínosy rekonstrukce trati, vzhledem ke zvýšení atraktivity tratě a k nárůstu její kapacity. Stejně jako v předcházející studii však nebyl simulací prokázán přímý vliv ETCS na navýšení kapacity trati (60).

Vědecký článek kolektivu autorů Mustafa S. Durmuş, Uğur Yıldırım, Mehmet T. Söylemez (12) je zaměřen na modelování provozu vlaků v pohyblivých prostorových oddílech. Analytická část je věnována popisu vzniku systému ERTMS a jeho budoucí podobě. Zejména je zaměřena na systém ETCS L3. Autoři využívají hybridní simulačního modelování pomocí techniky známé jako dávkově řízené Petriho sítě – *Batches Petri Nets*. Výsledkem studie je sestavení modelu zkoumající závislost jízdy následného vlaku na jízdě prvního vlaku. Výzkum je podpořen případovou studií, která modeluje provoz na vysokorychlostní trati (12).

Doktorská práce autora Nicola Coviello se zabývá přímo vlivem ETCS a heterogenity vlaků na praktickou propustnost jednokolejných tratí. Výsledky teoretické části této práce jsou následně ověřeny na případové studii Trans-mongolské železnice. Autor stanovuje zajímavou metodiku výzkumu, kdy nejprve trať rozdělí na dílčí úseky, včetně funkčních systémů jako jsou stanice a traťové koleje. Tyto dílčí části jsou následně, pomocí analytických metod, podrobeny výpočtu praktické propustnosti. Teoreticky dosažené výsledky jsou následně podrobeny simulaci v SW RailSys, pro který je sestaveno přibližně dvacet provozních scénářů. Každý z těchto scénářů je poté, pomocí techniky násobné simulace, podroben řádově stovkám replikací s náhodně se měnícím vstupním zpožděním vlaků vstupujících do systémů. Autorem bylo zjištěno, že vliv na praktickou propustnost má především heterogenita vlaků a počet vlaků jedoucích ve svazku. Vliv ETCS na kapacitu jednokolejných tratí byl vyhodnocen jako zcela zanedbatelný (85, 86).

3.3 Analýza stavu současného poznání v podmínkách České a Slovenské republiky

Tato podkapitola se zabývá analýzou současného stavu poznání v oblasti simulačního modelování v ČR. Vybrané publikace jsou z hlediska implementace systémů ATP a ATO do modelu, zaměřeny především na systém ERTMS.

První z analyzovaných vědeckých prací je disertační práce na téma Vliv periodického jízdního řádu na kapacitu tratí (66), která vznikla na Katedře technologie a řízení dopravy Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice. Zabývá se vlivem periodicity JŘ na kapacitu trati. Pro sestavení simulačního modelu autor práce využil simulační nástroj SimuT. Součástí práce je i analýza ostatních simulačních nástrojů. V rámci práce jsou

simulovány jednotlivé periodické jízdní řády na předem stanovených vozebních ramenech. Výstupem simulace jsou počty vlakových tras, průměrné přírůstky zpoždění a ukazatele dle směrnice SŽDC (ČSD) D24. Autor práce z výsledků simulace vypočítal i kapacitní ukazatele dle UIC 406. Bylo zjištěno, že rostoucí periodicitu jízdního řádu nemá podstatný vliv na kapacitu železničních tratí. V disertační práci byly využity tyto metody vědecké práce: modelování dopravních systémů, simulace, počítačová simulace a metody multikriteriální analýzy (66).

Další z analyzovaných prací je disertační práce na téma Modelové řešení dopravní infrastruktury v závislosti na rozsahu dopravního provozu (87). Stejně jako předcházející vědecká práce, vznikla i tato práce na Katedře technologie a řízení provozu. V této disertační práci se autor zabývá vztahem mezi kapacitou dopravní infrastruktury a rozsahem dopravního provozu v železniční dopravě. Autor rovněž využívá jako hlavní výzkumnou metodu simulaci pomocí simulačního nástroje SimuT. Hlavními řešenými problémy jsou kapacita tratí, rozsah dopravního provozu a jejich vliv na kvalitu a stabilitu dopravního systému. Autor prokázal, že snížení rozsahu dopravní infrastruktury a zvýšení rozsahu dopravního provozu má negativní vliv na kvalitu a stabilitu dopravního provozu. Autor disertační práce využil metody dopravního modelování, simulace, počítačové simulace a metody multikriteriální analýzy (87).

Třetí z analyzovaných vědeckých prací je disertační práce na téma Metodika budování škálovatelných simulačních modelů železničních systémů. Tato práce vznikla na Fakultě elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Na rozdíl od přecházejících vědeckých prací přistupuje k simulačnímu modelování z jiného úhlu pohledu. Práce se zabývá simulačními SW a jejich vhodností pro jednotlivé typy simulací. Konkrétně se zabývá metodikou budování škálovatelných simulačních modelů železniční dopravy. V různých oblastech zkoumání železniční sítě jsou modelovány na mikroskopické úrovni i oblasti, kde postačují pouze hrubé charakteristiky na makroskopické úrovni. Autor v práci navrhl hybridní metodiku ScalRail, která využívá možnosti kombinace simulací s různou úrovní podrobnosti (87).

Na Fakultě elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice se kolektiv autorů Antonín Kavička, Michal Bažant a Roman Diviš zabývá simulací železničního provozu s využitím metody počítačové simulace. Autoři se zabývají například výběrem a úpravou simulačního nástroje podle účelu, ke kterému budou sloužit. Z hlediska simulace kapacity tratí se autoři zabývají výzkumem spíše v oblasti propustnosti železničních stanic a jejich zhlaví. Například v článku (88) autoři zpracovávají studii menší železniční stanice, kde zkoumají efekty různých provozních scénářů na kapacitu jednotlivých prvků stanice. Použití simulace

v SW OpenTrack porovnávají s metodikou dle UIC 406. Studie naznačuje vhodnost využití kombinace simulačních a analytických metod jako metody vědecké práce (88).

Ve vědeckém článku (89), hovoří autoři o mikrosimulaci jako o nástroji pro hodnocení infrastruktury a alternativ různých provozních konceptů v rámci železničního uzlu. V tomto vědeckém článku je detailně popsán postup práce při dopravním modelování pomocí simulačního nástroje OpenTrack. Autoři popisují provádění mikrosimulací na specificky uspořádaném železničním uzlu Brno. Pomocí mikrosimulací autoři ověřují jednotlivé úpravy dopravní infrastruktury a jejich vliv na provoz (89).

Kolektiv autorů Peter Marton a Norbert Adamko se věnují problematice simulace technologických procesů a kapacity multimodálních terminálů. Pro simulace používají mikrosimulační nástroj Villon. V konferenčním příspěvku, podle zdroje (44), autoři nástroj Villon detailně popisují, včetně postupu vytvoření simulačního modelu. V další publikaci, respektive odborném článku se autoři věnují přímo návrhu multimodálního terminálu při využití mikrosimulace v programu Villon. V této práci je nastíněna možnost využití simulačních technik jako nástroje strategického plánování (90).

Další z analyzovaných vědeckých prací (91) se zabývá možnostmi posouzení kapacity vybraného traťového úseku na slovenské železniční síti po implementaci ETCS L3. Pro posouzení byla využita metodika ŽSR, založená na analytickém posouzení a vlastní heuristický postup. Pro případovou studii byla zvolena železniční trať Štúrovo-Bratislava. Na vybraném úseku byl posuzován národní vlakový zabezpečovač a postupně všechny aplikační úrovně ETCS. Autoři došli k závěru, že významné zlepšení kapacity trati, která je v současnosti vybavená automatickým blokem, přinese až vybavení trati ETCS v aplikační úrovni L3 (91).

Ve vědeckém článku autorů Michala Bažanta a Josefa Bulíčka (92) je posuzován vliv dopadů implementace zabezpečovacích systémů na jednokolejných tratích jako opatření ke zvýšení spolehlivosti železničního dopravního systému. Posuzuje se vliv instalace traťového zabezpečovacího zařízení typu automatické hradlo nebo automatický blok. Autoři vycházejí z hypotézy, že kladný vliv instalace těchto systémů bude mít kladný vliv i v případech, kdyby byl na trati použit pohyblivý blok např.: CBTC, ETCS L3. Byly zvoleny následující případy: jízda vlaku v celém mezistaničním úseku, rozdělení trati na dva úseky – automatickým hradlem, rozdělení trati na více úseků – automatickým blokem, zavedení pohyblivého bloku, zdvoukolejnění tratě. Sledované byly následující parametry hodnocení kvality jízdního řádu: teoretická kapacita a stupeň obsazení. Autoři článku došli k závěru, že problematika kapacity železničních tratí v kontextu kvality (stability) provozu je zajímavé téma i v případě

železničních tratí se střední intenzitou provozu. Pro komplexní posouzení kapacity se přesto doporučuje sestavit konkrétní simulační model obsahující všechna místní specifika. Na druhou stranu tento výzkum tvoří základ pro hledání způsobů využití jednokolejných tratí v operativním systému řízení železniční dopravy. Každý konkrétní scénář byl podroben simulaci pomocí SW OpenTrack (92).

3.4 Závěry a shrnutí současného stavu vědeckého poznání

Simulační modelování je jedním z dostupných nástrojů pro posuzování kapacitních možností železniční infrastruktury. V letech 2005–2015 bylo ve Spojených státech a v Evropě zpracováno více než 50 studií posuzujících kapacitu. Přibližně 65 % z těchto studií využívá simulačních nebo kombinovaných metod. Pro simulaci jsou využívány simulační nástroje OpenTrack (Švýcarsko), MultiRail (Spojené státy), RAILSIM (Spojené státy), SIMONE (Nizozemí), RailSys (Německo), DEMIURGE (Francie), RAILCAP (Belgie) a CMS (Velká Británie). Z podrobně rozebraných 25 studií byl ve 14 případech proveden alespoň částečně validační proces, ale u pouhých dvou studií došlo k jejich úplné validaci na základě zkušeností z jejich implementace do praxe. Zároveň bylo zjištěno, že neexistuje zcela identický přístup k posuzování kapacity pomocí simulace. V jednotlivých studiích se vždy odrážejí národní specifika a přístup k řízení železničního provozu (93).

Při posuzování kapacity železničních tratí, případně multimodálních terminálů, používají autoři vědeckých prací, odborných článků a konferenčních příspěvků analytické metody práce, dopravní modelování, počítačovou simulaci, metody kompozice a dekompozice systému a multikriteriální analýzu. Z hlediska metodiky byly pro posouzení vlivu zavedení systémů ATC, v analyzovaných vědeckých pracích, využity primárně analytické metody. Jejich vypovídací schopnost je však omezená. V této disertační práci jsou využity metody vědecké práce popsané v analyzovaných vědeckých příspěvcích, tyto metody jsou modifikovány pro potřeby výzkumu vlivu zavádění systémů ATC na železničních sítích různých provozovatelů drah. Prvním krokem praktické (návrhové) části práce je, v souladu s analyzovanými studii, dekompozice systému a následné sestavení reprezentativních funkčních celků. Aby bylo možná detailně zkoumat vliv provozu systémů ATC na kapacitu tratí, jsou v této práci postupně modelovány jednotlivé části tratě (širá trať, stanice, staniční zhlaví atd.). Pro každou dílčí část je provedena simulace v SW OpenTrack. Stejně jako v analyzovaných vědeckých příspěvcích, je autorem prověřen výchozí stav a různé provozní scénáře. Následně je zkoumán a hodnocen vliv zavádění systémů ATC na kapacitu tratí. Dále

jsou v práci využity zjištěné poznatky o stanování brzdných křivek pro jednotlivé systémy a také nástroj EraTool.

Analýza dosud zpracovaných vědeckých prací, přinesla možný náhled na uchopení dané problematiky pro zpracování disertační práce. Pro zpracování a dosažení navrhovaného cíle této disertační práce jsou použity tyto metody vědecké práce: dekompozice systému, modelování dopravního systému, počítačová simulace a statistická analýza. Tyto metody jsou detailněji popsány v kapitole 5.

V rámci analýzy vědeckých prací, vědeckých článků, konferenčních příspěvků a sborníků nebyly autorem nalezeny dostatečně vypovídající publikace, které by se zabývaly daným tématem v podmínkách České a Slovenské republiky. Pokud se systémy ATC někdo zabýval, tak se jednalo spíše o popis skutečného stavu, nikoli o zkoumání jeho vlivu na provoz. Reálný význam tohoto systému nebyl v analyzovaných pracích vědecky zhodnocen. Vzhledem k tomu, že simulace vlivu systémů ATC na kapacitu železničních tratí nebyla v žádné práci realizované v České ani Slovenské republice řešena, potvrzuje se názor autora, že téma a cíl disertační práce jsou nastaveny správně a že výsledky přinesou rozšíření vědeckého poznání.

4 DEFINICE CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Na základě provedené komplexní analýzy současného stavu vývoje systémů automatické kontroly jízdy vlaku, současného stavu v oblasti používání simulačních nástrojů a analýzy současného vědeckého poznání definoval autor cíl disertační práce. Autor se v práci zaměřil na dva dominantní systémy automatické kontroly jízdy vlaku, kterými jsou systémy CBTC a ETCS. Prostřednictvím analýzy dostupných systémů pro simulaci železničního provozu byl také vybrán vhodný simulační nástroj pro vytvoření simulačního modelu. V poslední části analýzy se autor věnoval současnému stavu vědeckého poznání. Touto analýzou bylo prokázáno, že doposud zpracované a publikované vědecké práce a příspěvky se zabývají obdobnými tématy pouze částečně, nebo používají odlišné metody zpracování, než jsou použity v této disertační práci.

Cílem disertační práce je návrh simulačního modelu pro provoz vlaků pod dohledem systémů automatické kontroly jízdy vlaku. Pomocí výsledků tohoto modelu je hledána míra vlivu implementace těchto systémů na kapacitu tratí.

Prostředkem pro dosažení cíle disertační práce je simulační model vytvořený v simulačním nástroji OpenTrack. Model je navržen tak, aby bylo možné kapacitu posoudit komplexně. Proto je simulační model rozdělen do třech níže uvedených úrovní:

- traťová část – první úroveň (T),
- staniční zhlaví – druhá úroveň (S),
- kombinovaná část – třetí úroveň (K).

Jednotlivé úrovně mají stanoveny vlastní hodnotící ukazatele, pomocí kterých je možné posoudit vliv implementace systémů automatické kontroly jízdy vlaku na kapacitu v dané úrovni simulace. Pro možnost porovnání vlivu zavádění jednotlivých systémů automatické kontroly jízdy vlaku, je každá z úrovní ještě rozdělena na tři varianty:

- referenční varianta,
- přechodová varianta,
- cílová varianta.

Při definování simulačního modelu, při jeho zpracování a při vyhodnocení výsledků jsou využity metody popsané v kapitole 5. Tříúrovňový simulační model je detailně popsán v kapitole 6, kde jsou také uvedeny dosažené výsledky a provedeno jejich vyhodnocení. Pro ověření validity (platnosti) simulačního modelu je disertační práce doplněna o případovou studii (simulaci reálné infrastruktury), která je uvedena v kapitole 7.

5 ZVOLENÉ METODY ZKOUMÁNÍ A ZPŮSOB ŘEŠENÍ

V této kapitole jsou popsány metody vědecké práce, které budou autorem využity při zpracování této disertační práce. Výběr metod vychází částečně z analýzy stavu současného poznání a částečně z autorových zkušeností v oblasti výzkumu kapacity železničních tratí. Autor na základě vlastních zkušeností se simulováním předpokládá, že v průběhu zpracování disertační práce bude nutné vybrané metody modifikovat. V podkapitolách (5.1, 5.2, 5.3 a 5.4) jsou uvedeny základní charakteristiky využitelných metod. Charakteristika každé metody je vždy doplněna o konkrétní možnosti jejich aplikace v této disertační práci.

5.1 Dekompozice systému

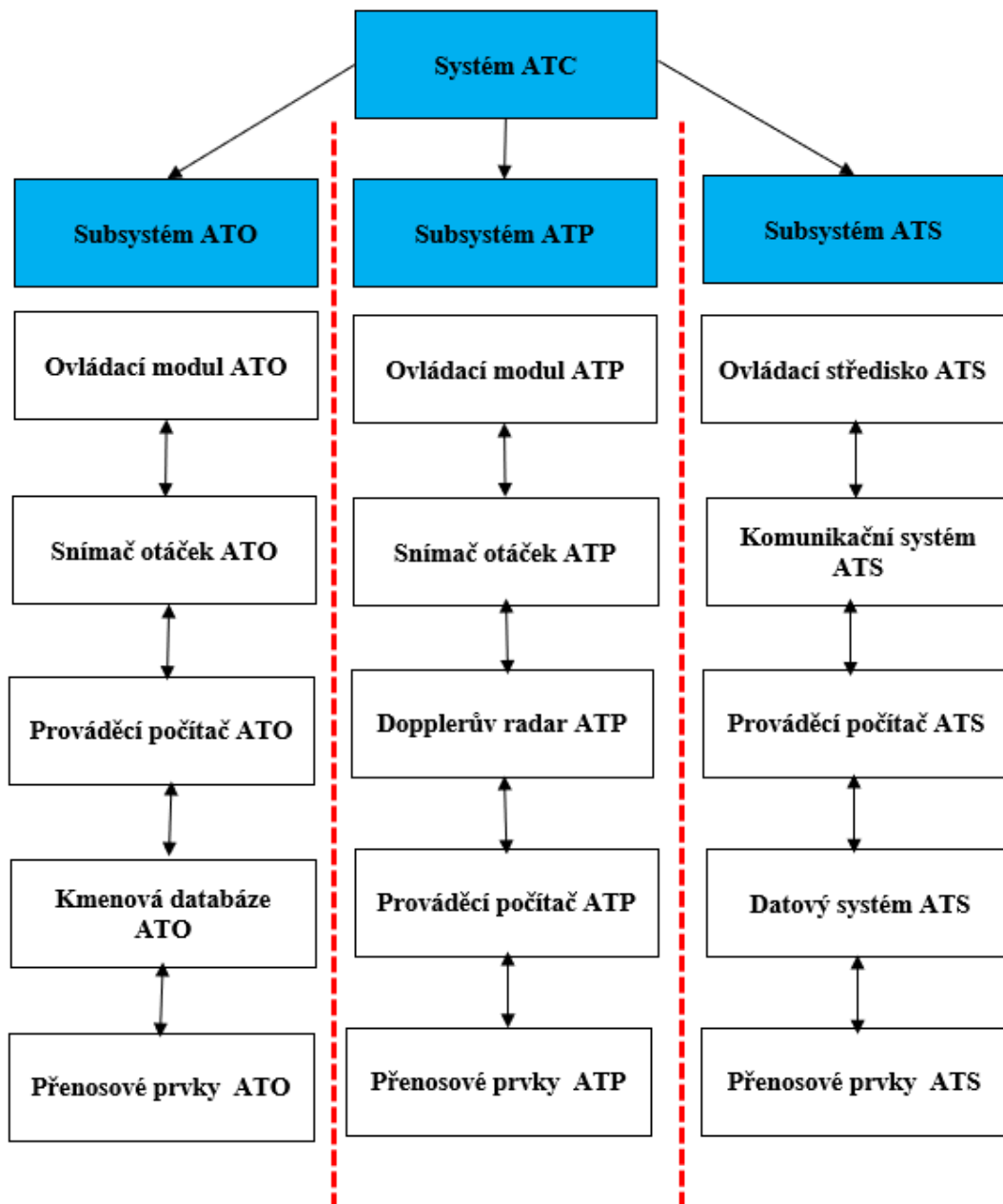
Dekompozice je úlohou systémové analýzy, při které se řeší rozklad systému na dílčí subsystémy. Rozklad se provádí podle předem daných hledisek. Při rozkladu je zapotřebí dodržet tři základní pravidla. První pravidlo je pravidlo integrity, kdy při dekompozici systému nesmí dojít ke ztrátě jakékoli části systému. Druhé pravidlo je pravidlo soudržnosti, které říká, že z dekomponovaného systému musí jít opět sestavit původní systém. Třetí pravidlo je pravidlo rovnoměrnosti. Toto pravidlo říká, že dekomponované části mají být přibližně stejně složité. Z hlediska členění lze rozlišit dekompozici topologickou, funkční, věcnou a hierarchickou (94 s. 24-26; 95 s. 65). V následujícím textu jsou jednotlivé typy dekompozic popsány a jsou aplikovány na zvolený systém. V tomto případě bude dekomponován systém ATC.

Topologická dekompozice

Nejdůležitějším aspektem topologické dekompozice je minimalizace dekomponovaných částí s okolím systému. Systém ATC automatické kontroly jízdy vlaku se dekomponuje na další 3 subsystémy.

1. Subsystém ATS – automatický dohled nad všemi vlaky v řízené oblasti.
2. Subsystém ATP – automatická ochrana vlaku (vlakový zabezpečovač).
3. Subsystém ATO – automatické vedení vlaku.

V souladu s pravidlem rovnoměrnosti je systém správně dekomponován na tyto tři části. Schématické znázornění topologické dekompozice systému ATC je uvedeno na obrázku 17.



Obrázek 17 Topologická dekompozice systému ATC

Zdroj: autor

Funkční dekompozice

Funkční dekompozice je charakteristická tím, že jednotlivé dekomponované části vykonávají určité skupiny funkcí, které se označují jako makro funkce. V případě zvoleného systému ATC jsou dekomponované čtyři části:

1. subsystém výpočetní – prováděcí počítače, kmenové databáze a datový systém,
2. subsystém komunikační – přenosové prvky a komunikační systém,
3. subsystém měřící – snímače otáček a Dopplerův radar,
4. subsystém prováděcí – prováděcí počítače.

Věcná dekompozice

Při věcné dekompozici se systém dekomponuje obsahově. Proto se jí také někdy říká obsahová, případně sémantická dekompozice systému. Dekomponované části systému jsou tvořeny prvky se stejnými vlastnostmi. Z hlediska společných vlastností, lze systém ATC dekomponovat na následující subsystémy:

1. subsystém počítačový – prováděcí počítače,
2. subsystém paměťový – databáze a datový systém,
3. subsystém měřících zařízení – snímače otáček a Dopplerův radar (odometrie),
4. subsystém komunikační – přenosové prvky a komunikační systém.

Hierarchická dekompozice

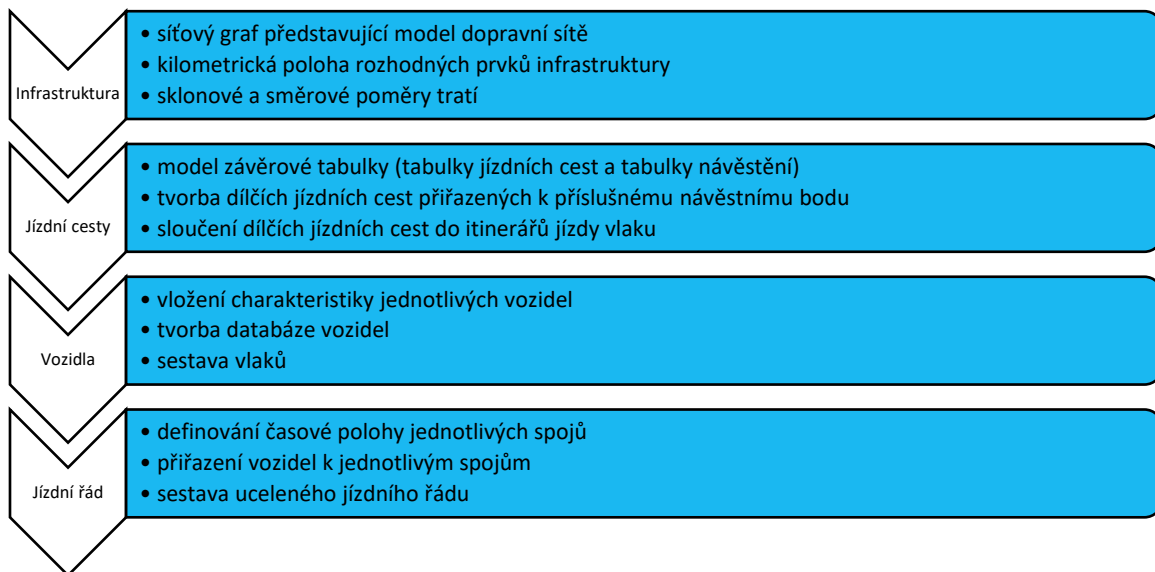
Tato dekompozice má uplatnění, jak již název napovídá, u systémů, které mají nějakou vnitřní hierarchii. Dekompozice se provádí buďto po vrstvách, kdy je dekomponována část systému tvořená prvky ze stejné hierarchické úrovně, nebo po větvích, kdy je dekomponovaná část systému tvořena prvky dané větve. Hierarchická dekompozice není pro popis systému ATC zcela vhodná. Systémy ATC nepředstavují typický hierarchický systém a také se v něm vyskytují zpětné vazby, které se při hierarchickém uspořádání systému nedají dostatečně dobře popsat.

Využití dekompozice systému

Z hlediska zjištění struktury vazeb v systémech ATC je základním předpokladem úspěšného sestavení modelu provedení dekompozice systému. Stejným způsobem může být provedena dekompozice simulačního modelu. Dekompozice simulačního modelu potom vychází z poznatků zjištěných při analýze používaných předpisů a norem, které řeší kapacitu tratí. Metoda dekompozice systému je zde využita pro zjištění klíčových prvků systémů, ze kterých bude sestaven simulační model, a které mohou mít vliv na kapacitu železničních tratí. Tyto klíčové prvky jsou potom východiskem pro selektivní aproximaci zpracovávaného modelu. Tato aproximace je nezbytná pro účelnou sestavu modelu, která umožňuje zahrnout do modelu pouze prvky, které mají vliv na hodnocené ukazatele.

5.2 Modelování dopravního systému

Modelování dopravních systémů je výzkumná technika, která ve svém principu nahrazuje reálný systém jeho modelem. Podle podrobnosti modelu jsou vstupní charakteristiky aproximovány na požadovanou úroveň podrobnosti (33). Z hlediska tvorby této disertační práce, bude autor sestavovat model v simulačním SW OpenTrack. Pro sestavení modelu bude použita metoda stručně popsaná na obrázku 18. V následujících podkapitolách jsou dále popsány jednotlivé fáze přípravy modelu.



Obrázek 18 Fáze přípravy modelu

Zdroj: (56) s úpravou autora

Zadávání parametrů infrastruktury

Infrastruktura je modelována grafem, který reprezentuje dopravní síť. Vrcholy tohoto grafu jsou tvořeny dvoubody, které představují kilometrickou polohu rozhodných prvků infrastruktury na dopravní síti. Jedná se především o polohu stanic, návěstidel, výhybek, námezníků, rychlostníků, nástupišť a o polohu bodů, kde se mění sklonové a směrové poměry tratí. Speciálním případem vrcholu grafu, je takzvaný *Station Vertex*, který je umístěn ve středu každé staniční koleje a který je zároveň místem, kde se zaznamenává průjezd vlaku v simulaci. Hrany tohoto grafu obsahují informaci o dovolené traťové rychlosti, poloměru oblouků a aktuálním sklonu tratí. Prvním krokem přípravy simulačního modelu je tedy zadání kompletní dopravní sítě, na které má být simulace provedena.

Zadávání parametrů jízdních cest

Do připravené dopravní sítě je dále zapotřebí vložit všechny dovolené jízdní cesty. Jízdní cesta vždy začíná a končí u návěstidla (návěstního bodu). U každé jízdní cesty lze nastavit její charakteristiku, včetně doby nepřímého obsazení, doby stavění jízdní cesty a doby jejího uvolnění. Jízdní cesty lze sestavovat dvojím způsobem. U existujících dopravních sítí, pro které jsou k dispozici kompletní podklady, lze použít závěrovou tabulku. Pokud nejsou tyto podklady k dispozici, je zapotřebí respektovat zvolený typ zabezpečovacího zařízení a obecně platné technologické časy uvedené například v metodikách SŽDC SM 124 a směrnici SŽDC č. 104. Tyto jízdní cesty jsou následně vloženy do základní sady cest tzv. *Routes*. Následně lze tyto základní sady jízdních cest sdružovat do logických jízdních cest tzv. *Paths*. Z množiny vytvořených logických jízdních cest jsou každému vlaku přiřazeny ty jízdní cesty, které jsou pro něj z hlediska jízdy využitelné. Jedná se o tzv. itineráře jízdy – *Itineraries* (56).

Zadávání parametrů vozidel

V dalším kroku jsou do modelu přidány charakteristiky použitých vozidel, včetně jejich vybavení vlakovým zabezpečovacím zařízením. U hnacích vozidel jsou dále zadávány parametry jako jsou hmotnost, adhezní hmotnost, trakční charakteristiky, součinitel adheze a vozidlové odpory. Obdobně jsou u tažených vozidel zadávány jejich hmotnosti a vozidlové odpory. Z hnacích a tažených vozidel se následně v modulu *Trains* tvoří ucelené vlakové soupravy. V tomto modulu lze nastavit i brzdné charakteristiky plynoucí z omezení systémů ATP a ATO. Brzdné křivky ATP a ATO je možné nastavit pro několik variant. Správné hodnoty brzdných křivek se zjišťují externím výpočtem pro jednotlivé druhy systémů (56).

Zadávání jízdního řádu

Ke každému vytvořenému vlaku je následně přiřazen jízdní řád. Pro vložení jízdního řádu lze využít již zkonstruovaný jízdní řád, nebo v případě nutnosti sestavit jízdní řád přímo v SW OpenTrack. Jízdní řády lze vkládat i po skupinách, kdy se vlaková trasa opakuje v předem dané periodě. Vkládání vlaku po skupinách je účelné zejména pro simulaci periodických jízdních řádů. Simulační nástroj OpenTrack umožňuje i importování jízdních řádů z prostředí MS Excel. V jízdním řádu mohou být definované přípojné vazby, minimální doba pobytu, pobyt pouze z dopravních důvodů a případné čekací doby. Podle stanoveného jízdního řádu se následně v simulacích vyhodnocuje zejména kvalita jeho dodržování (56).

Využití simulačního modelu

Takto připravený model tvoří základ pro provádění simulací. Z hlediska zadávání infrastrukturní části již v následných simulacích není zapotřebí model dále upravovat. Při nastavování jízdních řádů a brzdných křivek je nutné dělat průběžné úpravy pro jednotlivé varianty. Upravováním jízdního řádu a nastavením simulačního modelu vznikají různé varianty provozních scénářů, které jsou významné z hlediska výsledků simulace.

5.3 Počítačová simulace

Počítačová simulace je výzkumná metoda práce se simulačním modelem, která reprezentuje chování vybraného systému. Výsledky simulace neposkytují optimální řešení, ale poskytují výsledky o chování systému při změnách vstupních parametrů. Výstupní výsledky se tedy neurčují pomocí jednoho výpočtu, ale prováděním opakovaných simulačních experimentů (replikací). V případě simulace v prostředí simulačního nástroje OpenTrack se jedná o mikroskopickou diskretní simulaci (96 s. 12-13). Před provedením vlastního simulačního experimentu je zapotřebí provést kontrolu správnosti modelu. Kontrola správnosti modelu se děje ve třech krocích, které se označují jako verifikace, kalibrace a validace modelu.

Verifikace modelu

Verifikace modelu slouží pro ověření volby vhodného simulačního nástroje ještě před započítáním tvorby simulačního modelu. Tento nástroj musí umožňovat realizaci veškerých požadavků, které řešitelský tým od modelu vyžaduje. Výběr modelu a jeho verifikace byla provedena již v kapitole 2, kde byla provedena analýza a výběr vhodného simulačního nástroje. Pro splnění cílů disertační práce byl vybrán simulační nástroj OpenTrack.

Kalibrace modelu

Kalibrace modelu je zaměřena na ověření vazby mezi modelem a reálným systémem. Při kalibraci modelu je cílem dosáhnout co největší shody s chováním reálného dopravního systému. Dosáhnutí požadované shody s reálným systémem se děje pomocí úpravy vstupních parametrů modelu.

Validace modelu

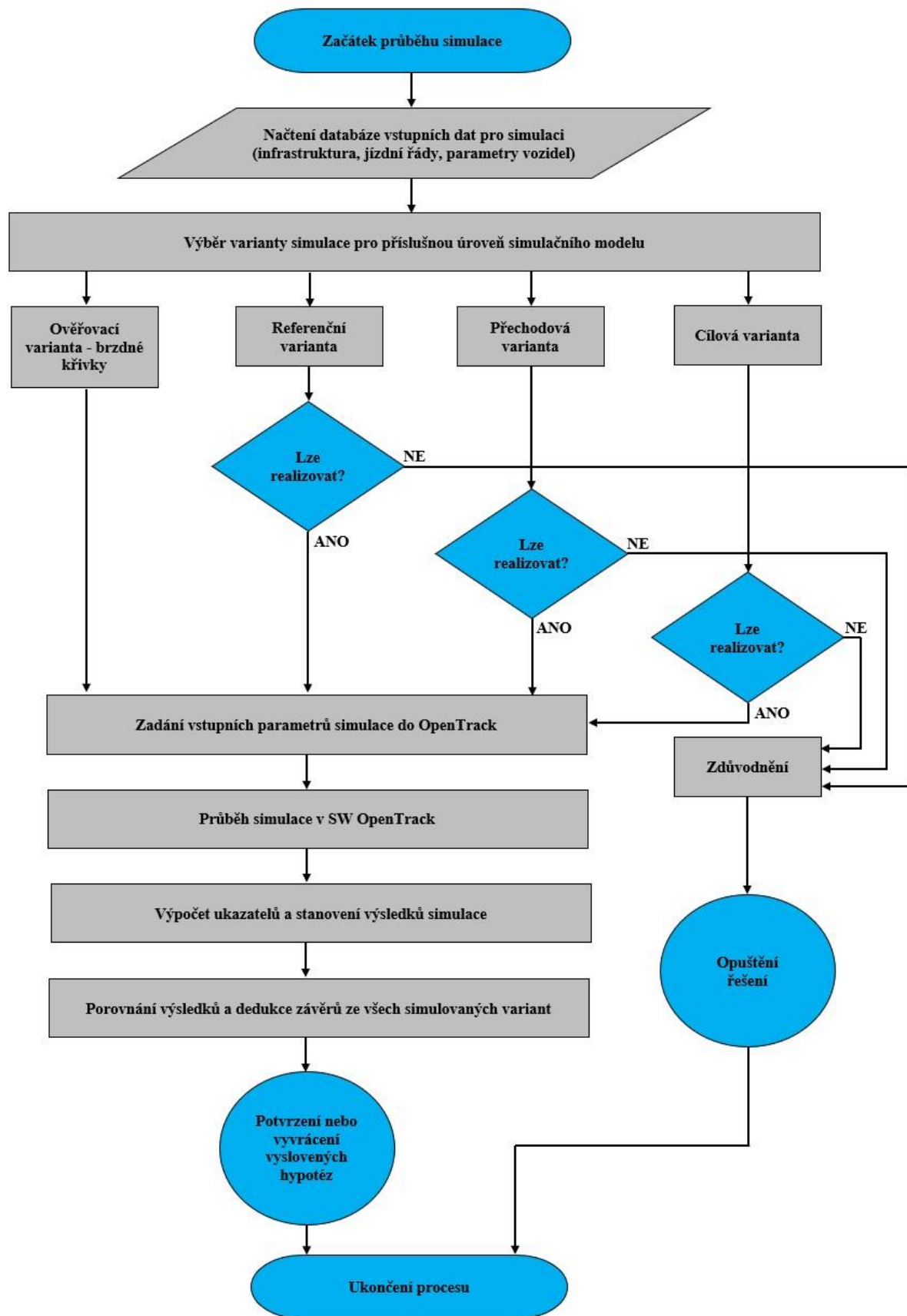
Validace modelu je posledním stupněm ověření vytvořeného modelu. Jedná se o část procesu počítačové simulace, kdy jsou dosažené výsledky modelu srovnávány s reálnými daty ve skutečném dopravním systému. Výsledky validace modelu by měly, na požadované hladině spolehlivosti, odpovídat chování reálného systému. Cílem validace modelu je dokázat správnost funkce modelu v podmínkách, které nebyly předmětem kalibrace. Na existujících tratích lze pro validaci modelu využít existující jízdní řád, na kterém lze pozorovat odchylky modelu od reálného systému. V ideálních podmínkách lze pro validaci modelu využít přesná data, která byla získána na základě vlastního pozorování a měření.

Příprava simulačních scénářů

Po provedení verifikace, kalibrace a validace modelu je také nutné sestavit simulační scénáře. Simulační scénář vychází z předem stanovených vstupních parametrů pro danou simulaci. Simulační scénáře pro budoucí simulaci budou sestaveny tak, aby zahrnovaly reálné dopravní situace, které mohou při operativním řízení provozu nastat. V jednotlivých scénářích bude experimentálně prověřeno chování systému při použití variantních jízdních řádů, při vstupu náhodných zpoždění do systému a také při změnách vstupních parametrů systémů ATC. U jednotlivých simulačních scénářů bude provedeno odpovídající množství replikací, aby byly výsledky simulace podloženy i statisticky.

Průběh simulace

V simulačním programu OpenTrack se jedná o časově diskrétní simulaci. Minimálním krokem simulace je jedna sekunda, lze však nastavit i větší krok simulace. Z hlediska požadavků mikrosimulace na dodržení co největší přesnosti modelu je však žádoucí zachování nejmenšího časového kroku simulace. Při simulaci lze sledovat animaci průběhu simulace a aktivně do simulace vstupovat. V průběhu simulace lze aktivním zásahem měnit stav prvků infrastruktury a tím ovlivňovat průběh simulace. Simulační nástroj OpenTrack umožňuje i simulaci omezení infrastruktury a případných poruch zabezpečovacího zařízení. Průběh simulace a vyhodnocení výsledků simulace je znázorněno na vývojovém diagramu uvedeném na obrázku 19.



Obrázek 19 Vývojový diagram průběh a vyhodnocení výsledků simulace

Zdroj: autor

Výsledky simulace

Výsledky simulace jsou vyhodnoceny za každou uskutečněnou replikaci daného provozního scénáře. Kritériem přijetí simulace je uskutečnění jízdy všech vlaků v daném jízdním řádu. Pokud dojde v běhu simulace k odřeknutí trasy vlaku nebo k tzv. *deadlocku*, tedy k zablokování simulace, bude simulace opakována. Hlavními hodnotícími ukazateli jsou, průměrný přírůstek zpoždění, který se vypočítá jako podíl celkového vstupního a celkového výstupního zpoždění, a porovnání velikosti následného mezidobí u simulace liniových prvků. S ohledem na specifické zaměření simulačního modelu je zahrnut i ukazatel dílčího přírůstku zpoždění pro každou vlakovou trasu. Vzhledem k tomu, že bude provedeno řádově několik tisíc replikací, je nutné vyhodnotit výsledky statisticky, jak je uvedeno v kapitole 5.4.

Využití simulace

Využití simulačních technik je nejlepším nástrojem pro pozorování chování reálného systému. Simulační model a simulace jsou stěžejní částí vypracování této disertační práce. V této disertační práci jsou detailně popsány všechny simulační scénáře a vyhodnoceny navržené ukazatele.

5.4 Statistická analýza

Statistická analýza je vědní obor, který se zabývá získáváním, zpracováním a analýzou dat pro potřeby rozhodování v systémech. Zkoumá stav a vývoj hromadných jevů a vývoj vztahů mezi nimi pomocí uskutečňování hromadných pozorování. Její využití je vhodné při násobném opakování pokusu a vyhodnocení dat. Pomocí statistické analýzy lze prověřovat pravděpodobnost nastání různých provozních scénářů. V tomto případě budou autorem využity poznatky z oblasti teorie pravděpodobnosti a náhodné veličiny a také regresní analýza.

Náhodná veličina

Náhodná veličina je definována jako funkce, která každému elementárnímu jevu z množiny všech možných výsledků daného pokusu přiřadí reálné číslo. Náhodné veličiny se dělí na diskrétní, které mohou nabývat pouze určitých izolovaných hodnot, a spojité náhodné veličiny, které mohou nabývat všech hodnot z určeného intervalu. Z hlediska provozních scénářů, kde je náhodnou veličinou vstupní zpoždění, se jedná o spojitou náhodnou veličinu. U spojitých náhodných veličin nemá smysl určovat pravděpodobnost. K popisu spojitě náhodné veličiny je možné využít derivaci její distribuční funkce, která se nazývá hustotou pravděpodobnosti. Hustota pravděpodobnosti umožňuje určit pravděpodobnost, že náhodná

veličina bude mít hodnotu z určitého intervalu. Univerzálním nástrojem k popisu náhodných veličin je distribuční funkce. Distribuční funkce pro spojitou náhodnou veličinu má tvar definovaný ve vzorci [5] (97 s. 74-85).

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad [5]$$

Pro zadání vstupních parametrů zpoždění je nutné znát rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny. Z hlediska modelu a vstupu náhodných zpoždění do systému se používá alternativní a exponenciální rozdělení pravděpodobnosti (zpoždění je modelováno kombinovaně). Prostřednictvím alternativního rozdělení pravděpodobnosti je modelována skutečnost, jestli v daném případě (v dané trase vlaku) zpoždění nastalo. Následně je pomocí exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti modelována velikost konkrétního zpoždění. Předpoklad použití uvedených rozdělení pravděpodobnosti pro modelování zpoždění je uveden ve směrnici SŽDC SM 124 (75). Při vkládání do modelu je zapotřebí stanovit minimální a maximální hodnotu zpoždění, tedy interval hodnot, kterých může náhodná veličina nabývat. Dále je zapotřebí zadat procento vlaků nebo konkrétní vlaky, pro které bude zpoždění platit a následně určit střední hodnotu vstupního zpoždění. Střední hodnota spojitě náhodné veličiny je definována ve vzorci [6] (97 s. 88-90).

$$E(x) = \int_{-\infty}^x x^2 f(x)dx \quad [6]$$

Regresní analýza

Regresní analýzou se zjišťuje závislost jednotlivých vstupů (X_1, X_2, \dots, X_n) na výstupu (Y). Cílem regresní analýzy je odhadnout jejich závislost co nejpřesněji. V ideálním případě se bude jednat o lineární vztah, tedy o lineární regresi. Pro výběr správné regresní funkce, která nejlépe popisuje závislost vstupů na výstupu, se nejčastěji používá metoda nejmenších čtverců. Při aplikaci metody nejmenších čtverců se hledá funkce, která leží nejbližší hodnotám naměřeného vzorku dat. Funkce může být lineární, kvadratická, kubická či logaritmická. Ukazatelem správnosti daného modelu je koeficient determinace R^2 , který uvádí kolik procent variability výstupu (Y) je způsobeno vstupy (X_1, X_2, \dots, X_n). Pro využití metody regresní analýzy musí být splněny předpoklady normálního rozdělení pravděpodobnosti a nezávislost reziduí (98).

Využití statistické analýzy

Uvedené metody statistické analýzy budou využity pro podporu zpracování simulačních scénářů a pro zjištění vlivu změny vstupních parametrů na výstupy. U náhodné veličiny se bude jednat především o stanovení hodnot vstupního zpoždění, na vstupu do modelu. Tato metoda

však může být využita i pro vstup zpoždění do modelu v průběhu simulace. Regresní analýza potom bude využívána pro porovnání změny hodnot jednotlivých vstupů na výstupních hodnotách simulačního modelu.

6 VLASTNÍ ŘEŠENÍ A NÁVRH OBECNÉHO SIMULAČNÍHO MODELU

V této kapitole je obsažen vlastní autorský výzkum a jsou zde popsány výsledky dosavadního výzkumu. V další fázi je vyslovena formulace simulačního modelu pro aplikovanou část této práce. Model je dále rozvinut a výsledky simulačního modelování jsou průběžně vyhodnocovány. V závěrečné části kapitoly je provedeno zobecnění výsledků a stanoveny konkrétní závěry ve vymezené oblasti zkoumání.

6.1 Vlastní výzkum v oblasti systémů ATC

Autor se postupně podílel na sérii prací, které zkoumaly problematiku řešenou v této disertační práci. Základní okruhy témat s odkazem na přehled vlastní publikační vědecko-výzkumné činnosti doktoranda jsou součástí této podkapitoly. V průběhu doktorského studia se jednalo o tyto okruhy zkoumání: modelování provozu automatického metra, modelování provozu na trati v uzavřené smyčce, modelování provozu na trati se zjednodušeným řízením drážní dopravy, závislost nárůstu spotřeby trakční energie na zvýšení traťové rychlosti a simulace provozu systémů ATC. Vlastní řešení této disertační práce z nich v některých pramenech a parametrech vychází, a proto jsou výsledky těch prací, které se týkají zkoumané problematiky zahrnuty do této podkapitoly.

Modelování provozu automatického metra

Autor se simulačním modelováním začal zabývat již v průběhu navazujícího magisterského studia. První model se zabýval možnostmi zavedení automatického provozu na trase B pražského metra. V analytické části práce byl zpracován přehled používaných systémů ATC u městských drah, zejména s důrazem na použití CBTC. Dále byl zpracován přehled předpisů a norem vztažných k bezobslužnému režimu provozu.

V praktické části práce byl sestaven model stávající trati metra B pražského metra v SW OpenTrack. Nejprve byla provedena simulace referenční varianty, jejíž nastavení vycházelo z parametrů zabezpečovacího systému ARS, který byl na této trase provozován. Následně byl model upraven pro použití CBTC, které umožňuje provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Simulací bylo prokázáno zkrácení minimálního používaného provozního intervalu následných spojů na polovinu, tedy na hodnotu 70 sekund. Limitním faktorem pro provoz se ukázala technologie obratových stanic, která již neumožňovala další zkrácení provozních intervalů.

Modelováním automatického provozu metra se autor zabýval již ve své diplomové práci. Modifikací původního modelu a upravenou interpretací dosažených výsledků, byly společně s dalšími spoluautory, vytvořeny další dva vědecké články: *Possibilities of Introduction of Automated Operation on the Prague Metro* a *Možnosti zavedení automatického provozu pražského metra B*, které jsou uvedeny v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Modelování provozu na trati v uzavřené smyčce

V následujících pracích se autor, spolu se spoluautory, začal věnovat simulování provozu a kapacitním výpočtům na konvenční železniční síti. Autoři na úvod provedli analýzu a vytvořili modifikovanou metodiku pro určování kapacity železničních tratí, respektive stanovení alternativního ukazatele hodnocení kvality jízdního řádu. Tato metodika je blíže popsána ve článcích: *Capacity range calculation* a *Timetable performance evaluation*, uvedených v seznamu vlastní publikační vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Pro ověření správnosti metodiky, v případě využití simulace, byl sestaven ověřovací simulační model, pro který byla navržena trať o celkové délce 18,35 km se třemi průběžnými stanicemi a třemi zastávkami. Model trati byl vytvořen tak, aby tvořil nekonečnou smyčku. Všechny tři stanice byly modelovány jako čtyřkolejné s různým uspořádáním a délkou staničních zhlaví a záhlaví. Na zhlavích byly použity výhybky s variantním rozpětím rychlostí v odbočném směru od 40 do 80 km·h⁻¹. V tomto modelu bylo vyhodnocováno následné mezidobí pro jednotlivé mezistaniční úseky. Model posloužil jako základ pro další vědecko-výzkumnou činnost v této oblasti. Výsledky simulací jsou blíže popsány v článcích *Level of Detail of the Simulation Model and its Influence on the Result Accuracy*, *The use of simulation modelling for determining the capacity of railway lines in the Czech conditions* a *Efficiency of Increasing of the Track Speed Using Simulation in Opentrack*, uvedených v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Modelování provozu na trati se zjednodušeným řízením drážní dopravy

Alternativním způsobem provozování dráhy je řízení provozu na trati se zjednodušeným řízením drážní dopravy (podle předpisu SŽ D3). V rámci tohoto výzkumného úkolu bylo nutné ověřit možnost simulování takto řízené trati. Bylo nutné rozfázovat veškeré technologické činnosti, včetně činností při provozování dráhy, které za provozovatele dráhy, v tomto případě, vykonává zaměstnanec dopravce. Bylo potvrzeno, že model lze sestavit a jeho výsledky jsou

validní. Nicméně je zde vysoká míra závislosti na stanovených technologických časech (stanovených dle směrnice SŽDC č. 104).

Simulace byla následně podpořena případovou studií, jejíž součástí bylo zhodnocení návrhu technických úprav dopraven na trase Moravany – Borohrádek. Výsledky simulací a technická doporučení jsou blíže popsány v článku *Simulation of Railway Lines with a Simplified Interlocking System*, uvedeném v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Technické možnosti navýšení kapacity mezistaničního úseku na jednokolejně trati

V případě potřeby navýšení kapacity jednokolejného mezistaničního úseku existují ověřená řešení, kterými jsou zřízení oddílových návěstidel (rozdělení úseku na více traťových oddílů) a zdvoukolejnění trati. Alternativním způsobem je prodloužení staničního zhlaví jedné nebo obou sousedních stanic. V článku *Improving single-track railway line capacity using extended station switch point area*, uvedeném v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda, se autoři zabývali právě touto problematikou.

Autoři podrobili zkoumaný problém simulaci prostřednictvím více simulačních nástrojů. Prvním z nich byl mezoskopický model sestavený v prostředí MS Excel, druhý model byl sestavený v programu OpenTrack. Autoři došli k závěru, že rozšíření oblasti staničního zhlaví může zlepšit stabilitu provozu (jízdního řádu). Mezoskopický stochastický simulační model je vhodné vždy doplnit o mikroskopický simulační model, který umožňuje modelovat přímo danou konkrétní situaci. Dalším dílčím závěrem bylo, že v případě prodlouženého staničního zhlaví je žádoucí toto zhlaví doplnit odjezdovými a cestovými návěstidly, která umožní vznik dalšího prostorového oddílu v rámci stanice.

Závislost nárůstu spotřeby trakční energie na zvýšení traťové rychlosti

Jednou z klíčových otázek, jak bylo popsáno i v analytické části této disertační práce, je využití systémů ATO k optimálnímu hospodaření se spotřebou trakční energie. V této části výzkumu se autor, ve spolupráci s dalšími spoluautory, věnoval efektu zvyšování traťových rychlostí a trendech ve spotřebě trakční energie. Pro určení spotřeby trakční energie byl využit další nástroj z programu OpenTrack, který umožňuje sledovat spotřebu trakční energie v libovolném okamžiku běhu simulace (v sekundových krocích).

Z technologického hlediska je možné zvýšit efektivitu spotřeby trakční energie optimalizací jízdního řádu, využíváním systémů ATO a automatizací dispečerské úrovně řízení. Hledání optimální strategie řízení jízdy vlaku je však vždy závislé na konkrétních podmínkách.

Vývoj spotřeby trakční energie při vzrůstající rychlosti (v tomto případě u VRT) a další vědecké závěry jsou popsány v článku *Calculation of the minimal length of the high-speed line*, uvedeném v seznamu vlastní vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Pro podpoření hypotéz a další rozšiřování poznání v oblasti nasazování systému ETCS, vypracoval autor ve spolupráci se spoluautory případovou studii zabývající se nasazením systému ETCS L2 v úseku trati Rokycany – Plzeň hlavní nádraží. Jako problematický se ukázal především fakt, že zkoumaný úsek (s uvažovanou traťovou rychlostí $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) je dlouhý pouze 7,3 km, přičemž žádná z testovaných souprav nebyla schopna dosáhnout cílové rychlosti ve směru z Plzně. Navíc se ukázalo, že spotřeba trakční energie narůstá neúměrně efektu dosažené úspory v jízdní době vlaků na takto krátkém úseku. Konkrétní závěry jsou uvedeny v článku *Assessing the efficiency of increasing the track speed in the line section Rokycany–Plzeň hl. n.*, uvedeném v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Simulace provozu systémů ATC

Stěžejním tématem autorova výzkumu však po celou dobu byla simulace provozu systému ATC, především pak systému ETCS. Na toto téma byly také zpracovány příspěvky *ETCS as a tool to increase the capacity of railway line – simulation assessmenta* a *Simulační posouzení nasazení systému ETCS L3 na velikost následného mezidobí*, uvedené v seznamu vědecko-výzkumné činnosti doktoranda.

Pro účely tohoto výzkumu byla navržena fiktivní trať o celkové délce 18,35 km se třemi průběžnými stanicemi a třemi zastávkami. Modelované stanice jsou čtyřkolejné s variantními parametry zhlaví a záhlaví. Na zhlavích jsou použity výhybky s variantním rozpětím rychlostí v odbočném směru od 40 do $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Délka jednotlivých záhlaví má rozptyl 300–800 metrů. Jedná se o obdobu modelu, který byl využit pro simulaci konvenčního provozu v autorových dřívějších pracích. Tento model byl však upraven pro umožnění simulace provozu systému ETCS na úrovních L2 a L3.

První simulovanou variantou provozu byl konvenční provoz s liniovým vlakovým zabezpečovačem, kde byly délky prostorových oddílů na trati přibližně 1000 m. Druhou simulovanou variantou byl provoz pod dohledem ETCS v aplikační úrovni L2 (s benefity), kde byly délky prostorových oddílů na trati přibližně 300–400 m. Poslední simulovanou variantou byl provoz pod dohledem ETCS v aplikační úrovni L3. Získané výsledky potvrzují přínosy implementace systému ETCS L2 s benefity. Dále byla v těchto pracích potvrzena úvaha o dalším navýšení kapacity trati při využití pohyblivých prostorových oddílů v aplikační úrovni ETCS L3. Získané výsledky byly samozřejmě platné pro navrhovaný model výzkumné

infrastruktury a nemají obecnou platnost. Výsledky simulace nicméně ukazují zlepšení výsledné hodnoty následných mezidobí oproti konvenčnímu způsobu provozování tratí u ETCS L2 o 19,1 %, u aplikační úrovni ETCS L3 pak o 23,75 %.

6.2 Formulace modelu – tříúrovňový simulační model

Před samotným zahájením sestavy simulačního modelu je nutné model správně formulovat. Tento simulační model řeší kapacitu železničních tratí po nasazení systémů ATC a jejich porovnání s konvenčním způsobem provozování. Pro lepší vypovídací schopnost výsledků se autor, na základě zkušeností z předchozí vědecké činnosti, rozhodl pro zpracování tříúrovňového simulačního modelu. Tříúrovňový simulační model umožňuje zkoumat kapacitu železniční infrastruktury z více úhlů pohledu. Každá ze tří úrovní tohoto simulačního modelu má ještě další podúrovně (varianty), které jsou definovány na základě množství typů (úrovní) vybavení trati systémem ATC. Schéma tříúrovňového simulačního modelu je uvedeno na obrázku 20.

Traťová část – první úroveň (T)

Tato část simulačního modelu je zaměřena na kapacitní ověření samotné trati. První úroveň je definována tak, aby byly záměrně eliminovány vlivy vstupní a výstupní oblasti modelu. Za tímto účelem je nutné správně navrhnout délku trati (modelu trati). V závislosti na výstupních požadavcích modelu je možné upravit jeho sklonové a směrové parametry. V obecné rovině je pro zachování nezkreslenosti výsledků žádoucí záměrně vyloučit tyto vlivy. Tato úroveň se dále dělí na tři podúrovně (varianty):

- Referenční varianta – konvenční způsob provozování. Tato varianta vychází z podmínek provozu, které jsou dnes na české železniční síti běžné. Trať je v tomto případě vybavena traťovým zabezpečovacím zařízením typu automatický blok trojznakový a je dále doplněna o přenos kódu národního vlakového zabezpečovače. Trať je rozdělena na traťové oddíly o délce odpovídající celočíselnému násobku zábrzdné vzdálenosti.
- Přejížděvací varianta – provozování systému ATC v pevných prostorových oddílech. Tato varianta je založena na principu rozdělení tratě na pevné prostorové oddíly bez optické návěštní signalizace (případně pouze s doplňkovými návěštními svítilnami). Rozhodující signalizaci zajišťuje systém ATC. Parametry brzdných křivek jsou modelovány podle definovaného výpočtu, případně jsou exaktně určeny výrobcem (případně provozovatelem) daného typu železničního kolejového vozidla. Z hlediska

provozu ERTMS odpovídá tato varianta úrovně ETCS L2, v případě systému CBTC, odpovídá CBTC provozovanému v pevných prostorových oddílech.

- Cílová varianta – provozování systému ATC v pohyblivých prostorových oddílech. V rámci této varianty je simulován provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Trať v tomto případě není rozdělena na fyzické ani virtuální fixní prostorové oddíly. Z traťové části ZZ zůstávají v modelu pouze balízové skupiny pro určení polohy. Parametry brzdných křivek jsou modelovány podle definovaného výpočtu, případně jsou exaktně určeny výrobcem (případně provozovatelem) daného typu železničního kolejového vozidla. Z hlediska provozu ERTMS odpovídá tato úroveň ETCS L3, v případě systému CBTC, odpovídá CBTC provozovanému v pohyblivých prostorových oddílech.

Staniční zhlaví – druhá úroveň (S)

Tato úroveň je zaměřena na další z kritických prvků pro určování kapacity tratí a tím jsou staniční zhlaví. Staniční zhlaví samozřejmě kapacitně souvisí i s ostatními částmi stanice, především staničními kolejemi, ale pro samotné zkoumání vlivu systémů ATC na kapacitu je podstatné omezení vyplývající z použitého typu staničního zhlaví. Množství staničních kolejí je možné, výhradně pro potřeby modelu, libovolně navýšit. Tato úroveň modelu se dále dělí na tři podúrovně (varianty):

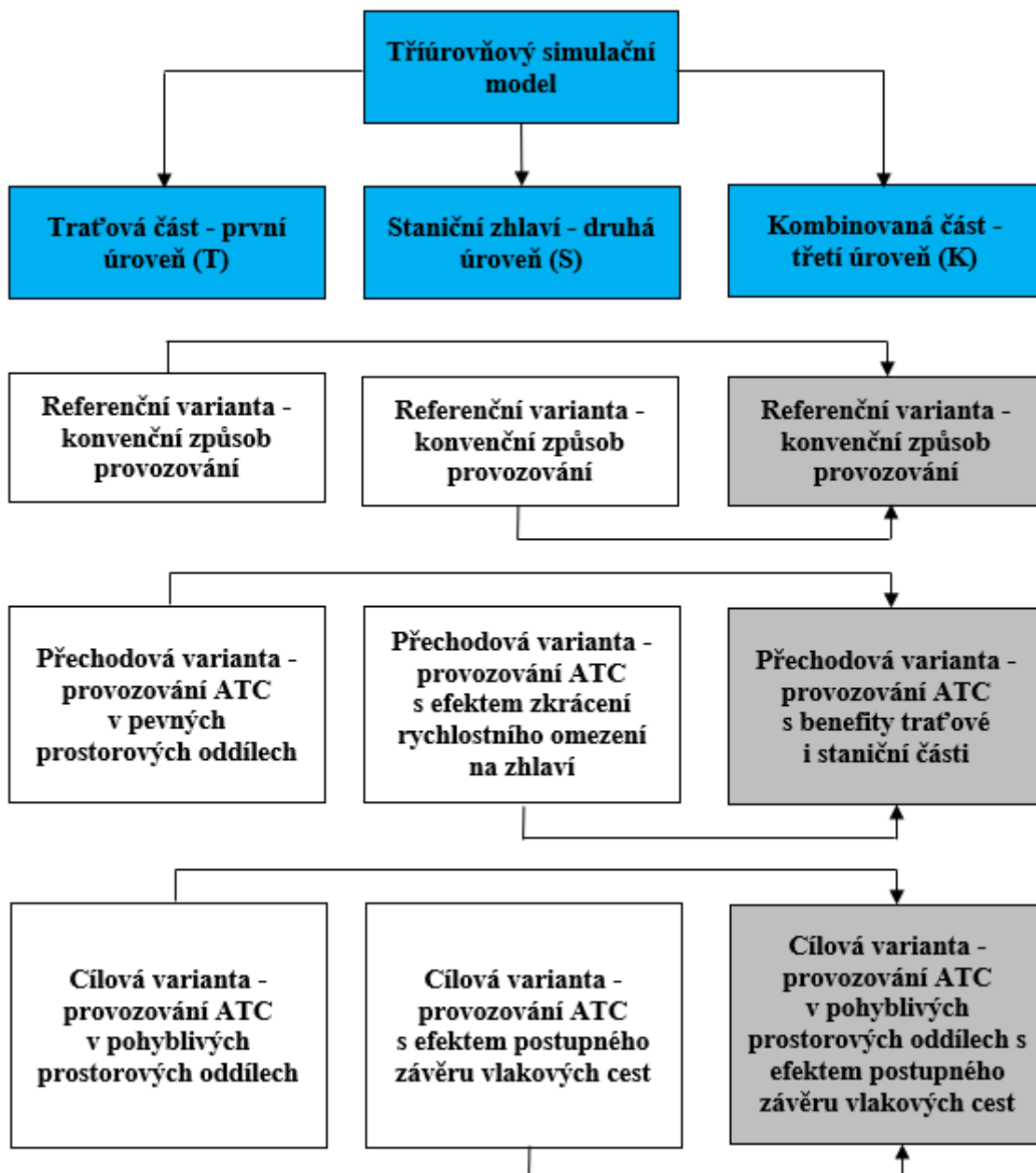
- Referenční varianta – konvenční způsob provozování. Tato varianta vychází z tradičního uspořádání staničního zhlaví. Rozhodující je v tomto případě vždy délka obvodu výhybek přilehlých hlavnímu návěstidlu. Od tohoto návěstidla začíná rychlostní omezení (je-li rychlost omezena). Rychlostní omezení končí minutím poslední výhybky v obvodu výhybek přilehlých hlavnímu návěstidlu. V této variantě je zpracováno vždy několik typizovaných staničních zhlaví, která jsou následně modifikována pro přechodovou a cílovou variantu provozu.
- Přechodová varianta – provozování systému ATC v pevných prostorových oddílech. Důležitou změnou oproti referenční variantě je změna rozsahu délky omezení rychlosti, respektive bodů, kde rychlostní omezení začíná a končí. Zkrácení délky omezení rychlosti umožňuje rychlejší průjezd zhlavím, na kterém je tato rychlost omezena. Z hlediska provozu ERTMS odpovídá tato úroveň ETCS L2, v případě CBTC, odpovídá systému CBTC provozovanému v pevných prostorových oddílech.
- Cílová varianta – provozování systému ATC v pohyblivých prostorových oddílech. Z hlediska omezení rychlosti a délky omezení rychlosti odpovídá tato varianta

přechodové variantě. Podstatným rozdílem je změna způsobu přípravy vlakové cesty, respektive podmínek vzniku úplného závěru jízdní cesty před vlakem. Příprava vlakové cesty se děje ve dvou fázích a závěry mohou být na zhlavích stavěny postupně. To dále zvyšuje kapacitu staničních zhlaví. Z hlediska provozu ERTMS odpovídá tato úroveň ETCS L3, v případě CBTC, odpovídá systému CBTC provozovanému v pohyblivých prostorových oddílech.

Kombinovaná část – třetí úroveň (K)

Třetí úroveň je založena na kombinaci předcházejících úrovní. Simulační model pro tuto úroveň je sestaven tak, aby kombinoval prvky obou předcházejících úrovní a spojil je do jediného modelu. Tato část simulačního modelu zároveň umožňuje sestavení konkrétního jízdního řádu, na kterém je možné dále ověřit další parametry kapacity trati. Jednotlivé části modelu mohou být využity s ohledem na potřeby požadovaných výstupů simulačního modelu. Tato úroveň se dále dělí na tři podúrovně (varianty):

- Referenční varianta – konvenční způsob provozování. Tato varianta respektuje konvenční uspořádání železniční trati. Trať je zabezpečena a rozdělena na pevné prostorové oddíly prostřednictvím trojznakového automatického bloku a je doplněna o přenos kódu národního vlakového zabezpečovače. Referenční varianta zároveň respektuje tradiční uspořádání stanic.
- Přechodová varianta – provozování ATC v pevných prostorových oddílech. V této variantě je trať stále rozdělena na pevné prostorové oddíly. Přechodová varianta využívá výhody zkrácení rychlostních omezení při průjezdu staničním zhlavím. V této úrovni lze dobře sledovat další efekty implementace systémů ATC, zejména efekt zkrácení užité délky staničních kolejí v závislosti na konfiguraci zhlaví. Z hlediska provozu ERTMS odpovídá tato úroveň ETCS L2, v případě CBTC, odpovídá systému CBTC provozovanému v pevných prostorových oddílech.
- Cílová varianta – provozování ATC v pohyblivých prostorových oddílech. V cílové variantě jsou využity všechny benefity provozu v pohyblivých prostorových oddílech. Simulační model je v tomto případě zaměřen, kromě kapacitního posouzení, na přesné modelování progresivních postupů a technologie provozu takových systémů. Z hlediska provozu ERTMS odpovídá tato úroveň ETCS L3, v případě CBTC, odpovídá systému CBTC provozovanému v pohyblivých prostorových oddílech.



Obrázek 20 Tříúrovňový simulační model

Zdroj: autor

6.3 Podmínky pro sestavení simulačního modelu

Pro sestavení modelu bylo dále nutné definovat (pro každou z fází jeho sestavy) omezující podmínky, které vychází z přehledu vztažných dokumentů a norem, které jsou samostatně popsány v kapitole 3.1. Kromě těchto norem však bylo nutné vyjít i z konkrétních dokumentů, vztahujících se k národním zásadám implementace ETCS v podmínkách ČR. Jedná se o předpis SŽ Z8 díl IV Evropský vlakový zabezpečovač (99), metodický pokyn SŽ TSI CCS/MP1 Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro trať s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače (100) a vybrané specifikace pro ETCS (101).

SŽ Z8 díl IV (prozatímní) Evropský vlakový zabezpečovač ETCS

Tento předpis stanovuje základní pravidla pro provoz ETCS na síti Správy železnic, a to minimálně do doby vydání nového předpisu SŽ D1 (předpoklad r. 2026). Předpis vymezuje základní pojmy a stanovuje odpovědnost za fungování (údržbu) jednotlivých částí systému. V předpisu je detailně rozpracován popis jednotlivých módů z hlediska provozování ETCS. Jsou-li v této disertační práci použity blíže nepopsané pojmy z oblasti provozování ETCS, je jejich definice uvedena v tomto předpisu.

Předpis popisuje jednotlivé komponenty traťové části ETCS a podmínky pro její provoz. Rozsah obslužných úkonů u traťové části je pro obsluhující zaměstnance malý, protože traťová část má za normálních okolností fungovat bezobslužně. Za účelem případné potřeby zásahu obsluhujícího zaměstnance, je v podmínkách ČR (Správy železnic) zřízena funkce dispečera ETCS na CDP Praha a CDP Přerov. V tomto předpisu jsou definovány podmínky, které musí být pro provoz ETCS zapracovány do TTP (99).

Významnou částí předpisu je definování základních pojmů a podmínky provozování mobilní části ETCS. Popisuje funkční podmínky jednotného obslužného rozhraní pro strojvedoucí – *Driver Machine Interface* (DMI), jeho uvedení do provozu, včetně zprovoznění celé mobilní části ETCS. Dále jsou stanoveny úkony pro uvedení systému do činnosti podle pozice hnacího vozidla ve vlaku. Následně jsou uvedeny podmínky pro jízdu vlaku. V této části je popsána i technologie obsluhy mobilní části ZZ při provádění posunu (99).

SŽ TSI CCS/MP1 Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače

Tento metodický pokyn upřesňuje požadavky stanovené evropskými a českými technickými normami, technickými normami železnic (TNŽ) a dalšími dokumenty a předpisy Správy železnic pro projektování traťové části evropského vlakového zabezpečovače. Metodický pokyn je závazný pro projektování ETCS na tratích Správy železnic. Jsou v něm upřesněny i další technické požadavky na navazující technická zařízení (100).

Simulační modely, které jsou sestaveny za účelem naplnění cíle této disertační práce, ve svém návrhu respektují technické požadavky, které jsou dané tímto metodickým pokynem pro projektování traťové části ERTMS. Jedná se zejména o oblasti, které jsou rozhodné pro umístění klíčových prvků v infrastruktuře. Seznam těchto oblastí je uveden v následujících odrážkách:

- Stop značky ETCS.
- Lokalizační značky ETCS.

- Umístění Stop značek ETCS v dopravních kolejích, zejména ve vztahu k EoA.
- Pravidla pro umístění Stop značek s doplňkovými návěstními svítilnami (DNS).
- Umístění Stop značek ETCS a Lokalizačních značek ETCS ve vztahu k trakčnímu vedení.
- Umístění Stop značek ETCS a Lokalizačních značek ETCS ve vztahu k začátku a konci nástupiště.
- Uvolňovací rychlosti.
- Podmínky použití nenulové uvolňovací rychlosti.
- Prvky ochranné dráhy za koncem EoA.
- Používání vlakových cest s prodlouženou ochrannou dráhou.

Pro tratě, kde se neplánuje instalace ETCS L2, ale je uvažována pouze zjednodušená verze ETCS STOP (pro provoz dle předpisu SŽ D1 a SŽ D3), platí v podmínkách Správy železnic metodický pokyn SŽ TSI CCS/MP3 Technické požadavky a zásady pro projektování traťové části ETCS STOP (102).

Vybrané technické specifikace pro návrh a provozování systému ETCS

Z hlediska sestavy modelu je zásadní respektování specifikací, které jsou vydávány Evropskou železniční agenturou – *European Railway Agency* (ERA). Tyto specifikace jsou zpravidla shromažďovány a následně vydávány prostřednictvím tzv. subsetů. Tyto subsety jsou průběžně aktualizovány, přičemž je rozhodující použít vždy aktuálně platnou variantu. Subsety jsou k dispozici ve dvou základních skupinách, které se označují jako Baseline 2 a Baseline 3.

Důležitým subsetem, kterým jsou definovány funkcionality ETCS, je subset 026 (101). Obsahem tohoto subsetu je stanovování brzdných křivek pro ETCS, vydávání MA a podmínky kontrolování dodržení stanovených rychlostních limitů. Přímým výpočtům a modelování brzdných křivek je věnována část subsetu 026-03 (103).

Dalším z významných subsetů je subset 041 (104). V tomto subsetu je definována minimální přesnost palubního systému měření ujeté vzdálenosti. V současnosti je maximální přípustná odchylka měření definována jako $5 \text{ m} + 5 \% \text{ ujeté vzdálenosti}$ od posledního referenčního bodu.

6.4 Modelování brzdných křivek

Modelování brzdných křivek je jednou ze základních úloh přípravy simulace provozu v SW OpenTrack, provedené v praktické části této disertační práce.

Brzdné křivky pro konvenční způsob provozování

Pro vyjádření brzdných vlastností vlaků provozovaných konvenčním způsobem byl sestaven brzdný model, který vychází z běžného UIC modelu. Rovnice pro výpočet brzdné křivky je uvedena ve vztahu [7].

$$a = -(C_1 + C_2 \cdot X_{BWP}) \quad [7]$$

kde:

a ... zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

C_1 ... koeficient C_1 [-]

C_2 ... koeficient C_2 [-]

X_{BWP} ... skutečné brzdící procento [-]

Brzdné křivky jsou stanoveny pro všechny typizované soupravy, které jsou později užity v modelu. Tabulka 9 je přehledem základních parametrů brzdných křivek dle UIC modelu (při brzdění z maximální rychlosti stanovené dle tabulky 12). Grafické znázornění průběhu brzdných křivek je uvedeno na obrázku 26.

Tabulka 9 Brzdné parametry použitých vlakových souprav – bez ETCS

Kategorie vlaku	Souprava	Dráha potřebná k zastavení [m]	Čas potřebný k zastavení [s]
Nex	ř. 386 (Mettrans); 24 Sggrs	740	44
Pn	ř. 356.5 (ČDC); 45 Eas	781	56
Mn	ř. 742 (ČDC); 10 Eas; 5 Falls; 5 Zas	410	37
Ex	ř. 680 (ČD)	1645	59
R	ř. 380 (ČD); 4 Bmz; 1 Bdgmee; 1 Ampz	1054	47
Os	ř. 640 (ČD)	960	43
MOs	ř. 854 (ČD)	502	36

Zdroj: autor

Brzdné křivky pro provoz pod dohledem ETCS

Další nedílnou součástí této úlohy je stanovení brzdných křivek ETCS. Samotná definice brzdné křivky je uvedena v subsetu 026, respektive v části 026-3. Základním principem bezpečného fungování systému ETCS (i ostatních systémů ATC) je předpoklad,

že skutečná brzdná dráha vlaku je menší nebo rovna vypočtené zábrzdné vzdálenosti k místu konce oprávnění k jízdě (vzorec [8]). Tento předpoklad vychází i z pojetí konvenční zabezpečovací techniky, kdy je však uvažováno se vzdáleností a dohledností optických návěstidel umístěných kolem trati.

$$s_r(t) \leq s_{EOA}(t) \quad [8]$$

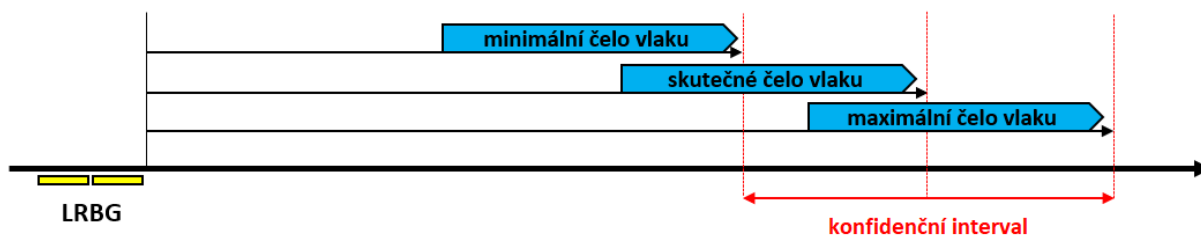
kde:

s_r ... skutečná brzdná dráha [m]

s_{EOA} ... vypočtená brzdná dráha ke konci oprávnění k jízdě [m]

Dalším důležitým pojmem pro stanovování brzdných křivek v systémech ATC je skutečné brzdící procento (BWP). Spolu s maximální rychlostí určuje tato proměnná brzdné vlastnosti vlaku. Konverzní model potom, na základě výpočtu funkce brzdné síly v závislosti na rychlosti a čase, určuje bezpečné křivky brzdění. Vlaky s takto vytvořenou brzdou křivkou se označují jako – *lambda trains*, použitou metodu jejich stanovení jako – *lambda method*. Z praktického hlediska však takový výpočet není zcela přesný, respektive dochází při něm k modelování více restriktivních brzdných křivek, což může mít negativní vliv na průběh jízdy vlaku i na kapacitu trati. U náhodné sestavy vozidel, typicky u nákladních vlaků, jsou však brzdé křivky vypočítávány právě tímto způsobem. Opačná situace nastává v případě použití ucelených jednotek, kdy jsou na základě zkoušek (podkladů daných výrobcem vozidla), známy přesné parametry brzdných křivek daného typu vozidla. Vlaky s takto vytvořenou brzdou křivkou se označují jako – *gamma trains*, použitou metodu jejich stanovení jako – *gamma method*.

Další nedílnou součástí problematiky stanovování brzdných křivek je nepřesnost určení polohy vlaku. V podmínkách ETCS dochází k načtení přesné polohy vlaku při průjezdu balízovou skupinou (zde se uplatní pouze národní hodnota nepřesnosti umístění balízy, která je rovna právě 12 metrů). Odchylka měření od posledního referenčního bodu se potom stanovuje jako $\pm 5\text{m} + 5\%$ z ujeté vzdálenosti od posledního místa měření. Chyba měření se označuje jako chyba odometrie. Vzhledem ke skutečnosti, že v libovolném okamžiku jízdy vlaku existuje několik možných poloh čela vlaku, je nutné definovat několik dalších pojmů: maximální čelo vlaku – je fiktivní bod, kde se čelo vlaku může po přičtení maximální chyby odometrie nacházet, minimální čelo vlaku – je fiktivní bod, kde se čelo vlaku může po odečtení maximální chyby odometrie nacházet. Vzdálenost mezi maximálním a minimálním čelem vlaku se označuje jako konfidenční interval (Δt_{est}). Graficky je konfidenční interval zobrazen na obrázku 21.

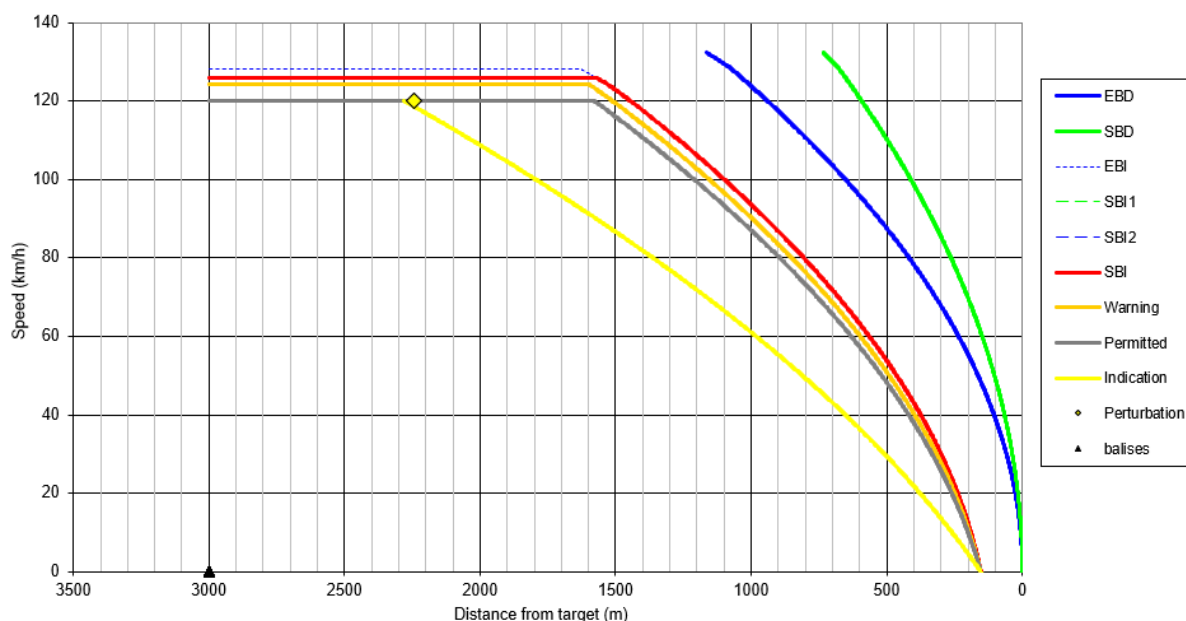


Obrázek 21 Vyjádření konfidenčního intervalu

Zdroj: autor

Existuje několik typů brzdných křivek, které jsou kontinuálně modelovány vlakovou částí ETCS (podrobněji popsáno v kapitole 2.2). Z hlediska modelování jsou pro výpočet nejdůležitější provozní brzdná křivka – *Service brake deceleration* (SBD) a nouzová brzdná křivka – *Emergency brake deceleration* (EBD). Od nich je odvozena křivka – *Indication* (I), která je v modelu použita jako křivka pro provozní brzdění.

Pro samotné modelování brzdných křivek je použit nástroj EraTool, který je oficiálním nástrojem pro generování brzdných křivek dle baseline 3. Všechny uvažované soupravy byly modelovány jako *lambda trains*. Na obrázku 22 je uveden příklad určení parametrů brzdných křivek pro vlak kategorie Nex. Základní parametry brzdných křivek ETCS (Indication) jsou uvedeny v tabulce 10.



Obrázek 22 Příklad modelu brzdných křivek v nástroji EraTool

Zdroj: autor

Vymodelované brzdné křivky bylo nutné dále převést do nástroje OpenTrack a zadat ke konkrétním soupravám. OpenTrack sice umožňuje zadání předvolené funkční tabulky pro ETCS L2, ale pro účely výzkumné části této práce je tato funkce nedostatečná.

Tabulka 10 Brzdné parametry použitých vlakových souprav – ETCS ideální podmínky

Kategorie vlaku	Souprava	Dráha potřebná k zastavení [m]	Čas potřebný k zastavení [s]
Nex	ř. 386 (Metrans); 24 Sggrs	1524	82
Pn	ř. 356.5 (ČDC); 45 Eas	1473	98
Mn	ř. 742 (ČDC); 10 Eas; 5 Falls; 5 Zas	774	65
Ex	ř. 680 (ČD)	2470	86
R	ř. 380 (ČD); 4 Bmz; 1 Bdgmee; 1 Ampz	1556	63
Os	ř. 640 (ČD)	1354	56
MOs	ř. 854 (ČD)	958	63

Zdroj: autor

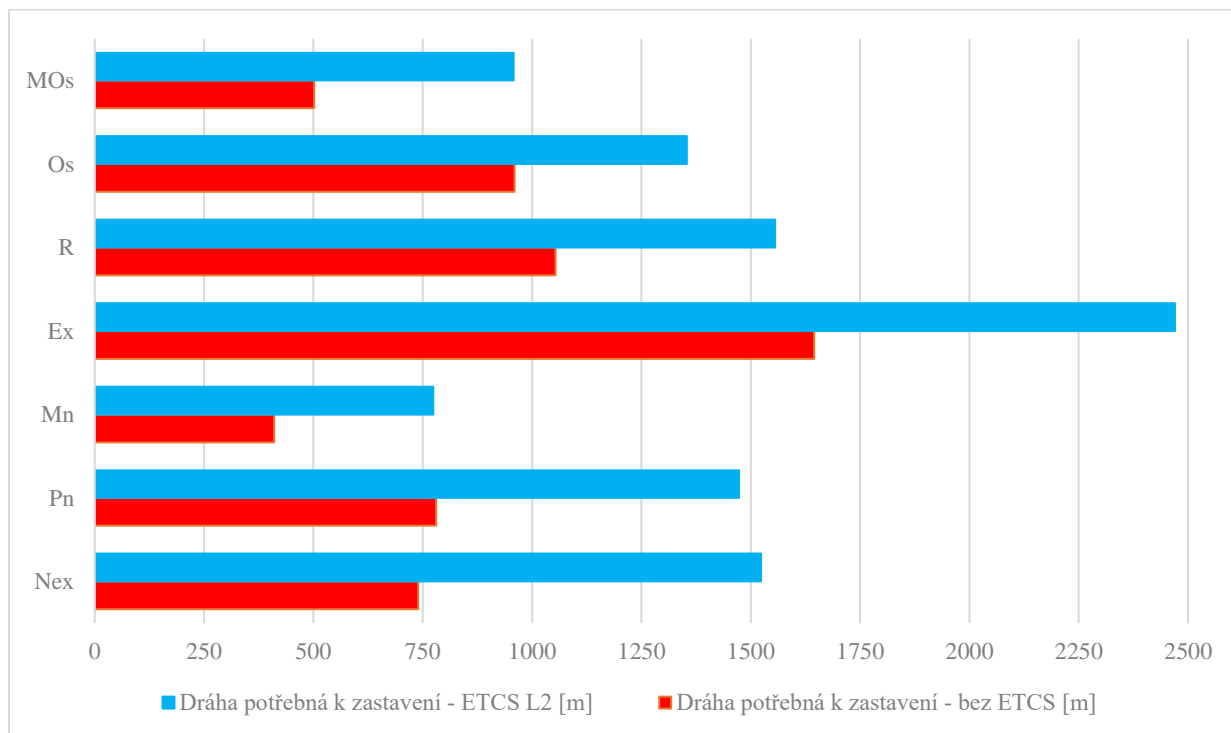
Vzájemné porovnání brzdných křivek

Pro účely ověření fungování vymodelovaných brzdných křivek byl sestaven porovnávací simulační model, na kterém byla ověřena správnost předem vypočítaných brzdných křivek. Na základě výsledků tohoto modelu bylo vytvořeno srovnání obou způsobů stanovování brzdných křivek. Model byl vytvořen tak, aby podmínky pro simulaci byly ideální a dokonale odpovídaly předdefinovaným vstupním parametrům. Model se skládá ze dvou fiktivních stanic, trať má celkem 5 km. Každých 500 m je umístěna balízková skupina (referenční bod). Pro přímé porovnání brzdných křivek v této kapitole je ale u křivek ETCS odečtena odchylka odometrie (pro lepší vypovídací hodnotu srovnání obou způsobů brzdění). Model infrastruktury tohoto porovnávacího simulačního modelu je uveden na obrázku 23.

**Obrázek 23** Infrastrukturní část porovnávacího simulačního modelu**Zdroj:** autor v SW OpenTrack

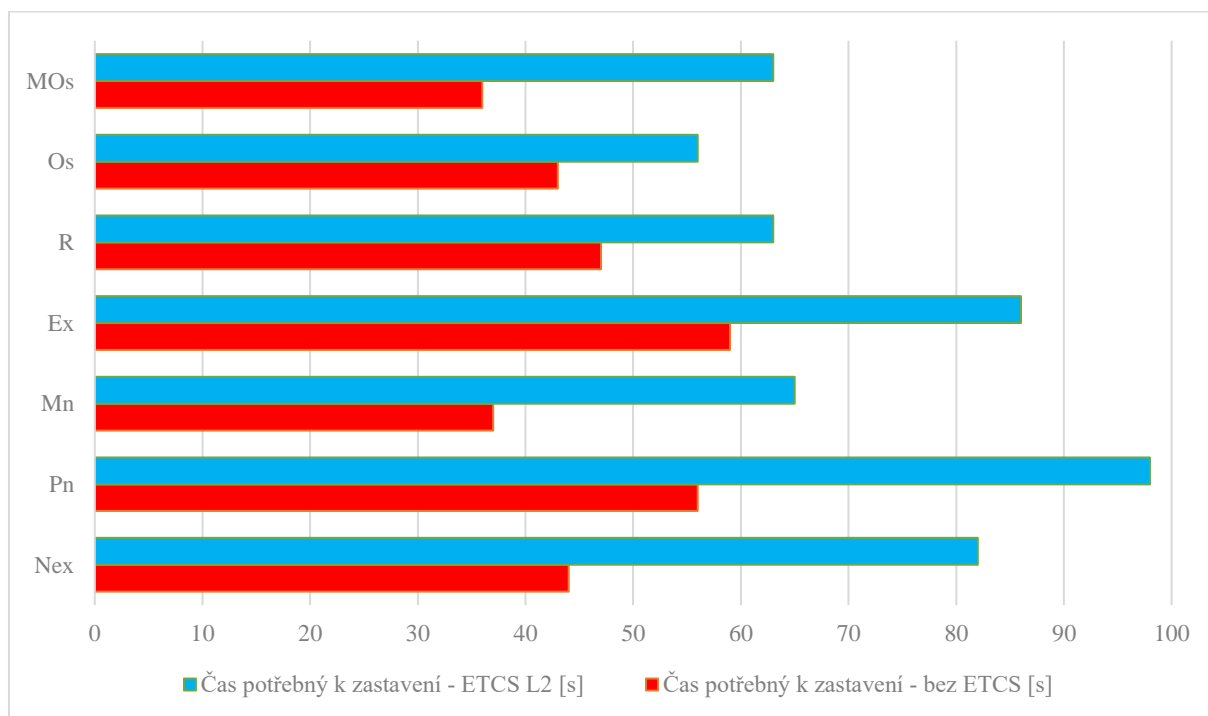
Z hlediska vlastního zadávání parametrů brzdných křivek pro konkrétní vlaky, je možné zvolit dva způsoby. Při prvním způsobu, který byl využit i v této práci, je pro každý vlak sestavena vlastní funkční tabulka brzdění (případně vlastní rovnice dle UIC modelu). Ve druhém případě je možné zadat parametry do jediné funkční tabulky, kdy se použije příslušná hodnota podle způsobu vybavení tratě ZZ. Pro sestavu tohoto simulačního modelu byl použit první z těchto způsobů. Dílčím výstupem tohoto modelu je vzájemné porovnání obou

způsobů brzdění (respektive dohledu nad brzděním). Na grafech na obrázcích 24 a 25 je uvedeno porovnání dráhy a doby potřebné k zastavení jednotlivých typů souprav.



Obrázek 24 Dráha potřebná k zastavení – porovnání

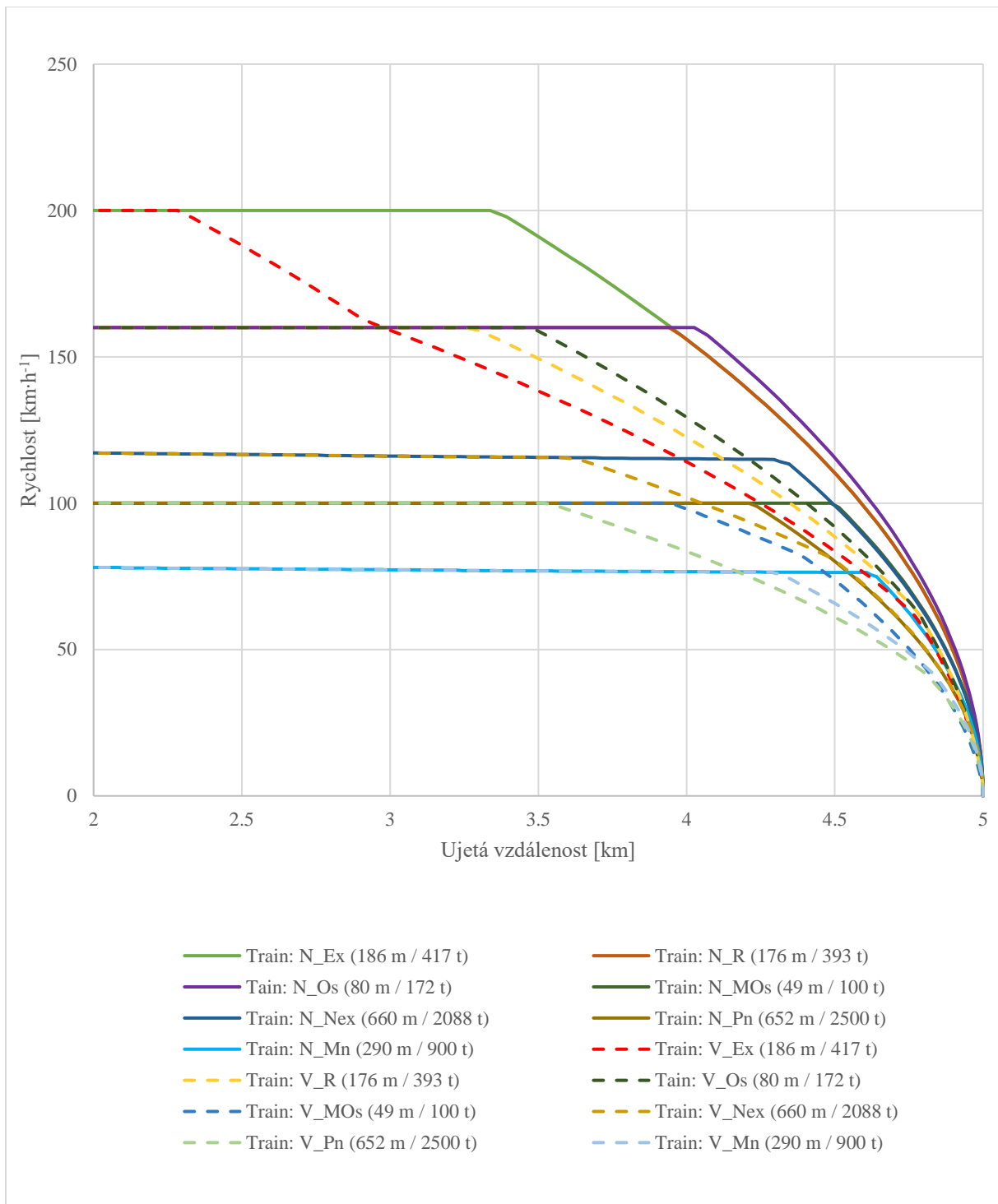
Zdroj: autor



Obrázek 25 Doba potřebná k zastavení – porovnání

Zdroj: autor

Jednotlivé brzdné křivky, které jsou výstupem programu OpenTrack, byly následně převedeny do grafů v MS Excel. Délka kroku simulace pro simulaci byla zvolena na 1 sekundu. Porovnání jednotlivých brzdných křivek ve složeném grafu je uvedeno na obrázku 26. Rozdělený graf je potom součástí přílohy D.



Obrázek 26 Porovnání jednotlivých brzdných křivek

Zdroj: autor

Upravený brzdňý model pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech

Pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech není prozatím definován jednotný standard. Proto v tomto případě nelze naplno využít modelování brzdňých křivek prostřednictvím nástroje EraTool. Autor se rozhodl využít model bezpečného rozestupu vlaků, který je uveden v kapitole 2.2 na obrázku 8, který vychází ze standardů IEEE 1474.1. Pro účely simulačního modelu sestaveného v této práci byl tento model autorem upraven. Bezpečný rozestup vlaků se určuje pomocí dvou klíčových složek. První složkou je bezpečná zábrzdňá vzdálenost (s_{bzv}), druhou složkou je nejistota určení polohy následňých vlaků (s_{nup}). Pro určení bezpečného rozestupu vlaků je použit vzorec [9].

$$S_{brv} = s_{bzv} + s_{nup} \quad [9]$$

kde:

S_{brv} ... bezpečný rozestup vlaků [m]

s_{bzv} ... bezpečná zábrzdňá vzdálenost [m]

s_{nup} ... nejistota určení polohy vlaků [m]

Nejistota určení polohy obou vlaků vychází z chyby měření polohy, která je závislá na vzdálenosti balíz (případně jiných referenčních bodů). Tato chyba odometrie činí $\pm 5\%$. Maximální rozestup balíz v použitém modelu je 500 metrů. Maximální nejistota určení polohy vlaků je tedy pro všechny vlaky 30 m. Takto je vypočtena výsledná hodnota bezpečného rozestupu vlaků. Pro skutečné fungování v praxi a pro správnou funkci simulačního modelu je dále potřeba dosadit hodnotu bezpečnostní vzdálenosti, která je určena podle vzorce [10].

$$S_{bezp} = s_{nup} + (s_{prov} - s_{bzv}) \quad [10]$$

kde:

S_{bezp} ... bezpečnostní vzdálenost [m]

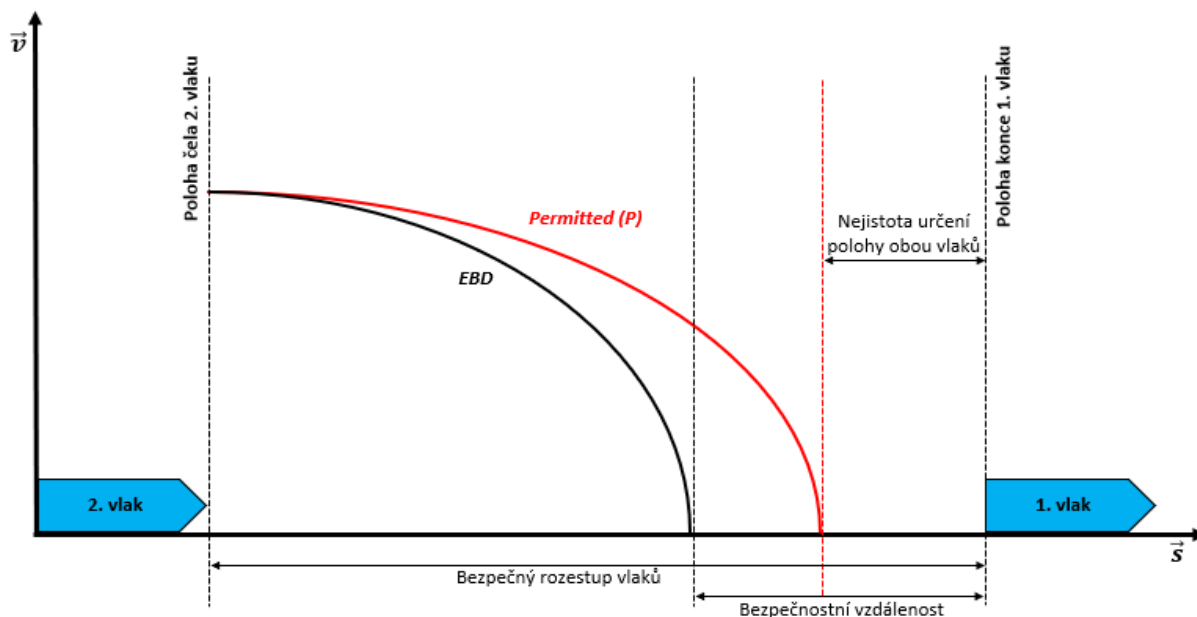
s_{nup} ... nejistota určení polohy vlaků [m]

s_{bzv} ... bezpečná zábrzdňá vzdálenost [m]

s_{prov} ... zábrzdňá vzdálenost při provozním brzdění [m]

Výsledkem je upravený model bezpečného rozestupu vlaků (obrázek 27). Pro určení zábrzdňých vzdáleností, byly použity křivky vymodelované prostřednictvím nástroje EraTool.

Pro stanovení průběhu křivky provozního brzdění byla zvolena v tomto případě křivka *Permitted (P)*, pro stanovení křivky nouzového brzdění byla zvolena křivka *EBI*.



Obrázek 27 Upravený model bezpečného rozestupu vlaků

Zdroj: autor

Konkrétní hodnoty bezpečnostní vzdálenosti vypočtené podle vzorce [10] pro použití v simulačním modelu jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Hodnoty bezpečnostní vzdálenosti pro plovoucí oddíl

Kategorie vlaku	Souprava	Bezpečnostní vzdálenost [m]
Nex	ř. 386 (Metrans); 24 Sggrs	192
Pn	ř. 356.5 (ČDC); 45 Eas	170
Mn	ř. 742 (ČDC); 10 Eas; 5 Falls; 5 Zas	148
Ex	ř. 680 (ČD)	282
R	ř. 380 (ČD); 4 Bmz; 1 Bdgmee; 1 Ampz	237
Os	ř. 640 (ČD)	238
MOs	ř. 854 (ČD)	171

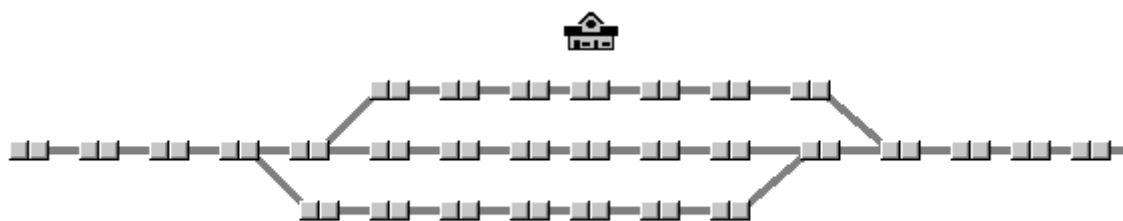
Zdroj: autor

6.5 Sestava simulačního modelu

Sestava simulačního modelu metodicky vychází z metodiky popsané v kapitole 6.3. V této kapitole jsou dále rozvedeny konkrétní specifikace pro model, který byl vypracován pro účely této disertační práce.

Zadávání parametrů infrastruktury

Základem simulačního modelu je síťový graf, jehož vrcholy jsou tvořeny dvoubody – *Vertex*. Do každého z těchto dvoubodů lze umístit jeden rozhodný prvek pro každý směr jízdy. Každý dvoubod má přesně danou kilometrickou polohu. Speciálním případem je staniční dvoubod – *Station vertex*, který reprezentuje kilometrickou polohu daného dopravního bodu (stanice, odbočky, zastávky atd.). Všechny vrcholy grafu jsou vzájemně spojeny hranami – *Edges*, které mají přesně definované parametry (sklon, směrové uspořádání rychlostní profil, trakční napájecí soustavu, přenos signálu vlakového zabezpečovače, ETCS, parametry tunelu atd.). Příklad jednoduchého modelu stanice pro ilustraci vytvořené dopravní sítě v SW OpenTrack je uveden na obrázku 28.



Obrázek 28 Příklad vytvořené dopravní sítě v SW OpenTrack

Zdroj: autor

Zadávání parametrů jízdních cest

Do připravené dopravní sítě je nutné vložit parametry jízdních cest. Za tímto účelem je nejdříve nutné rozdělit dopravní síť na traťové a staniční úseky. Staniční úseky zahrnují všechny dopravní s kolejovým rozvětvením a lze je slučovat po skupinách dvoubodů. Od každého návěstidla k následujícímu návěstidlu (pro zamýšlený směr jízdy) je nutné vložit jízdní cestu – *Routes*. Pro účely tohoto simulačního modelu se jedná pouze o vlakové cesty, protože simulace posunu je nad rámec řešené oblasti. Každá vlaková cesta má parametry určené závěrovou tabulkou, situačním schématem, tabulkou jízdních cest a dopravním programem dané dopravní. V některých případech bylo nutné vložit více možných vlakových cest, které jsou vedeny přes stejné body, protože vlaková cesta má proměnné parametry. Parametry takové vlakové cesty se mění podle dalších vlakových cest, které ji mohou ovlivnit – jedná se o tzv. vlakové cesty s omezením (VCO). Při zadávání parametrů vlakových cest lze také zohlednit důležité podmínky pro fungování ETCS: absolutní a permisivní význam návěsti, dohlednost návěstidla, zónu omezení rychlosti, ochranné dráhy, uvolňovací rychlost atd. Již vytvořené *Routes* jsou potom v modelu zobrazeny světle červenou barvou na dvoubodu, kde jízdní cesta začíná.

Takto vytvořené *Routes* je následně nutné sloučit do skupin – *Paths*, které mohou zahrnovat jednu, nebo několik *Routes*. Jednotlivé *Paths* poskytují několik možností, jak projet určitou částí dopravní sítě (typicky varianty průjezdu stanicí). Význam *Paths* spočívá především v přípravě pro další stupeň tvorby modelu, kdy jsou jednotlivé *Paths* sdružovány do itinerářů jízdy – *Itineraries*.

Itineraries jsou základem pro tvorbu tras vlaků. Každé trase vlaku je přiřazený konkrétní itinerář jízdy, případně skupina itinerářů jízdy. Každému itineráři je potom přiřazena priorita. Například standartní itinerář předpokládá průjezd stanicí po 1. staniční koleji (priorita 1). V případě, že nelze využít průjezd po 1. staniční koleji je SW automaticky vybrán náhradní itinerář pro průjezd po jiné koleji. Tímto způsobem lze měnit dopravní dispozici v průběhu běhu modelu. Tyto možnosti simulace však nelze zaměňovat s dispečerským řízením, protože v podstatě umožňují řešení pouze jednoduchých dopravních situací. Správné nastavení priorit je však důležité z hlediska běhu simulace, především v případě simulace zpoždění a poruch.

Zadávání parametrů vozidel

Důležitým výchozím parametrem modelu jsou použitá vozidla. Autor se rozhodl provést analýzu používaných souprav na síti Správy železnic, s. o., kdy na základě této analýzy vytvořil za každou ze zvolených kategorií vlaků tzv. typickou soupravu, která reprezentuje některou z uvažovaných kategorií vlaků. Celkem je v simulačním modelu popisovaném v této kapitole použito 7 typických souprav, které reprezentují jednotlivé kategorie vlaků, jsou to:

- Expresní nákladní vlak (Nex);
- Průběžný nákladní vlak (Pn);
- Manipulační nákladní vlak (Mn);
- Expresní vlak (Ex);
- Rychlík (R);
- Osobní vlak (Os);
- Motorový osobní vlak (MOs).

Základní přehled parametrů těchto souprav je uveden v tabulce 12. Jedná se o parametry klíčové pro správné sestavení simulačního modelu. Trakční charakteristika jednotlivých hnacích vozidel vychází z vlastní databáze vytvořené v SW OpenTrack. Názorný příklad zadání trakční charakteristiky do simulačního modelu je uveden v kapitole 7.2. Brzdné charakteristiky jednotlivých souprav jsou do simulačního modelu zadány na základě modelu brzdných křivek, který je popsán v kapitole 6.4.

Tabulka 12 Parametry použitých vlakových souprav

Kategorie vlaku	Souprava	Celková hmotnost [t]	Délka [m]	Skutečné brzdící procento [%]	Maximální rychlost [km·h ⁻¹]
Nex	ř. 386 (Metrans); 24 Sggrs	2500	660	115	120
Pn	ř. 356.5 (ČDC); 45 Eas	2500	651	71	100
Mn	ř. 742 (ČDC); 10 Eas; 5 Falls; 5 Zas	900	290	89	80
Ex	ř. 680 (ČD)	417	185	145	200
R	ř. 380 (ČD); 4 Bmz; 1 Bdgmee; 1 Ampz	393	176	145	160
Os	ř. 640 (ČD)	172	79	162	160
MOs	ř. 854 (ČD)	100	49	117	100

Zdroj: databáze SW OpenTrack

Zadávání jízdního řádu

Dopředu zkonstruovaný jízdní řád se týká pouze kombinované (třetí) části tříúrovňového simulačního modelu. V kombinované části existuje ucelený traťový úsek, kde lze porovnávat charakteristiky vyplývající z posuzování stability jízdního řádu.

Pro první a druhou úroveň tříúrovňového simulačního modelu je však také nutné definovat některé náležitosti vlakových tras. Náležitosti konkrétních vlakových tras se v SW OpenTrack provádí v menu *Courses and Services*. Na základě dříve vytvořených podkladů, se každé vlakové trase přiřadí tyto náležitosti: číslo vlaku, kategorie vlaku, způsob obsazování trati, itineráře jízdy a jejich preferenci, maximální úroveň využitelného trakčního výkonu (v %), maximální úroveň využitelného brzdného výkonu (v %). Pro testovací jízdy v prvních dvou úrovních modelu není nutné stanovovat konkrétní časovou polohu spojů.

Pro jednoduchý přehled bylo zvoleno jednotné číslování vlakových tras. V celém simulačním modelu popsaném v kapitole 6.6 platí pro jednotlivé kategorie vlaků následující pravidla číslování vlakových tras:

- 40XXX – pro vlaky kategorie Nex,
- 60XXX – pro vlaky kategorie Pn,
- 82XXX – pro vlaky kategorie Mn,
- 3XX – pro vlaky kategorie Ex,
- 8XX – pro vlaky kategorie R,
- 46XX – 47XX pro vlaky kategorie Os,
- 48XX pro vlaky kategorie MOs.

V třetí úrovni simulačního modelu a také v modelu reálné infrastruktury uvedeném v kapitole 6 již bylo nutné do modelu zapracovat jízdní řád. Pro reálný systém je možné využít zkonstruovaný jízdní řád, ale pro simulační model sestavený a popsáný v této kapitole konkrétní jízdní řád k dispozici není. Proto je nutné nejdříve takový jízdní řád sestavit. V tomto případě je zapotřebí stanovit výchozí čas a výchozí bod simulace, dále také body pro zastavení a následně spustit simulaci. Z průběhu simulace lze potom stanovit výchozí jízdní řád, který lze použít pro další simulaci. Při tvorbě jízdního řádu v tomto modelu jsou respektována pravidla daná směrnicí SŽ SM069 – Směrnice pro tvorbu jízdního řádu a přidělování a využívání kapacity dráhy ve znění změny č. 1 (105). Pro zjednodušení práce s programem OpenTrack lze spoje, které se periodicky opakují kopírovat. V takovém případě se časové polohy následujících spojů zkopírují a posunou o předem zvolený čas vůči původnímu jízdnímu řádu. Nevýhodou tohoto přístupu je, že je náročnější odhalit případné chyby v modelu a následně provést jeho kalibraci a validaci.

Kalibrace modelu

Vzhledem ke skutečnosti, že při sestavě modelu může dojít k nepřesnostem a chybám, je zapotřebí platnost modelu nejdříve ověřit, tedy provést tzv. verifikaci modelu. Verifikací modelu je ověřeno, zda zpracovaný simulační model odpovídá zadání a obsahuje všechny důležité vstupní parametry, které jsou rozhodné pro správnou funkci modelu. Nejprve jsou ověřována vstupní data a metodika jednotlivých výpočtů a kroků simulace. Následně je zkontrolována vlastní funkčnost modelu. Dalším krokem procesu je upřesnění nastavení modelu. To spočívá především v ověření citlivosti modelu na změnu vstupních dat. Je totiž zapotřebí ověřit, zda jsou všechny vstupní parametry správné a je prokázán jejich vliv na výstupní data modelu. V rámci procesu kalibrace by měla být odhalena i chyba modelu a případné nepřesnosti, které je zapotřebí odstranit.

Kalibrace modelu začíná sestavením ověřovacího provozního konceptu. Ověřovací provozní koncept je modelem výchozího stavu, kdy je daná infrastruktura provozována konvenčním způsobem. V případě tříúrovňového simulačního modelu je výchozím stavem infrastruktura, která je řízena prostřednictvím systémů elektronických stavědel ve stanicích, elektronického autobloku v traťových úsecích a která je vybavena traťovou částí národního vlakového zabezpečovače LS. Na této části je testována správnost modelu. Po provedení kalibrace je simulační model následně ještě upraven pro použití v automatizovaných úrovních řízení jízdy vlaku. Taková úprava musí vylučovat ovlivnění chování referenční varianty modelu.

Validace modelu

Validace simulačního modelu musí být provedena na srovnání výsledků modelu s reálnými daty. Za tímto účelem je nutné sestavit simulační model reálné infrastruktury, který vychází ze zásad pro sestavení tříúrovňového simulačního modelu. Validace modelu je provedena na datech získaných z reálného provozování systému ETCS L2. Výsledky validace simulačního modelu jsou podrobně zpracovány a vyhodnoceny v kapitole 7. Cílem vyhodnocení výsledků modelu a jejich srovnání s reálnými daty je dokázat správnost funkce modelu v podmínkách, které nebyly předmětem kalibrace.

6.6 Simulace – tříúrovňový simulační model

Podle definice simulačního modelu vyslovené v kapitole 6.2, je v této části přistoupeno k samotnému procesu simulace. Simulační model je připraven pro všechny tři úrovně. V jednotlivých částech této kapitoly je popsán průběh simulací.

Simulace traťové části – první úroveň (T)

Simulační model pro první úroveň je sestaven na zkušební 10 km dlouhé trati, tak jak je popsáno v kapitole 6.5. Pro vyhodnocení výsledků simulace traťové části je využita metoda porovnání velikosti následných mezidobí podle sledu jednotlivých vlaků. Pro stanovení následného mezidobí je nutné provést simulaci každé uvažované dvojice vlaků podle směrnice SŽDC SM 104 (76). Ke stanovení následného mezidobí je využit integrovaný nástroj SW OpenTrack tzv. *Headway Calculator*. Tento nástroj testuje, pomocí násobné simulace, hodnoty následného mezidobí. Metodou půlení intervalu je potom určena výsledná hodnota. Nástroj umožňuje zadání několika vstupních podmínek, které se odlišují mírou zatížení výpočtu konflikty mezi následnými vlaky. Pro potřeby tohoto modelu byl jako výchozí určen bezkonfliktní model, ve kterém vlaky navzájem nesmějí ovlivňovat svoji jízdu. V případě potřeby (například při simulaci výlukových stavů) lze testovat i různé konfliktní varianty. V takových případech je důležité maximalizovat počet realizovaných vlakových tras, u kterých pak může být ovlivněna kvalita trasy (z pohledu dodržování jízdního řádu) a plynulost jízdy.

Pro potvrzení správnosti výpočtu následného mezidobí, bylo provedeno 2352 replikací. Každá dvojice vlaků byla tedy několikanásobně testována na každém z vytvořených modelů trati s odpovídající velikostí fixního prostorového oddílu. Z výsledků byla sestavena tabulka hodnot, ze kterých je možné vyjádřit vzájemný vztah velikosti následného mezidobí na délce prostorových oddílů. Aby bylo možné zkoumat vliv parametrů vlaků, které mají vliv na velikost následného mezidobí, byly vlaky rozděleny do skupin uvedených v tabulce 13.

Tabulka 13 Skupiny simulovaného pořadí vlaku

Označení skupiny	Popis skupiny	Simulované (testované) pořadí vlaků
Skupina 1	první a druhý vlak mají stejné parametry	$Nex \rightarrow Nex; Pn \rightarrow Pn; Mn \rightarrow Mn; Nex \rightarrow Nex; R \rightarrow R; Os \rightarrow Os; MOs \rightarrow MOs$
Skupina 2	první vlak má nižší skutečnou rychlost než druhý vlak	$Nex \rightarrow Ex; Nex \rightarrow R; Nex \rightarrow Os; Pn \rightarrow Nex; Pn \rightarrow Ex; Pn \rightarrow R; Pn \rightarrow Os; Mn \rightarrow Nex; Mn \rightarrow Pn; Mn \rightarrow Ex; Mn \rightarrow R; Mn \rightarrow Os; Mn \rightarrow MOs; R \rightarrow Ex; Os \rightarrow Ex; MOs \rightarrow Nex; MOs \rightarrow Ex; MOs \rightarrow R; MOs \rightarrow Os$
Skupina 3	první vlak má vyšší skutečnou rychlost než druhý vlak	$Nex \rightarrow Pn; Nex \rightarrow Mn; Nex \rightarrow MOs; Pn \rightarrow Mn; Ex \rightarrow Nex; Ex \rightarrow Pn; Ex \rightarrow Mn; Ex \rightarrow R; Ex \rightarrow Os; Ex \rightarrow MOs; R \rightarrow Nex; R \rightarrow Pn; R \rightarrow Mn; R \rightarrow MOs; Os \rightarrow Nex; Os \rightarrow Pn; Os \rightarrow Mn; Os \rightarrow MOs; MOs \rightarrow Mn$
Skupina 4	první a druhý vlak mají stejnou délku	$Nex \rightarrow Nex; Pn \rightarrow Pn; Mn \rightarrow Mn; Ex \rightarrow Ex; R \rightarrow R; Os \rightarrow Os; MOs \rightarrow MOs; Nex \rightarrow Pn; Pn \rightarrow Nex; Ex \rightarrow R; R \rightarrow Ex; Os \rightarrow MOs; MOs \rightarrow Os$
Skupina 5	první vlak má větší skutečnou délku než druhý vlak	$Nex \rightarrow Mn; Nex \rightarrow Ex; Nex \rightarrow R; Nex \rightarrow Os; Nex \rightarrow Os; Nex \rightarrow MOs; Pn \rightarrow Mn; Pn \rightarrow Ex; Pn \rightarrow R; Pn \rightarrow Os; Pn \rightarrow MOs; Mn \rightarrow Ex; Mn \rightarrow R; Mn \rightarrow Os; Mn \rightarrow MOs; Ex \rightarrow Os; Ex \rightarrow MOs; R \rightarrow Os; R \rightarrow MOs$
Skupina 6	první vlak má menší skutečnou délku než druhý vlak	$Mn \rightarrow Nex; Mn \rightarrow Pn; Ex \rightarrow Nex; Ex \rightarrow Pn; Ex \rightarrow Mn; R \rightarrow Nex; R \rightarrow Pn; R \rightarrow Mn; Os \rightarrow Nex; Os \rightarrow Pn; Os \rightarrow Mn; Os \rightarrow Ex; Os \rightarrow R; MOs \rightarrow Nex; MOs \rightarrow Pn; MOs \rightarrow Mn; MOs \rightarrow Ex; MOs \rightarrow R$

Zdroj: autor

Referenční varianta – v této variantě je provedena simulace na trati vybavené trojznakovým autoblokem. Vzhledem k tomu, že se jedná o referenční variantu, je vyhodnocena pouze pro jednu délku prostorového oddílu stanovenou na 1 km, trať je pak tedy celkově rozdělena 10 prostorových oddílů. Dílčí výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 Průměrné hodnoty následných mezidobí – referenční varianta (T)

Označení skupiny	Referenční varianta
Celkem [s]	122
Skupina 1 [s]	84
Skupina 2 [s]	210
Skupina 3 [s]	56
Skupina 4 [s]	80
Skupina 5 [s]	165
Skupina 6 [s]	78

Zdroj: autor

Přechodová varianta – v této variantě je provedena simulace trati vybavené systémem ATC umožňujícím provoz v pevných prostorových oddílech (tyto oddíly jsou pouze virtuální). Simulace odpovídá, v systému ERTMS, vybavení trati na úrovni ETCS L2. V této části

simulace je využito rozdělení trati na různě dlouhé prostorové oddíly o délkách 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 a 0,1 km. Dílčí hodnoty průměrných následných mezidobí pro jednotlivé skupiny jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 Průměrné hodnoty následných mezidobí – přechodová varianta (T)

Označení skupiny	Délka oddílu [km]									
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Celkem [s]	135	133	131	129	126	122	119	116	113	111
Skupina 1 [s]	99	96	93	90	87	80	77	74	70	63
Skupina 2 [s]	230	229	227	225	222	219	218	216	215	216
Skupina 3 [s]	62	61	59	57	53	50	45	41	36	35
Skupina 4 [s]	93	90	88	86	83	78	74	70	66	61
Skupina 5 [s]	177	175	173	171	169	166	166	165	163	165
Skupina 6 [s]	111	110	108	106	101	98	93	87	84	83

Zdroj: autor

Cílová varianta – v této variantě je provedena simulace trati vybavené systémem ATC umožňujícím provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Jedná se o nejvyšší modifikaci provozu systému ATC. Vybavení vozidel i trati odpovídá systému ETCS na úrovni L3. Dílčí výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16 Průměrné hodnoty následných mezidobí – cílová varianta (T)

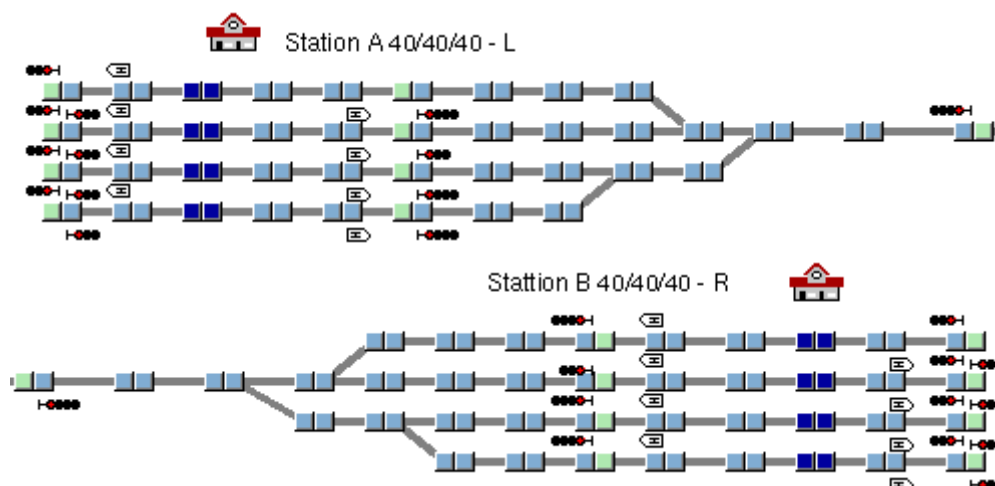
Označení skupiny	Cílová varianta
Celkem [s]	100
Skupina 1 [s]	56
Skupina 2 [s]	188
Skupina 3 [s]	37
Skupina 4 [s]	57
Skupina 5 [s]	142
Skupina 6 [s]	60

Zdroj: autor

Simulace staničních zhlaví – druhá úroveň (S)

Simulační model vytvořený pro tuto úroveň, je sestaven tak, aby na něm bylo možné sledovat vliv konfigurace staničního zhlaví a použitý typ systému ATC na následné mezidobí. Jsou respektovány náležitosti modelu uvedené v kapitole 6.5. Simulační model, který byl sestaven pro tuto úroveň se skládá vždy ze dvou zhlaví a záhlaví, přičemž každé je součástí jiné fiktivní dopravní. Délka záhlaví je stanovena pro každou ze čtyř simulovaných variant. Délka zhlaví je určena podle návrhové rychlosti výhybek v přímém i odbočném směru, ve smyslu předpisu SŽDC S3 Železniční svršek Díl IX Výhybky a výhybkové konstrukce (106). Vzdálenost vjezdových návěstidel fiktivních dopraven (pokud jsou zřízena) je vždy 5 km.

Pro jednotnost celého modelu byla stanovena jednotná šablona provedení staničního zhlaví. Tato typizovaná zhlaví se označují jako: typizované zhlaví L (levé zhlaví) a typizované zhlaví R (pravé zhlaví). Základní varianta provedení těchto typizovaných zhlaví (40/40/40) je uvedena na obrázku 29.



Obrázek 29 Typizovaná zhlaví pro variantu S

Zdroj: autor

Byly testovány celkem 4 varianty zhlaví, které reprezentují rychlostní skupiny 40, 60, 80 a 100 km·h⁻¹ při rychlosti jízdy vlaku do odbočky. Variantně byla měněna i délka záhlaví. Přehled parametrů jednotlivých variant je uveden v tabulce 17.

Tabulka 17 Přehled simulovaných variant staničních zhlaví

Označení varianty	Rychlost přes výhybky [km·h ⁻¹]								Délka záhlaví A/B [m]
	Stanice A				Stanice B				
	1.SK	2.SK	3.SK	4.SK	1.SK	2.SK	3.SK	4.SK	
Varianta (40/40/40)	40	40	40	40	40	40	40	40	400/600
Varianta (60/60/60)	60	60	60	60	60	60	60	60	400/600
Varianta (80/80/80)	80	80	80	80	80	80	80	80	600/800
Varianta (100/100/100)	100	100	100	100	100	100	100	100	600/800

Zdroj: autor

Z hlediska způsobu zabezpečení jízdy vlaku systémem ATC, je ve smyslu úvodní definice tříúrovňového simulačního modelu (kapitola 6.2), každá varianta rozdělena na tři dílčí podvarianty (referenční, přechodová a cílová).

Na připraveném modelu infrastruktury byla provedena vlastní simulace k určení hodnot následného mezidobí pro jednotlivé kombinace vlaků. Každá z dvojic vlaků byla simulována zvlášť, a to na všech zkušebních úsecích ve dvou variantách (příjezd do přední dopravní a odjezd ze zadní dopravní). Výstupem simulace jsou výstupní tabulky následných mezidobí,

ve kterých jsou uvedeny hodnoty následného mezidobí v sekundách pro jednotlivé kombinace vlaků. Výsledná hodnota mezidobí se pak spočítá jako maximum z každé dvojice hodnot. Stejně jako při simulaci traťové části – první úroveň (T), je pro získání hodnot následných mezidobí použit integrovaný nástroj SW OpenTrack – *Headway Calculator*.

V této úrovni modelu bylo provedeno celkem 7056 replikací. Každá dvojice vlaků byla otestována na každém z dvanácti připravených infrastrukturních modelů. Z výsledků byla sestavena tabulka hodnot, na kterých je možné pozorovat vliv vybavení tratě systémem ATC, v závislosti na způsobu provedení staničního zhlaví. Pro lepší možnost porovnání výsledků s první úrovní simulace, bylo respektováno pořadí vlaků ve skupinách tak, jak je uvedeno v tabulce 13, kde jsou porovnány naměřené průměrné hodnoty.

Referenční varianta – v této podvariantě je trať vybavena automatickým blokem a přenosem kódu národního vlakového zabezpečovače. Z hlediska rozdělení mezistaničního úseku, je zachováno rozčlenění na 5 traťových oddílů o délce 1 km. Dílčí výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18 Průměrné hodnoty následných mezidobí – referenční varianta (S)

Referenční varianta	40/40/40		60/60/60		80/80/80		100/100/100	
	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A
Celkem [s]	152	167	139	139	122	118	127	123
Skupina 1 [s]	142	160	125	123	110	105	111	108
Skupina 2 [s]	207	242	187	192	189	194	201	203
Skupina 3 [s]	93	102	93	96	56	54	60	55
Skupina 4 [s]	137	162	123	123	107	102	109	106
Skupina 5 [s]	198	199	176	173	159	156	161	158
Skupina 6 [s]	118	139	113	116	94	92	108	101

Zdroj: autor

Přechodová varianta – v této podvariantě je trať vybavena traťovou částí ETCS L2. Trať je rozdělena na 10 traťových oddílů o délce 500 metrů. Délka oddílu byla zvolena s ohledem na výsledky první úrovně modelu tak, aby co nejvíce korespondovala s naměřenými hodnotami. Významným posunem oproti referenční variantě je přesunutí bodu začátku omezení rychlosti před krajní výhybku. Dílčí hodnoty průměrných následných mezidobí pro jednotlivé skupiny jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19 Průměrné hodnoty následných mezidobí – přechodová varianta (S)

Přechodová varianta	40/40/40		60/60/60		80/80/80		100/100/100	
	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A
Celkem [s]	133	130	131	121	126	119	135	132
Skupina 1 [s]	114	113	117	101	114	103	137	111
Skupina 2 [s]	199	201	194	185	195	188	209	211
Skupina 3 [s]	63	72	62	72	61	61	62	61
Skupina 4 [s]	115	110	115	103	111	104	126	113
Skupina 5 [s]	178	176	170	162	162	156	166	168
Skupina 6 [s]	101	99	103	94	99	92	110	109

Zdroj: autor

Cílová varianta – v této podvariantě je trať vybavena traťovou částí ETCS L3. Veškeré fixní oddíly jsou v této úrovni zrušeny. Zkrácení omezení rychlosti je identické s přechodovou variantou. Zásadním rozdílem je způsob nastavování postupného rozpadu závěru vlakové cesty a přípravy následné vlakové cesty. To přímo souvisí se změnou způsobu obsazování a uvolňování staničního zhlaví. Dílčí hodnoty průměrných následných mezidobí pro jednotlivé skupiny jsou uvedeny v tabulce 20.

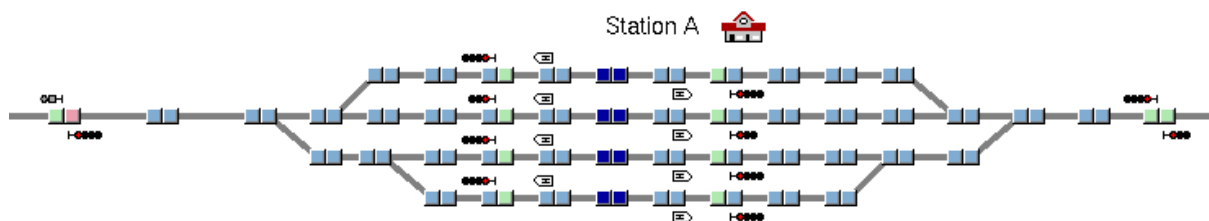
Tabulka 20 Průměrné hodnoty následných mezidobí – cílová varianta (S)

Cílová varianta	40/40/40		60/60/60		80/80/80		100/100/100	
	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A	směr A-B	směr B-A
Celkem [s]	111	109	101	100	96	97	95	97
Skupina 1 [s]	83	93	76	77	68	72	63	67
Skupina 2 [s]	200	192	182	178	174	173	173	174
Skupina 3 [s]	39	39	37	38	38	38	37	37
Skupina 4 [s]	90	91	83	83	76	81	73	77
Skupina 5 [s]	155	153	139	137	133	132	132	131
Skupina 6 [s]	81	77	77	76	75	75	75	77

Zdroj: autor**Simulace kombinované části – třetí úroveň (K)**

Třetí úroveň je modelem ucelené sítě, která metodicky vychází ze dvou předchozích úrovní tříúrovňového simulačního modelu. Z hlediska sestavy modelu je třetí úroveň nejnáročnější, protože kromě sestavy vlastní infrastrukturní a vozidlové části, vyžaduje ještě zkonstruování zkušební jízdního řádu. Pro potřeby této disertační práce byl sestaven model jednokolejné trati o celkové délce 34,6 km. Na trati jsou čtyři stanice, každá má čtyři dopravní koleje. Stanice jsou označeny jako: *Station A*, *Station B*, *Station C* a *Station D*. Jednotlivé

mezistaniční úseky mají vždy délku 5 km. Staniční koleje mají jednotnou délku 800 m. Délka zhlaví, záhlaví a rychlost pojiždění výhybek do odbočky respektuje rozdělení z předchozí úrovně modelu (viz tabulka 17). Výřez modelu trati pro referenční variantu je uveden na obrázku 30.



Obrázek 30 Výřez stanice A – varianta (K)

Zdroj: autor

Nákresný jízdní řád sestavený pro tento model je uveden v příloze E. Jízdní řád byl sestaven tak, aby v něm byly zastoupeny všechny zde uvažované kategorie vlaků: Nex, Pn, Mn, Ex, R, Os a MOs. Kategorie vlaků Nex, Pn a Mn jsou zastoupeny jedním párem vlaků, kategorie vlaků Ex a Os jsou zastoupeny třemi páry vlaků, kategorie MOs dvěma páry vlaků. Kategorii R zastupují celkem tři zkonstruované vlakové trasy. Jízdní řád byl sestaven s respektováním zásad směrnice SŽ SM069 – Směrnice pro tvorbu jízdního řádu a přidělování a využívání kapacity dráhy ve znění změny č. 1 (105), předpisu SŽ D1 ČÁST PRVNÍ ve znění změny č. 1 (107) a předpisu SŽ Z8 díl IV Evropský vlakový zabezpečovač (99).

Na rozdíl od předcházejících úrovní bylo na této úrovni nutné přiřadit k jednotlivým *Routes, Paths a Itineraries* prioritu. Přiřazení priorit je opatřením k zajištění správného sledu vlaků. Při křižování a předjíždění ve stanicích (zejména na jednokolejné trati) je zapotřebí tyto hodnoty citlivě nastavit, aby celý model správně fungoval. V základním nastavení není možné sestavit jízdní řád s maximálním využitím kapacity dané části infrastruktury.

Pro každou z podúrovní třetí úrovně (K) byl nejdříve simulován základní nákresný jízdní řád. Cílem této simulace bylo odhalení případných chyb modelu upraveného pro jednotlivé podvarianty. Dále bylo nutné spolehlivě ověřit, že nebude docházet ke konfliktům tras u dalších variant, protože z hlediska konstrukce nákresného jízdního řádu, byl jízdní řád sestaven pro referenční variantu. Z hlediska tohoto posouzení vyhověly všechny tři podúrovně.

Pro vyhodnocení simulace kombinované byla zvolena metoda přírůstku zpoždění. Přírůstek zpoždění je definován jako rozdíl mezi vstupní a výstupním zpožděním. Pro účely

tohoto modelu jsou zjišťovány hodnoty celé skupiny jízd vlaků podle navrženého jízdního řádu. Přírůstek zpoždění lze vypočítat podle vzorce [11].

$$\Delta d_t = \sum d_{out} - \sum d_{in} \quad [11]$$

kde:

Δd_t ... přírůstek zpoždění [s]

d_{out} ... zpoždění na výstupu ze systému [s]

d_{in} ... zpoždění na vstupu do systému [s]

Zdroj: (75)

Hodnoty vstupního zpoždění mohou být do modelu zadány několika způsoby. Do modelu mohou být zadány konkrétní hodnoty vstupního zpoždění, nebo je lze nastavit pomocí funkce. V modelu lze taky nastavit hodnoty pravděpodobnostní funkce (distribuční funkce) pro výpočet vzniku zpoždění *Initial delay* pro každou kategorii vlaků. Dalším způsobem je stanovení hodnot distribuční funkce pro vznik zpoždění ve stanici. Zpoždění dále může vznikat využíváním nástroje pro simulaci poruch jednotlivých prvků a omezení infrastruktury, tato volba je dostupná v menu *Incidents*.

Pro účely tohoto modelu se autor rozhodl pro využití nástroje *Delay Scenario*. U tohoto nástroje lze s výhodou aplikovat možnost nastavení zpoždění pro každý konkrétní vlak. Hodnota zpoždění se určuje podle stanovené distribuční funkce a střední hodnoty zpoždění. OpenTrack potom vypočítá náhodná čísla pro každý z uvažovaných scénářů. Vždy zde platí, že scénáře jsou zpětně reprodukovatelné, tedy že stejný scénář poskytne při stejné střední hodnotě zpoždění stejné hodnoty vstupního zpoždění, což je velmi vhodné pro účely simulace více způsobů zabezpečení jízdy vlaků. Podrobný přehled vygenerovaných vstupních zpoždění pro každou z variant je uveden v příloze F. Celkem bylo provedeno 630 replikací různých simulačních scénářů. Vstupní hodnoty zpoždění se pro každou podúroveň tohoto modelu opakují. Podrobnější popis simulace jednotlivých podúrovní je uveden v následujícím textu.

Referenční varianta – pro tuto variantu byl model sestaven tak, že respektuje vybavení trati automatickým blokem s velikostí jednoho oddílu 1 km (tedy vždy 5 prostorových oddílů v mezistaničním úseku). Dále je trať vybavena přenosem kódu vlakového zabezpečovače. Tato varianta je klíčová pro sestavu jízdního řádu. Jízdní řád navržený pro účely této disertační práce vychází právě z konvenčního způsobu zabezpečení jízdy vlaku obvyklém v podmínkách ČR.

Kalibrace modelu je v tomto případě významně náročnější než u o prvního a druhého stupně modelu. Vzhledem k tomu, že se jedná o model jednokolejné trati, bylo nutné důsledně

nastavit konfiguraci priorit u všech možných variant křižování. Následně byla provedena série ověřovacích simulací, které prokázaly správnost sestaveného modelu.

Dle výše popsaného mechanismu, s využitím funkce *Delay Scenario*, byly stanoveny hodnoty vstupního zpoždění, které byly následně reprodukovány i do dalších variant tohoto stupně simulačního modelu. Testovací hodnoty vstupního zpoždění jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21 Testovací hodnoty vstupního zpoždění – Delay Scenario

Vlak zpožděný na vstupu do simulace		Testovací hodnoty vstupního zpoždění [s]									
Kategorie vlaku	Číslo vlaku	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	Var. 8	Var. 9	Var. 10
Ex	100	120	12	30	52	79	113	162	245	915	16
R	803	120	249	110	47	6	177	82	20	347	133
Os	4600	120	17	49	91	157	318	16	34	71	124
MOs	4801	120	250	186	299	6	23	44	69	80	165
Nex	40000	120	23	5	280	95	178	274	185	125	57
Pn	60000	120	73	94	121	155	180	512	9	22	37
Mn	80001	120	533	146	52	9	154	71	13	207	95

Zdroj: autor

Kritickým bodem simulace zpoždění je kontrola průběhu simulace a předcházení předčasnému ukončení simulace (*tzv. Deadlock*). V případě, že nastane jev *Deadlock*, dojde k hromadění vlaků před jedním bodem a není možné dále v simulaci pokračovat. Do simulace lze také ze strany řešitele aktivně zasáhnout, změnit dopravní dispozici a příslušnou simulaci provést znovu. Tím je možné dosáhnout vyhodnocení libovolné testovací hodnoty zpoždění.

Výsledkem simulace jsou tabulky výstupního zpoždění *d_{OUT}*, které obsahují hodnoty výstupního zpoždění pro každý vlak v systému. V případě, že bylo v simulaci dosaženo záporného zpoždění, položí se toto zpoždění rovno 0. V tabulce 22 jsou uvedeny celkové hodnoty výstupního zpoždění pro jednotlivé varianty.

Tabulka 22 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – referenční varianta (K)

Vlak zpožděný na vstupu do simulace		Celkové výstupní zpoždění [s]									
Kategorie vlaku	Číslo vlaku	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	Var. 8	Var. 9	Var. 10
Ex	100	159	0	0	17	63	140	306	638	1919	0
R	803	73	336	63	0	0	171	35	0	815	86
Os	4600	0	0	0	0	16	233	0	0	0	0
MOs	4801	0	194	0	382	0	0	0	0	0	0
Nex	40000	0	0	0	105	0	0	100	11	0	0
Pn	60000	0	0	0	0	0	0	422	0	0	0
Mn	80001	7	678	32.2	0	0	41	0	0	94	0

Zdroj: autor

Přechodová varianta – v této podvariantě jsou trať i stanice vybaveny traťovou částí ETCS L2. Tato podvarianta vychází z modelu pro referenční variantu. Jednotlivé mezistaniční oddíly jsou rozděleny na 5 fyzických oddílů, každý z těchto oddílů je virtuálně rozdělen na dva oddíly o délce 500 m. Každý mezistaniční oddíl má celkem 10 prostorových oddílů. Délka oddílu byla zvolena s ohledem na výsledky první a druhé úrovně modelu tak, aby co nejvíce korespondovala s naměřenými hodnotami. V tabulce 23 jsou uvedeny celkové hodnoty výstupního zpoždění pro jednotlivé varianty.

Tabulka 23 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – přechodová varianta (K)

Vlak zpožděný na vstupu do simulace		Výstupní zpoždění [s]									
Kategorie vlaku	Číslo vlaku	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	Var. 8	Var. 9	Var. 10
Ex	100	168	0	0	17	63	147	316	648	1923	0
R	803	61	296	51	0	0	152	23	0	880	74
Os	4600	0	0	0	0	4	855	0	0	0	0
MOs	4801	0	287	25	483	0	0	0	0	0	0
Nex	40000	0	0	0	98	0	0	92	3	0	0
Pn	60000	0	0	0	0	0	0	422	0	0	0
Mn	80001	27	703	53	0	0	61	0	0	114	2

Zdroj: autor

Cílová varianta – v této variantě je provedena úprava simulačního modelu pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Pro tuto variantu byla všechna návěstidla přesunuta pouze do virtuální roviny, kde fungují jako definiční body pro jednotlivé jízdní cesty. Celkové hodnoty výstupního zpoždění pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24 Celkové hodnoty výstupního zpoždění – cílová varianta (K)

Vlak zpožděný na vstupu do simulace		Výstupní zpoždění [s]									
Kategorie vlaku	Číslo vlaku	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7	Var. 8	Var. 9	Var. 10
Ex	100	158	0	0	17	58	137	297	897	1910	0
R	803	63	290	53	0	0	146	25	0	601	76
Os	4600	0	0	0	0	15	220	0	0	0	0
MOs	4801	0	257	18	453	0	0	0	0	0	0
Nex	40000	0	0	0	95	0	0	89	0	0	0
Pn	60000	0	0	0	0	0	0	193	0	0	0
Mn	80001	27	647	53	0	0	61	0	0	114	0

Zdroj: autor

6.7 Vyhodnocení simulace a stanovení závěrů

V předcházející kapitole byly popsány dílčí výsledky simulací pro každou úroveň a variantu tříúrovňového simulačního modelu. V této kapitole bude provedeno komplexní vyhodnocení výsledků, včetně porovnání stanovených ukazatelů kapacity tratí. Tříúrovňový simulační model má stanovenou strukturu a posloupnost jednotlivých procesů, tato posloupnost je respektována i v tomto vyhodnocení. V následujících podkapitolách je tedy nejdříve provedeno vyhodnocení jednotlivých úrovní, na něj navazuje celkové vyhodnocení tříúrovňového simulačního modelu.

Vyhodnocení simulace trat'ové části – první úroveň (T)

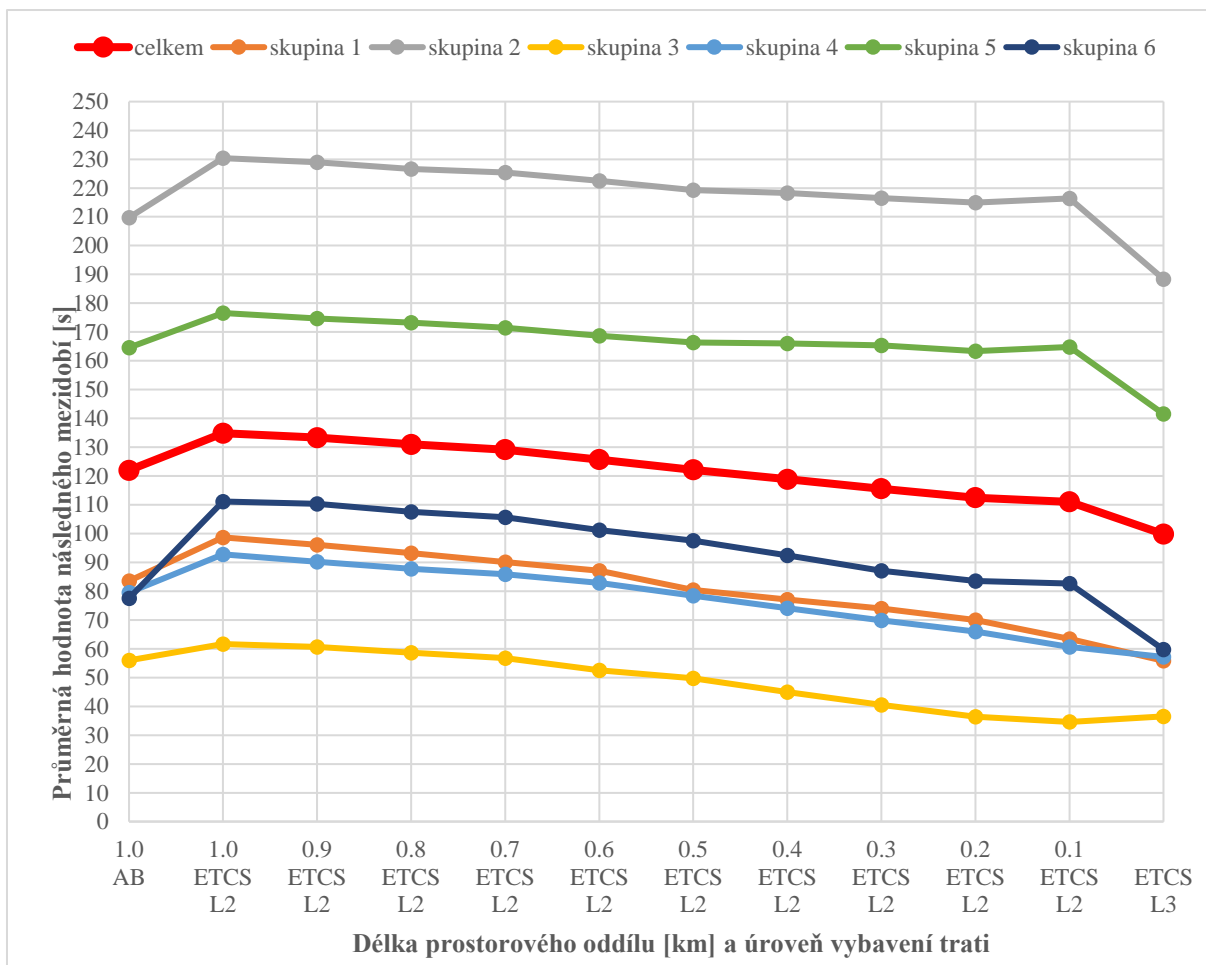
V tabulkách 14, 15 a 16 již byly představeny naměřené hodnoty následných mezidobí. Grafická reprezentace je uvedena na obrázku 31. Cílem tohoto grafického porovnání je především názorné posouzení vlivu použitého typu zabezpečovacího zařízení a délky prostorového oddílu (při využití ETCS L2), případně využití pohyblivého prostorového oddílu (při využití ETCS L3).

Z hlediska dalších kroků tříúrovňového simulačního modelu bylo v této úrovni dále nutné zjistit, jaká délka prostorového oddílu je ekvivalentní použití standardního automatického bloku. **Z naměřených hodnot vyplývá, že hodnota celkového průměrného následného mezidobí je 122 s, což odpovídá celkové průměrné hodnotě následného mezidobí pro prostorový oddíl o délce 0,5 km při použití ETCS úrovně L2 (přechodová varianta).**

Výsledky přechodové varianty, kdy byly simulovány všechny varianty délek pevných prostorových oddílů pro ETCS L2, lze proložit přímkou a existuje mezi nimi lineární závislost. V intervalu délky od 0,1 do 1,0 km lze lineární závislost charakterizovat následující rovnicí [12]. Grafická reprezentace tohoto vztahu je uvedena na obrázku 32.

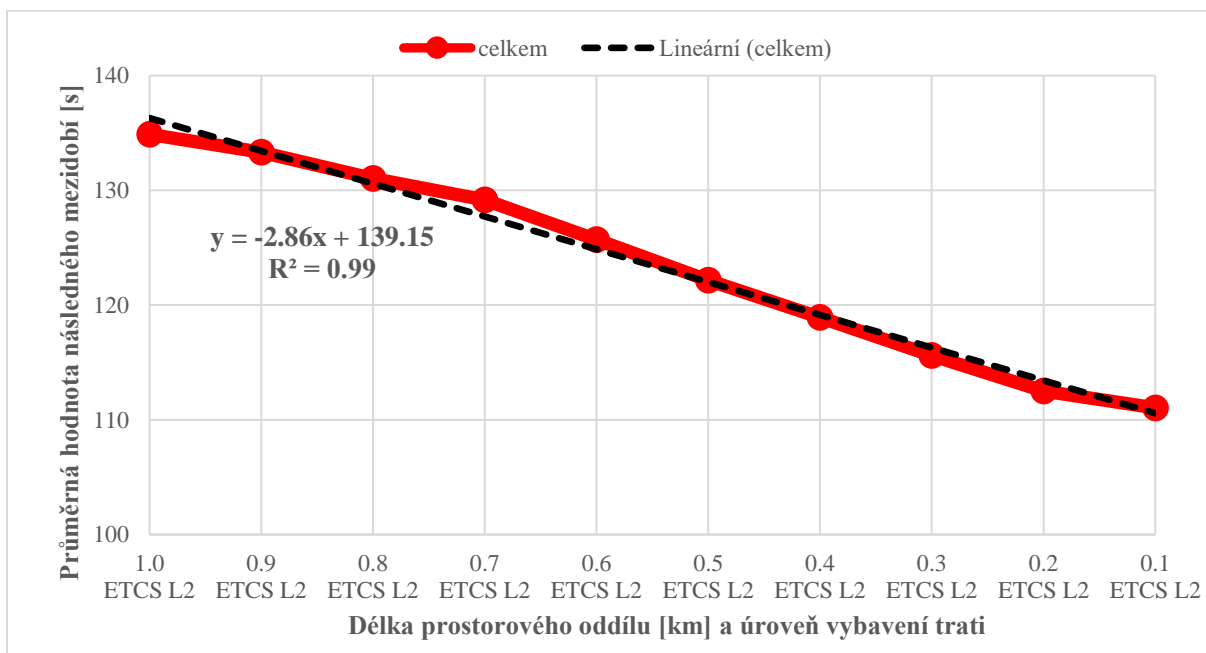
$$y = -2,86x + 139,15 \quad [12]$$

$$R^2 = 0,99$$



Obrázek 31 Graf celkových průměrných hodnot a průměrných hodnot následných mezidobí

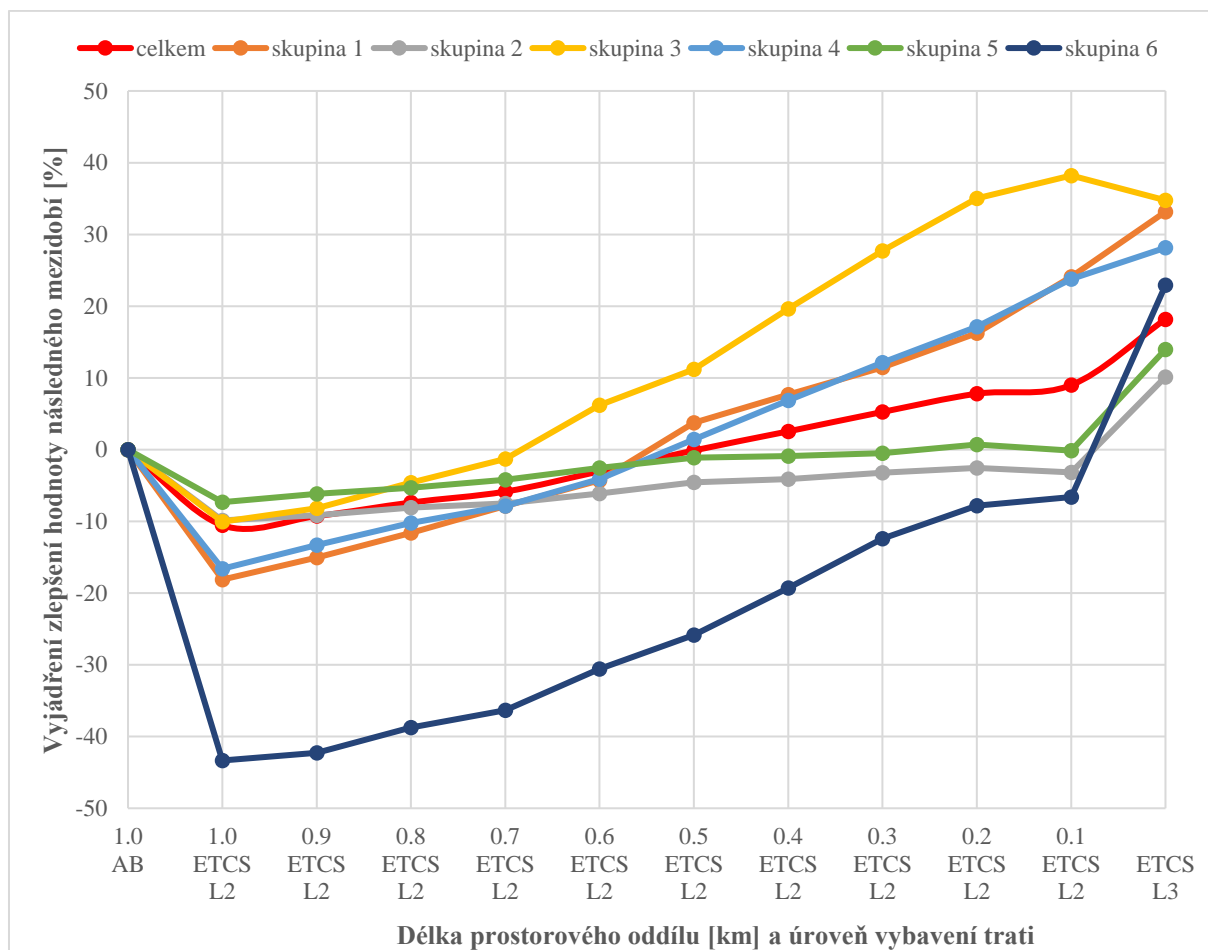
Zdroj: autor



Obrázek 32 Graf závislosti délky prostorového oddílu (ETCS L2) na následném mezidobí

Zdroj: autor

Z předchozího textu a z grafu na obrázku 31 je patrný přínos používání ETCS L2 s benefity a konečně největší přínos nasazení ETCS L3 a provozu v pohyblivých prostorových oddílech. Na obrázku 33 je zobrazeno procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí při aplikaci nových systémů ATC proti použití konvenčního způsobu zabezpečení.



Obrázek 33 Graf procentuálního vyjádření zlepšení hodnot následného mezidobí

Zdroj: autor

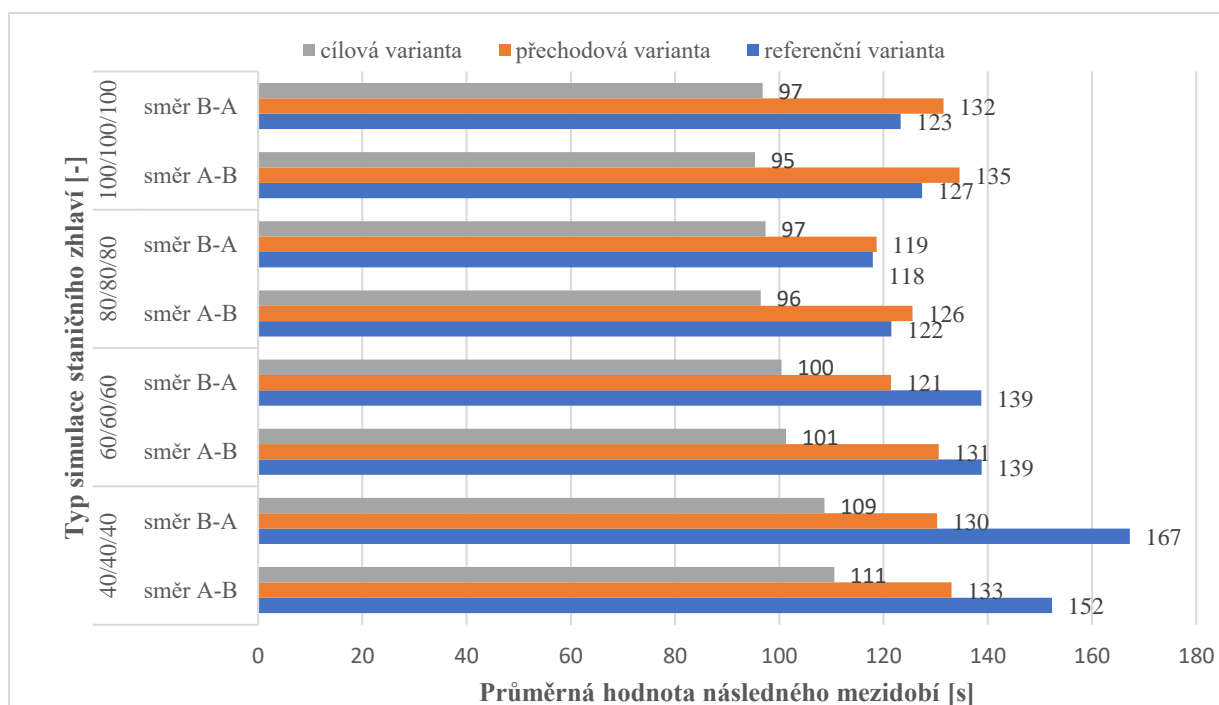
Z výsledků simulace a procentuálního porovnání je patrné, že největší přínos ve změně způsobu provozování a vybavení trati a vozidel je u simulační skupiny 3 (první vlak má vyšší rychlost než druhý vlak). U této skupiny dochází ke zkrácení následného mezidobí až o 38 %, ve srovnání s konvenčním způsobem zabezpečení trati. Podobných výsledků dosahují i simulační skupiny 1 (první a druhý vlak mají stejné parametry) a 4 (první a druhý vlak mají stejnou délku), které dosahují zkrácení následného mezidobí o 33 % u skupiny 1 a o 34 % u skupiny 2. Z dosažených výsledků lze dále odvodit, že u výše zmíněných skupin také platí, že vyrovnání průměrné hodnoty následného mezidobí dosažené u vybavení trati automatickým blokem lze při vybavení trati systémem ETCS L2 (přechodová varianta) dosáhnout při zkrácení délky prostorového oddílu na délku 0,5 km.

Nejméně příznivých výsledků naopak dosahuje simulační skupina 2 (první vlak má nižší skutečnou rychlost než druhý vlak), kdy při použití ETCS L2 dojde ke zvýšení hodnoty následného mezidobí o 3 % a to i v případě, že budou prostorové oddíly zkrácené na délku 0,1 km. Obdobně je to u skupiny 5 (první vlak má větší skutečnou délku než druhý vlak), kdy při použití ETCS L2 dojde k vyrovnání hodnoty následného pouze v případě, že budou prostorové oddíly zkráceny na délku 0,1 km. V obou případech platí, že vylepšení parametrů hodnoty následného mezidobí dojde až při použití systému ETCS L3, a to o 10 % u skupiny 2 a o 14 % u skupiny 5. V porovnání s ostatními simulačními skupinami jsou však tyto výsledky nejhorší. Specifickou skupinou je skupina 6 (první vlak má menší skutečnou délku než druhý vlak). Tato skupina má nejhorší vlastnosti z hlediska vybavení trati systémem ETCS L2, při instalaci ETCS L3 však dochází ke skokovému vylepšení parametrů hodnoty následného mezidobí na hodnotu až 23 %. **Pokud jde o porovnání celkových hodnot, dochází ke zlepšení hodnot následného mezidobí až o 9 %, v případě zkrácení délky pevných prostorových oddílů na 0,1 km a až o 18 % v případě nasazení ETCS L3.**

Důležitým výstupem první úrovně simulace je stanovení délky prostorového oddílu pro další úroveň simulačního modelu při vybavení trati systémem ETCS L2, tato hodnota byla stanovena 0,5 km. Dalším důležitým výstupem je, že k největšímu zlepšení hodnot následných mezidobí dochází u simulačních skupin, které pořadí vlaků přibližně odpovídají prioritám daným předpisem SŽ D1 ČÁST PRVNÍ a zásadám sestavy jízdního řádu (platí zejména pro skupinu 3). První úroveň tohoto simulačního modelu potvrzuje, že vybavení trati pokročilými systémem ATC může mít kladný vliv na kapacitu trati.

Vyhodnocení simulace staničních zhlaví – druhá úroveň (S)

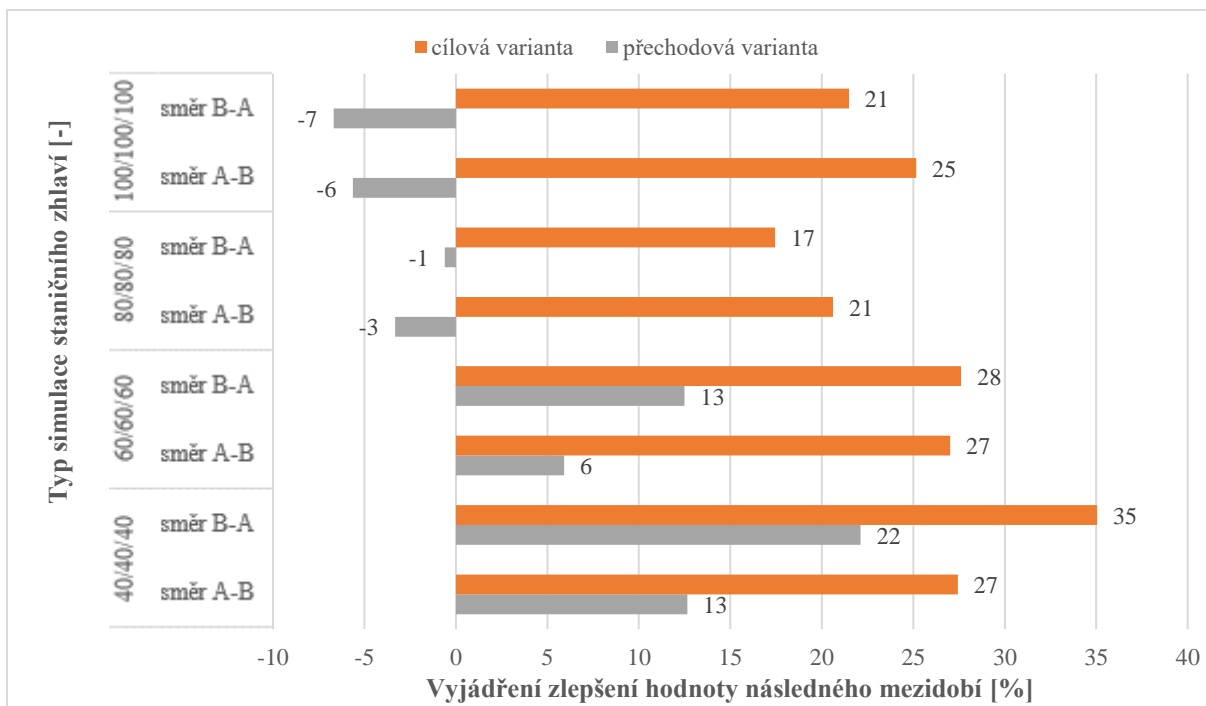
Výsledky pro vyhodnocení simulace druhé úrovně vycházejí z hodnot uvedených v tabulkách 18, 19 a 20. Cílem této varianty bylo posoudit chování simulačního modelu při simulaci různých typů staničních zhlaví a vybavení vozidel a infrastruktury systémem ETCS na úrovních L2 (při délce prostorového oddílu 0,5 km) a L3. Grafická podoba celkových výsledků s rozlišením je uvedena na obrázku 34. Graf s přehledem výsledků pro všechny skupiny je uveden v příloze G.



Obrázek 34 Graf celkových průměrných výsledků pro jednotlivé varianty zhlaví

Zdroj: autor

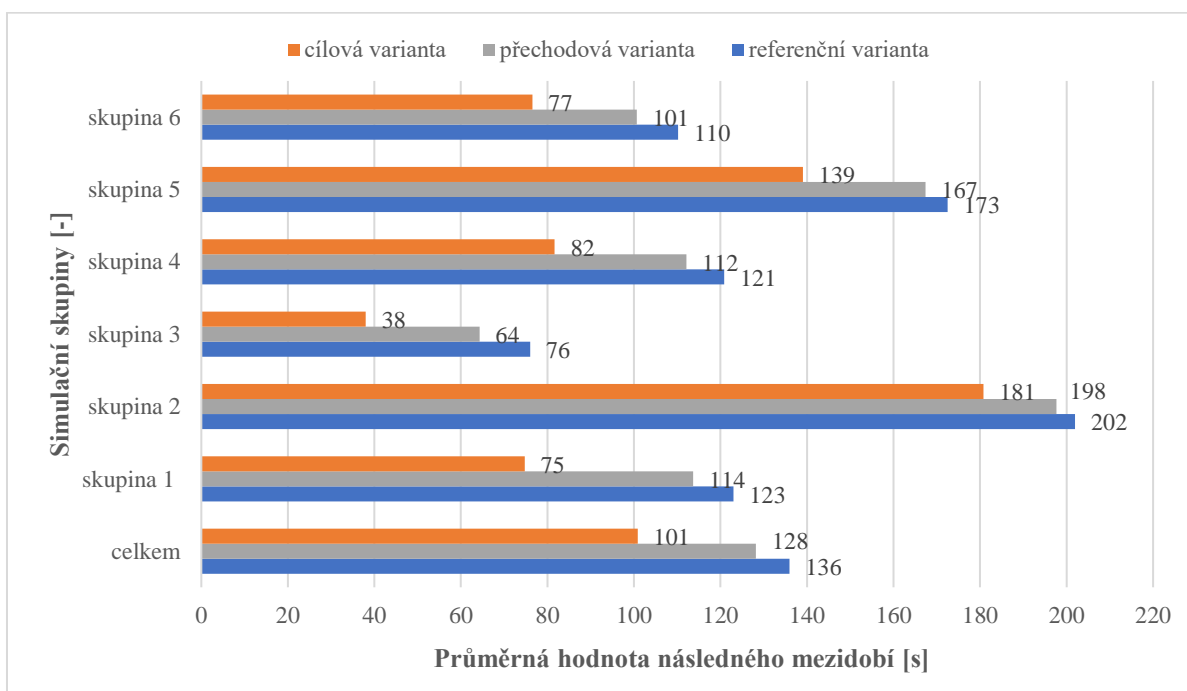
Z celkových průměrných výsledků je patrné, že největší přínos má nasazení systému ETCS L2 a ETCS L3 u staničních zhlaví, ve kterých se nacházejí výhybky s nižší rychlostí poježdění v odbočném směru, tedy varianty 40/40/40 a 60/60/60. Významným faktorem, který u těchto variant ovlivňuje rozhodné odjezdové mezidobí, je vzdálenost prvního oddílového návěstidla automatického bloku od odjezdových návěstidel. Ta je u obou variant stanovena 1540 m (ve směru A-B) a 1740 m (ve směru B-A). U variant 80/80/80 a 100/100/100 je první oddílové návěstidlo automatického bloku umístěno v úrovni vjezdového návěstidla pro opačný směr jízdy, a proto u těchto variant již nelze tento efekt pozorovat. U variant s vyšší rychlostí poježdění výhybek v odbočném směru se u ETCS L2 také zeslabuje efekt posunutí místa začátku omezení rychlosti před rozhodnou výhybkou. Pro lepší možnost porovnání dosažených výsledků je na obrázku 35 prezentováno procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí u jednotlivých způsobů zabezpečení.



Obrázek 35 Graf procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí

Zdroj: autor

Z grafu na obrázku 35 lze vysledovat, že v případech variant zhlaví a záhlaví 80/80/80 a 100/100/100 je u přechodové varianty (ETCS L2) dosaženo mírné zhoršení hodnot následných mezidobí oproti referenční variantě (automatický blok), zhoršení hodnot se pohybuje mezi -1 % až -7 %. Výsledky vyjádřené grafy na obrázcích 34 a 35 vyjadřují celkové hodnoty, bez ohledu na simulační skupiny.

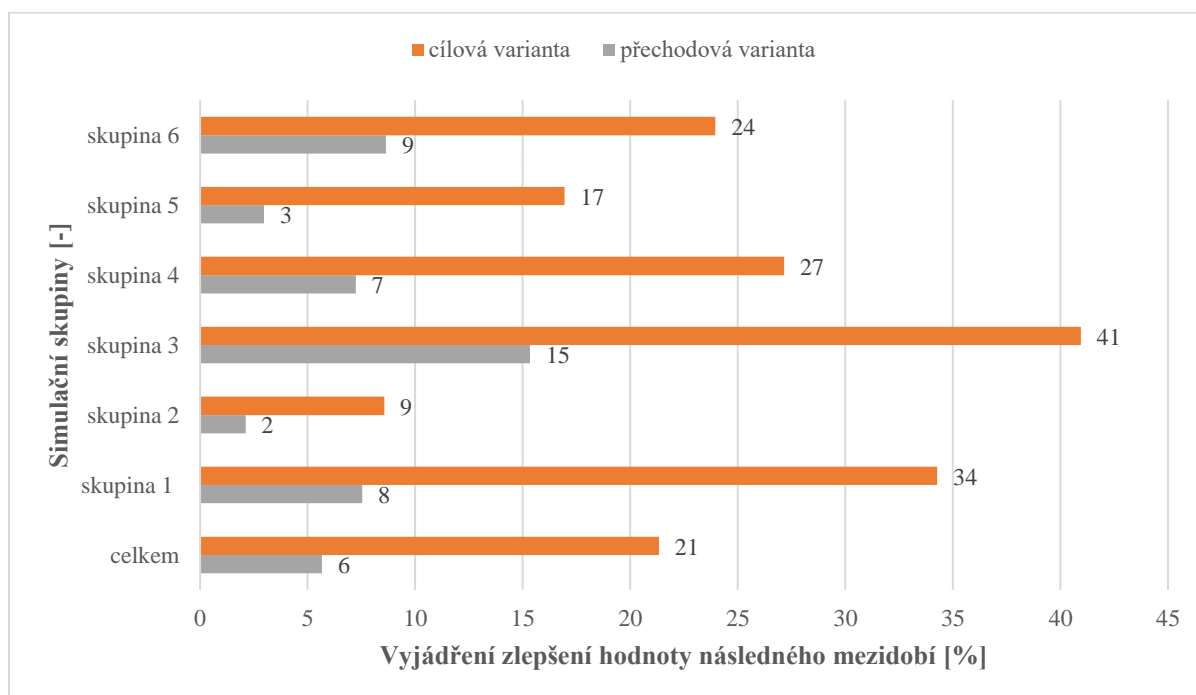


Obrázek 36 Graf celkových průměrných výsledků pro jednotlivé skupiny

Zdroj: autor

Pro komplexnější posouzení byly dosažené výsledky ještě dále vyhodnoceny podle jednotlivých simulačních skupin, ale bez ohledu na směr a rychlost poježdění výhybek v celkovém grafu s průměrnými hodnotami. Tento graf je uveden na obrázku 36.

Z grafu na obrázku 36 je patrný přínos používání ETCS L2 s benefity a přínos nasazení ETCS L3 při provozu v pohyblivých prostorových oddílech. Z uvedených hodnot je patrné, že ke zlepšení hodnot dochází v tomto případě ve všech simulačních skupinách i v celkovém srovnání. Procentuální vyjádření těchto výsledků je uvedeno na grafu na obrázku 37.



Obrázek 37 Graf procentuální vyjádření zlepšení hodnoty následného mezidobí

Zdroj: autor

Z výsledků simulace druhé úrovně (S) je patrné, že výsledky jsou srovnatelné s první úrovní simulačního modelu (T). Největší přínos změny způsobu provozování trati je simulační skupiny 3 (první vlak má vyšší rychlost než druhý vlak), u této skupiny dochází ke zlepšení průměrných hodnot následného mezidobí o 15 % u přechodové varianty a o 41 % u cílové varianty. Vynikajících výsledků dosahují také simulační skupiny 1 (první a druhý vlak mají stejné parametry), 4 (první a druhý vlak mají stejnou délku) a 6 (první vlak má menší skutečnou délku než druhý vlak). Simulační skupina 1 dosahuje zlepšení průměrných hodnot následného mezidobí o 8 % v případě ETCS L2 a o 34 % při nasazení ETCS L3, simulační skupina 4 dosahuje zlepšení hodnot o 7 % v případě ETCS L2 a o 27 % při nasazení ETCS L3, u simulační skupiny 6 potom dosahuje zlepšení hodnot o 9 % v případě ETCS L2 a o 24 % při nasazení

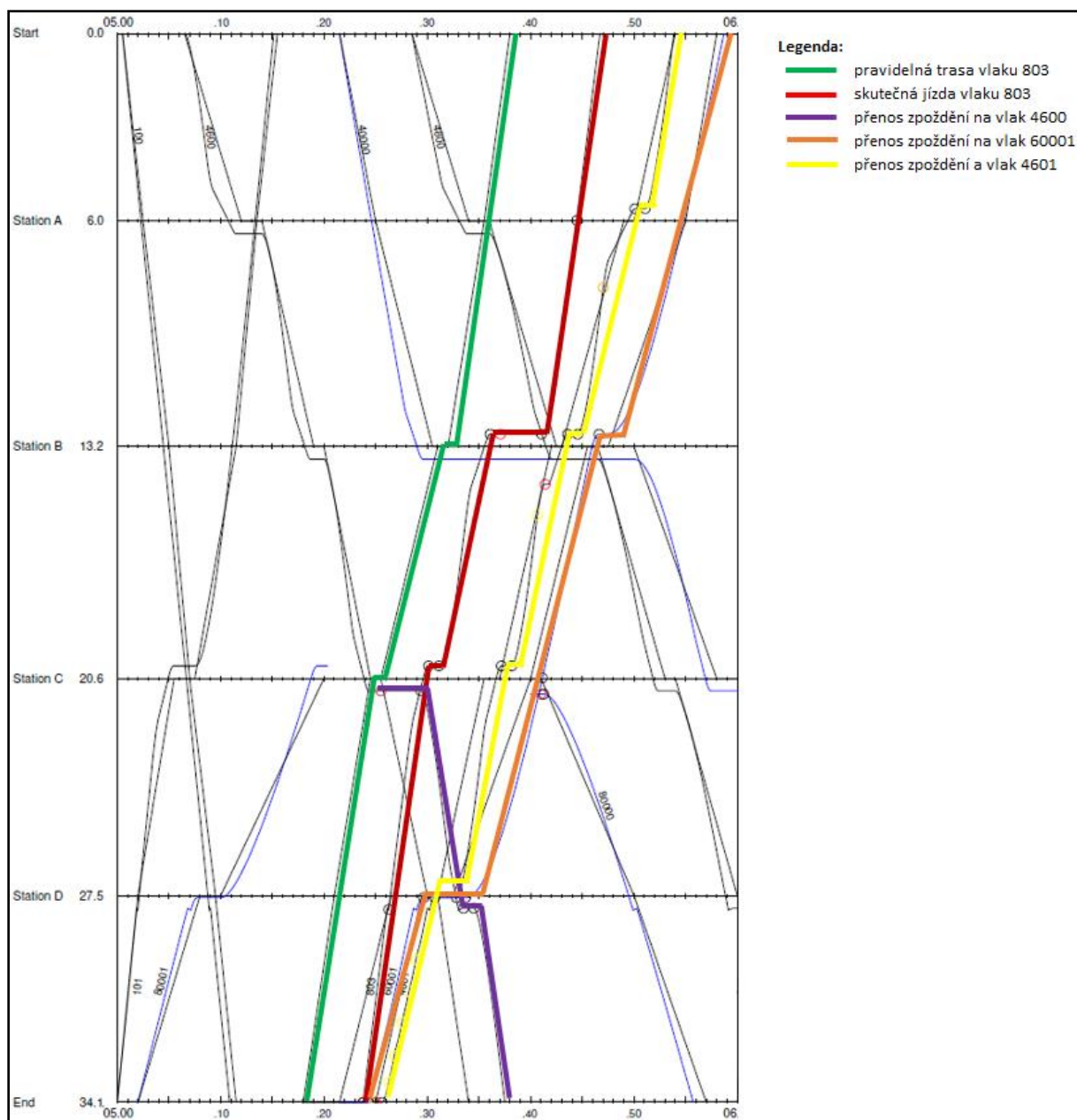
ETCS L3. Naopak nejméně příznivých výsledků dosahuje simulační skupina 2 (první vlak má nižší skutečnou rychlost než druhý vlak), kdy při použití ETCS L2 dojde ke zvýšení hodnoty následného mezidobí o 2 %, respektive o 9 % v případě použití ETCS L3.

Důležitým výstupem této úrovně simulace je zjištění, že z hlediska celkových naměřených hodnot dochází při nasazení ETCS L2 s benefity (při velikosti prostorových oddílů 0,5 km) u všech skupin ke zlepšení hodnot následného mezidobí. Celkově o 6 % u ETCS L2 a o 21 % u ETCS L3, při provozu v pohyblivých prostorových oddílech. Za významné lze rovněž považovat zjištění, že k největšímu zlepšení hodnot následného mezidobí při přechodu z konvenčního způsobu provozování dochází u staničních zhlaví, kde jsou výhybky pojížděny v odbočném směru nižší rychlostí (40 km·h⁻¹; 60 km·h⁻¹). Při vzrůstající rychlosti pojíždění výhybek v odbočném směru (80 km·h⁻¹; 100 km·h⁻¹) naopak může docházet k mírnému zhoršení těchto hodnot. Tento jev lze přisuzovat především oslabení efektu posunutí bodu začátku omezení rychlosti při jízdě na záhlaví a také prodloužením brzděné křivky k následujícímu hlavnímu návěstidlu s návěstí zakazující jízdu (EoA) vzhledem ke zvýšení rychlosti vlaku při jízdě na zhlaví.

Vyhodnocení simulace kombinované části – třetí úroveň (K)

V tabulkách 22, 23 a 24 jsou prezentovány výsledky s testovacími hodnotami a výsledky celkového výstupního zpoždění d_{OUT} pro jednotlivé varianty simulace. Třetí úroveň simulačního modelu je nejnáročnější jak z hlediska přípravy modelu a vlastní simulace, tak z hlediska vyhodnocení zpoždění. Jedním z důležitých výstupů modelu, který bylo nutné vytvořit už na začátku, je simulace referenčního jízdního řádu, splněný jízdní řád se znázorněním skutečné jízdy vlaku je uveden v příloze H. Součástí přílohy H jsou také splněné jízdní řády pro přechodovou a cílovou variantu. Sestavený jízdní řád vyhověl pro všechny varianty. Na základě vypočtených testovacích hodnot byly následně provedeny simulace jednotlivých simulačních scénářů, které již byly popsány v kapitole 6.6.

V případech, kdy došlo k zastavení simulace vlivem tzv. *Deadlocku*, bylo nutné aktivně zasáhnout do simulace a změnit nastavení použitých *Itineraries*, následně byla simulace se stejnou hodnotou vstupního zpoždění opakována. Vývoj simulace lze sledovat v dopravní síti a pomocí protokolu simulace, nebo přímo v grafice splněného jízdního řádu. Příklad zobrazení simulace zpoždění ve splněném jízdním řádu se zobrazením případných konfliktů je uveden na obrázku 38.



Obrázek 38 Příklad zobrazení simulace zpoždění ve splněném jízdním řádu

Zdroj: autor

Samotné vyhodnocení simulace zpoždění je rozděleno do dvou částí. V první části je uvedeno porovnání celkového přírůstku zpoždění pro jednotlivé varianty. Celkové hodnoty vstupního a výstupního zpoždění a celkový přírůstek zpoždění jsou zobrazeny v tabulce 25. **Z tabulky je patrné, že ve všech úrovních simulace je dosaženo celkových záporných hodnot přírůstku zpoždění, což dokazuje schopnost jízdního řádu vyrovnat se s vzniklými zpožděními. V referenční variantě je celkový přírůstek zpoždění -3081 s, přechodová varianta dosahuje mírně horších hodnot, kdy je celkový přírůstek zpoždění -2169 s. V cílové variantě je dosaženo nejlepších hodnot přírůstku zpoždění -3247 s.**

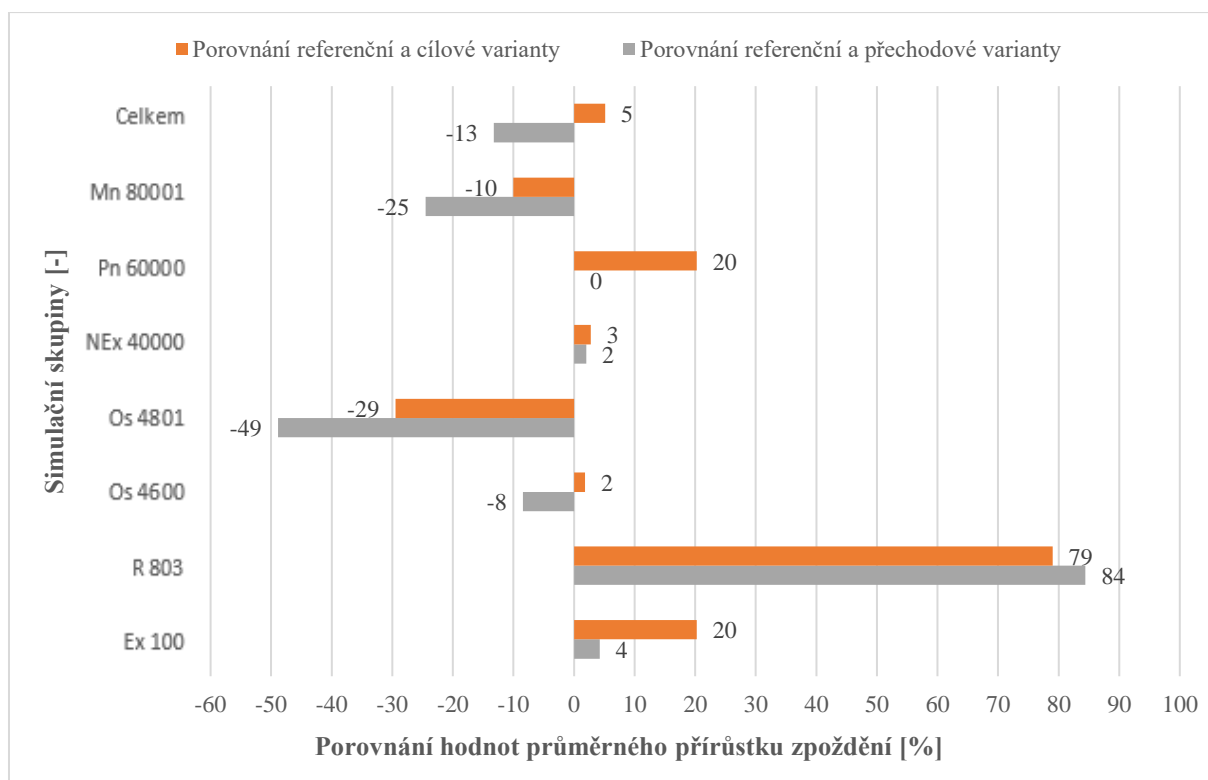
Tabulka 25 Celkové parametry pro vyhodnocení simulace zpoždění

	Vlak zpožděný na vstupu do simulace		Celkové parametry zpoždění [s]		
	Kategorie vlaku	Číslo vlaku	Celkové vstupní zpoždění	Celkové výstupní zpoždění	Přírůstek zpoždění
Referenční varianta	Ex	100	2326	3242	916
	R	803	1587	1579	-8
	Os	4600	997	249	-748
	MOs	4801	1242	577	-666
	Nex	40000	1342	216	-1126
	Pn	60000	1323	422	-901
	Mn	80001	1400	852	-548
	Celkové hodnoty:		10217	7136	-3081
Přechodová varianta	Ex	100	2326	3282	956
	R	803	1587	1537	-50
	Os	4600	997	307	-690
	MOs	4801	1242	795	-447
	Nex	40000	1342	193	-1149
	Pn	60000	1323	422	-901
	Mn	80001	1400	960	-440
	Celkové hodnoty:		10217	8048	-2721
Cílová varianta	Ex	100	2326	3474	1148
	R	803	1587	1254	-333
	Os	4600	997	235	-762
	MOs	4801	1242	728	-514
	Nex	40000	1342	184	-1158
	Pn	60000	1323	193	-1130
	Mn	80001	1400	902	-498
	Celkové hodnoty:		10217	6970	-3247

Zdroj: autor

Pro lepší přehlednost je na grafu na obrázku 39 ještě provedeno grafické srovnání průměrných přírůstků zpoždění pro jednotlivé simulační scénáře. Z grafu je patrné, že rozdíly hodnot průměrného přírůstku zpoždění jsou závislé na konkrétním simulačním scénáři. To je dáno především rozdílností nastavení při stavění vlakových cest. Vlivem rozdílných parametrů brzdných křivek a doby začátku stavění vlakové cesty dochází u jednotlivých variant i například ke změnám v křižování, prioritě výběru koleje a změně priority *Itineraries*. Tento jev by šlo upravit ručním nastavením simulace, ale došlo by tím ke ztrátě možností komplexního posouzení simulace ve třetí úrovni simulačního modelu. V celkovém porovnání potom vychází, že celkový přírůstek zpoždění v případě přechodové varianty vede k navýšení hodnoty průměrného přírůstku zpoždění o 13 %, v případě cílové varianty ke snížení hodnoty o 5 %. Pro správnou interpretaci výsledků je však nutné poznamenat, že se jedná o model

jízdního řádu jednokolejné trati, kde není možné tolik využít jízdu vlaků ve svazku. Z toho důvodu není možné naplno využít potenciálu systémů ETCS L2 a ETCS L3. V souladu se zjištěními provedenými v první a druhé úrovni simulačního modelu dochází u tohoto typu provozního konceptu k mírnému zhoršení kapacitních ukazatelů u zavedení systému ETCS L2 s benefity.



Obrázek 39 Graf srovnání průměrných přírůstků zpoždění

Zdroj: autor

Jelikož se v případě této úrovně modelu jedná o simulaci sestaveného jízdního řádu na konkrétní infrastrukturu, lze pro posouzení kapacity trati s výhodou využít i ukazatele stanovené směrnicí SŽDC SM 124 (75). V tomto případě se jedná o extenzivní simulaci, kdy je simulována komplexní část infrastruktury. Vybraným ukazatelem určeným k dalšímu srovnání je průměrný přírůstek zpoždění Δd . Z hlediska vyhodnocení je důležité model rozčlenit na dálkovou osobní, regionální osobní a nákladní dopravu. Do kategorie dálková osobní doprava byly zařazeny vlaky kategorie Ex a R, do kategorie regionální osobní doprava Os a MOs, a do kategorie nákladní doprava byly zařazeny vlaky kategorie NEx, Pn a Mn. Vypočítané hodnoty průměrných přírůstků zpoždění jsou uvedeny v tabulce 26.

Tabulka 26 Hodnoty průměrného přírůstku zpoždění podle kategorie

	Hodnota průměrného přírůstku zpoždění [min]			
	Dálková osobní doprava	Regionální osobní doprava	Nákladní doprava	Celkem
referenční varianta	0,027	-0,016	-0,139	-0,043
přechodová varianta	0,024	-0,015	-0,122	-0,038
cílová varianta	0,038	-0,033	-0,137	-0,044

Zdroj: autor

Tyto hodnoty jsou porovnávány s hodnotami pro odvození kvality provozu dle směrnice SŽDC SM124, článek 36 (75). V souladu s touto směrnicí jsou jednotlivé výsledky simulačních skupiny podbarveny **žlutě** v případě rizikové úrovně kvality provozu a **zeleně** v případě optimální kvality provozu. Vzhledem k tomu, že v případě dálkové osobní dopravy je kvalita provozu hodnocena jako riziková, je určena ještě hodnota rozpětí rizikového pásma r . Rozpětí rizikového pásma se určuje podle vzorce [13].

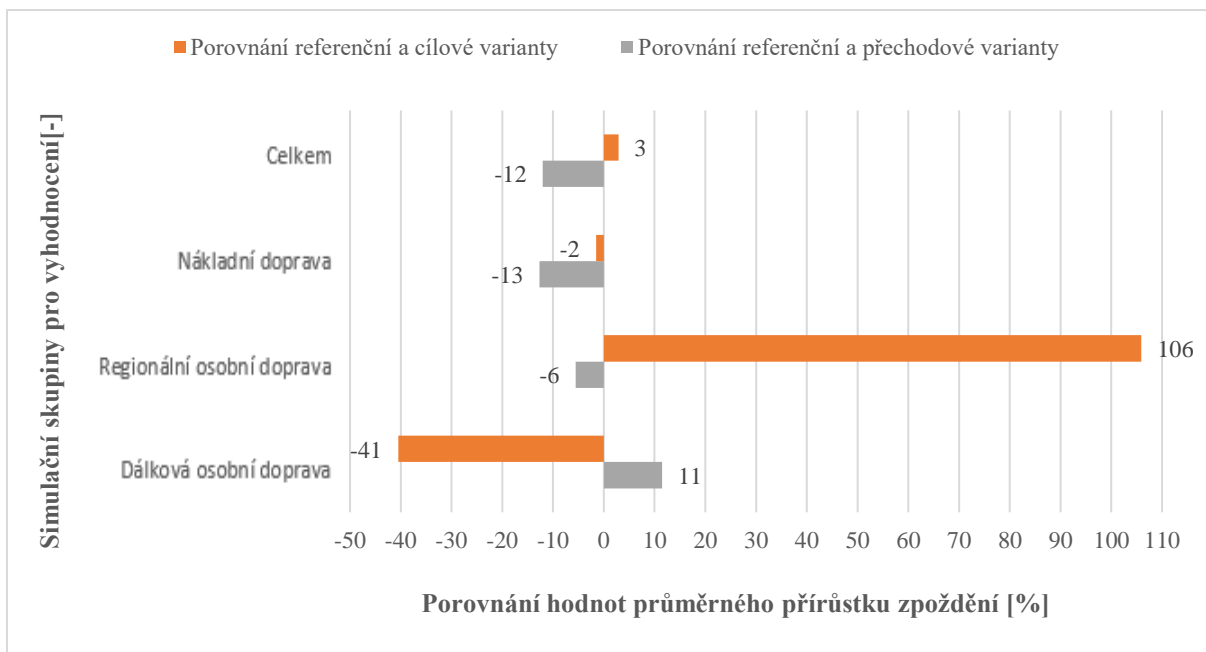
$$r = \frac{u - u_{OPT}}{u_{KRIT} - u_{OPT}} \quad [13]$$

kde:

 r ... rozpětí rizikového pásma [%] u ... zjištěná hodnota ukazatele kapacity [-] u_{OPT} ... optimální hodnota příslušného ukazatele kapacity [-] u_{KRIT} ... kritická hodnota příslušného ukazatele kapacity [-]**Zdroj:** (75)

Dosažením do vzorce dostaneme hodnotu rizikového pásma r , která je v tomto případě 2,7 % pro referenční variantu, 2,4 % pro přechodovou variantu 2,4 % a pro cílovou variantu 3,8 %. Z uvedených výsledků vyplývá, že hodnoty se hraničně blíží k hodnotám stanovených pro optimální pásmo hodnocení přírůstku zpoždění.

Na základě hodnot uvedených v tabulce 26 je ještě provedeno grafické procentuální srovnání referenční varianty s ostatními variantami. Graf je uveden na obrázku 40.



Obrázek 40 Graf srovnání přírůstků zpoždění dle SZDC SM 124

Zdroj: autor

Třetí úroveň simulačního modelu – kombinovaná varianta (K) hodnotí simulační model pomocí komplexního ukazatele, kterým je přírůstek zpoždění. Důležitým zjištěním je, že z hlediska celkové kvality jízdního řádu není bezpodmínečně nutné měnit způsob konstrukce jízdního řádu. **Při simulaci zpoždění nebyl prokázán významný negativní vliv změny vlakového zabezpečovače na přírůstek zpoždění, v případě přechodové varianty došlo ke zhoršení hodnoty o 12 %, v případě cílové varianty naopak ke zlepšení hodnoty o 3 %.** Je však nutné podotknout, že tyto hodnoty platí pro model jednokolejné trati. V případě simulace více kolejné trati, lze očekávat významný nárůst hodnoty koeficientu svazkovitosti vlakových tras, což bude mít kladný vliv na zlepšení hodnoty přírůstku zpoždění, protože v takovém případě bude lépe zhodnocen přínos zkrácení pevných prostorových oddílů (u ETCS L2 s benefity), případně přechod na provoz v pohyblivých prostorových oddílech (u ETCS L3).

Vyhodnocení tříúrovňového simulačního modelu

Tříúrovňový simulační model vzniknul jako výsledek autorova předchozího výzkumu, kde byly postupně hledány vhodné metody pro komplexnější popis vlivu systémů automatického provozu vlaků na kapacitu tratí. Výsledky simulací provedených podle postupů stanovených pro tento model naplňují definovaný cíl této disertační práce. **Pomocí tříúrovňového simulačního modelu byl zjištěn vliv systémů ETCS na úrovních L2 a L3 na kapacitu tratí.** Výsledky simulace ETCS L3 lze v principu platit i pro trať vybavenou systémem CBTC s pohyblivými prostorovými oddíly.

Z hlediska simulace provozu na širé trati bylo prokázáno, že při zavádění systému ETCS L2 s benefity (přechodová varianta) dochází k vyrovnání naměřených hodnot následných mezidobí, v porovnání s konvenčním zabezpečením trati pomocí automatického bloku a liniového vlakového zabezpečovače, až při zkrácení pevných prostorových oddílů na délku 0,5 km. Zároveň bylo prokázáno, že mezi velikostí následného mezidobí a délkou zkráceného prostorového oddílu existuje lineární závislost. V celkovém srovnání potom, při simulaci provozu na širé trati vychází, že při nasazení ETCS L2 s benefity (při zkrácení délky prostorových oddílů na 0,1 km) ke zmenšení hodnoty následného mezidobí až o 9 % ve srovnání s konvenčním způsobem zabezpečení trati. V případě nasazení ETCS L3, případně systému CBTC, je dosaženo zmenšení hodnoty následného mezidobí až o 18 %.

V další úrovni byla provedena simulace staničních zhlaví. V této úrovni simulace byly potvrzeny výsledky získané v první simulační úrovni a bylo prokázáno, že v případě simulace ETCS L2 s benefity je správným řešením zkrácení pevných prostorových oddílů na 0,5 km. **V celkovém srovnání vychází, že dojde ke zlepšení hodnot následného mezidobí o 6 % (při simulaci ETCS L2 s benefity) a až o 21 % (při simulaci ETCS L3).**

V třetí simulační úrovni byl jako hodnotící ukazatel stanoven přírůstek zpoždění. **Při provozu na jednokolejně železniční trati bylo prokázáno, že nasazení systému ETCS L2 a L3 nemá významný vliv na hodnotu stanoveného ukazatele.** V celkovém srovnání vychází, že celkový i průměrný přírůstek zpoždění je záporný, což dokazuje optimální kvalitu jízdního řádu. Zároveň bylo prokázáno, že při sestavě jízdního řádu na jednokolejně trati není zapotřebí upravovat platnou metodiku pro sestavování jízdního řádu. **Simulací bylo zjištěno, že v případě nasazení ETCS L2 s benefity dojde k mírnému zhoršení ukazatele přírůstku zpoždění o 12 %. V případě systému ETCS L3 naopak dojde k jeho zlepšení o 3 %.**

7 SIMULAČNÍ MODEL PROVOZU ETCS L2 NA REÁLNÉ INFRASTRUKTUŘE

V kapitole 6 došel autor k celé řadě teoretických závěrů. Důležitou podmínkou pro ověření validity (správnosti) navrženého postupu je otestování simulačního modelu na reálné infrastruktuře, to je také smyslem a cílem této kapitoly. Vzhledem k pokročilé fázi přípravy výhradního provozu ETCS na síti Správy železnic, s. o. byla jako vhodná možnost vybrána trať č. 326A, dle tabulek traťových poměrů (TTP), v úseku Brno-Maloměřice (mimo) – Rájec-Jestřebí (včetně). Tato trať byla zvolena mimo jiné proto, že jsou na ní kombinovány prvky infrastruktury, které již byly projektovány s ohledem na implementaci ETCS, ale také prvky infrastruktury, které byly dokončeny už v 90. letech 20. století, které ještě s implementací ETCS nepočítaly.

Trať č. 326A (dle TTP) je dráhou celostátní a je v celé délce dvoukolejná, elektrifikovaná střídavou trakční napájecí soustavou 25 kV/50 Hz. Trať je vybavena traťovým zabezpečovacím 3. kategorie – automatický blok tříznakový obousměrný. V celé trati je v činnosti traťová část národního zabezpečovače s přenosem kódu na hnací vozidlo. Trať je také vybavena traťovou částí zabezpečovače ETCS L2. V řešeném úseku se nachází celkem 4 dopravní s kolejovým rozvětvením: Odb. Svitava, ŽST Adamov, ŽST Blansko a ŽST Rájec-Jestřebí. Ve stanicích a mezistaničních úsecích je zřízeno ETCS úrovně L2. Z hlediska RBC je celá řešená oblast označena jako Opatov – Adamov, RBC 14. Obslužné pracoviště RBC je umístěno na CDP Přerov a obsluhuje ho dispečer ETCS. Ve všech stanicích je na JOP zřízen povel STOP, který je možné aktivovat prostřednictvím symbolu stanoviště RBC.

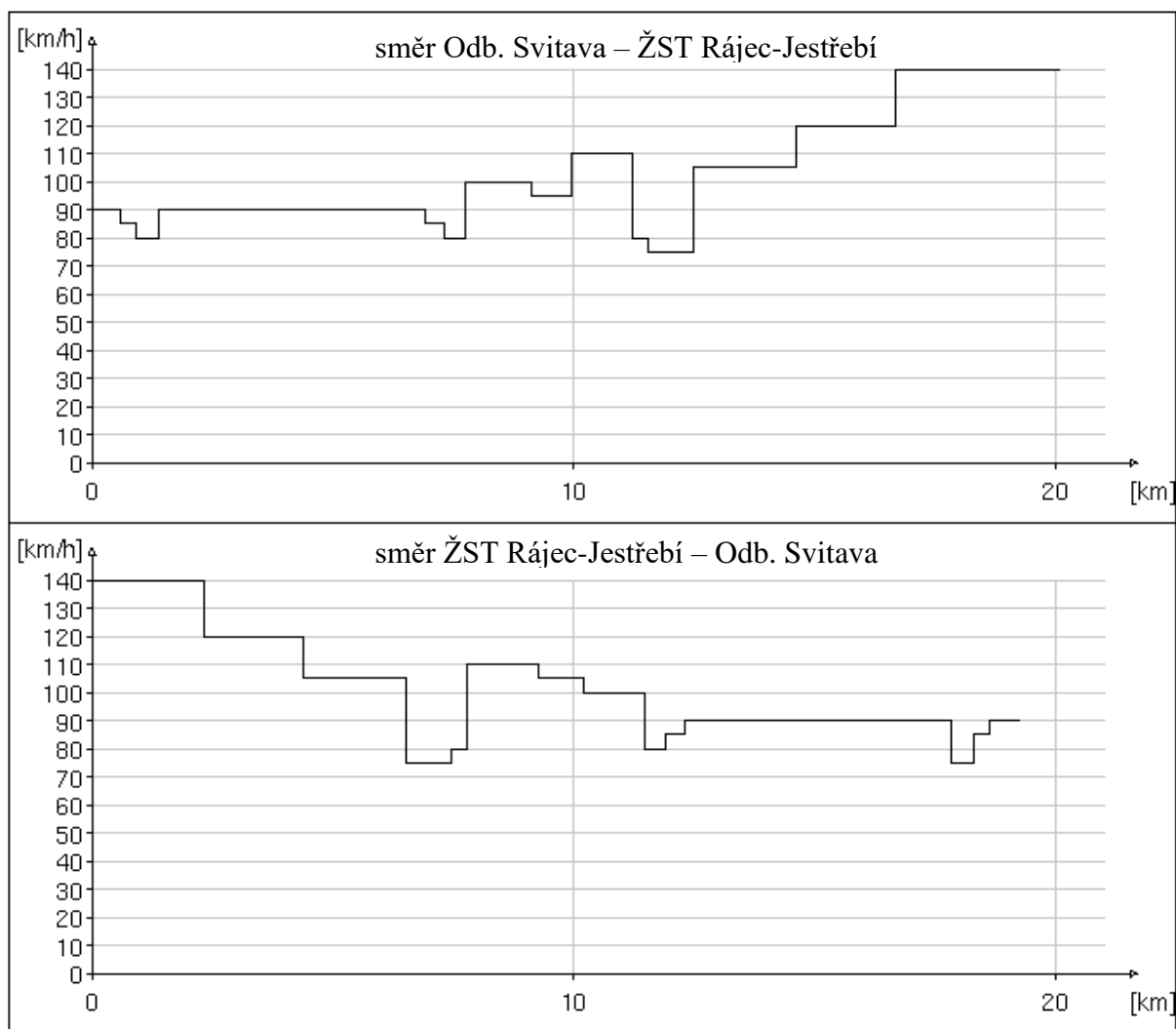
Z hlediska způsobu provozování se prozatím nejedná o trať s výhradním provozem ETCS. V rámci ověřovacího provozu jsou nasazovány soupravy vlaků, které jsou vedeny v režimu ETCS L2. Trať je do 1. 1. 2025 provozována v režimu s dodatečnými provozními opatřeními. To znamená, že vlak jedoucí po této trati musí být vybaven národním vlakovým zabezpečovačem, případně dodržet podmínky pro jízdu bez vlakového zabezpečovače. Provoz je řízen světelnou návěstní signalizací, která je nadřazena informacím zobrazeným na DMI. V tomto případě se nedá využít benefitů ETCS v oblasti zlepšení provozních parametrů propustnosti zhlaví, protože se strojvedoucí musí řídit rychlostí danou rychlostní návěstní soustavou. Pokyny a základní pravidla pro provoz ETCS jsou uvedeny v příloze č. 10 SŘ a v Prováděcím nařízení k předpisu SŽDC D7, část A, CDP Přerov, příloha H. Provoz se dále řídí předpisem SŽ Z8 díl IV (prozatímní) Evropský vlakový zabezpečovač ETCS, pokynem SŽ

PPD-1/2022 Pokyn provozovatele dráhy k zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy pro ověřovací provoz systému ETCS ve znění změny č. 1 až 11 a pokynem SŽ PPD-6/2022 Pokyn provozovatele dráhy k zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy Doplnující ustanovení k předpisu SŽ D1 ČÁST PRVNÍ a předpisu SŽ Z8 díl IV (prozatímní) pro tratě vybavené evropským vlakovým zabezpečovačem. Simulační model byl sestaven s respektováním výše uvedených zásad a předpisových ustanovení.

Z hlediska použitých souprav se autor rozhodl využít praktické poznatky ze zkušebního provozu nových jednotek Jihomoravského kraje ř. 530 a ř. 550 s označením MORAVIA (v roce 2024 jsou jejich provozovatelem České dráhy, a. s.). Na jednotce ř. 530 byla také provedena simulace a praktické měření v terénu.

7.1 Popis vybrané části tratě

Při tvorbě modelu autor vycházel z aktuálních podkladů dostupných interně v rámci SŽ.



Obrázek 41 Statický rychlostní profil – trať 326

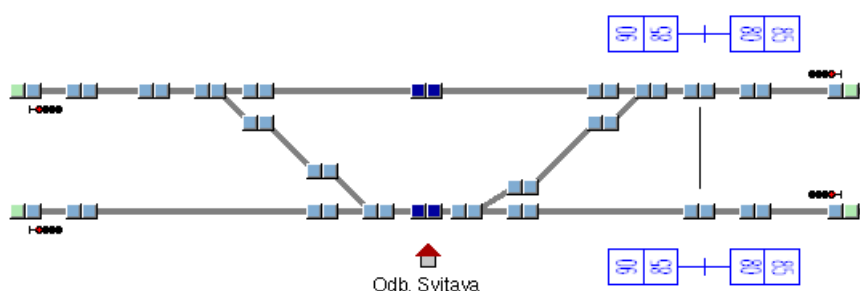
Zdroj: autor v SW OpenTrack

V daném úseku Brno-Maloměřice (mimo) – Rájec-Jestřebí (včetně) se maximální možná rychlost vlaku pohybuje mezi 75 a 140 km·h⁻¹ (statický rychlostní profil je zobrazen na obrázku 41). S ohledem na vybraný typ jednotek, které jsou schopné průjezdu obloukem při působícím nedostatku převýšení 150 mm, respektuje statický rychlostní profil rychlostní údaje dané horními rychlostníky N.

Odb. Svitava

Odbočka Svitava byla aktivována v roce 2022 a rozděluje mezistaniční úsek Brno-Maloměřice – Adamov na dvě části. Zřízení odbočky přispívá ke zvýšení efektivity řízení provozu, především ve výlukových stavech, a také nahrazuje chybějící výhybkové spojky na adamovském zhlaví ŽST Brno-Maloměřice (dopravní bod Brno-Maloměřice St.6). Odbočka je vybavena staničním zabezpečovacím zařízením (SZZ) 3. kategorie typu elektronické stavědlo ESA 44 s graficko-technologickou nástavbou ZZ (GTN) s rychlostní návěstní soustavou. SZZ je ovládáno dálkově z DK ŽST Adamov. V mezistaničním úseku Brno-Maloměřice – Odb. Svitava a Odb. Svitava – Adamov je zabezpečovací zařízení 3. kategorie obousměrný tříznakový automatický blok s traťovými souhlasy. V traťovém úseku Brno-Maloměřice St.6 – Odb. Svitava jsou 4 traťové oddíly, v traťovém úseku Odb. Svitava – Adamov je pět traťových oddílů. Ke zjišťování volnosti úseku koleje slouží kolejové obvody.

Odbočka Svitava je vybavena čtyřmi výhybkami, které jsou uspořádány do dvou logických spojek. V přímém směru je umožněna jízda traťovou rychlostí v odbočném směru 80 km·h⁻¹. Odbočka má čtyři vjezdová návěstidla s označením 1L, 2L, 1S a 2S. Zobrazení modelu odbočky vytvořeném v SW OpenTrack je uvedeno na obrázku 42.



Obrázek 42 Model odbočky Svitava

Zdroj: autor v SW OpenTrack

ŽST Adamov

Stanice Adamov byla v roce 2022 kompletně zrekonstruována v rámci stavby Brno-Maloměřice (mimo) – Blansko (mimo). Souběžně se zrekonstruovanou stanicí Adamov, byla aktivována odbočka Svitava. Významnou změnu přineslo vybavení stanice mimoúrovňovými přístupy na nástupiště a dvěma ostrovními nástupišti. Vzhledem

k prostorové náročnosti této změny muselo být přistoupeno ke zrušení některých manipulačních kolejí, počet průběžných dopravních kolejí však zůstal stejný. Přehled kolejí ve stanici je uveden v tabulce 27.

Stanice Adamov je vybavena SZZ 3. kategorie typu ESA 44 s GTN s rychlostní návěstní soustavou. SZZ je ovládáno místně z dopravní kanceláře ŽST Adamov. Stanice je obsazena výpravčím. V mezistaničním úseku Adamov – Blansko je zabezpečovací zařízení 3. kategorie obousměrný tříznakový automatický blok s traťovými souhlasy. V traťovém úseku Adamov – Blansko je 6 traťových oddílů. Ke zjišťování volnosti úseku koleje slouží kolejové obvody.

Obvod stanice je vymezení vjezdovými návěstidly 1L, 2L, 1S a 2S. Pro jízdu přímým směrem je umožněna jízda traťovou rychlostí. Pro jízdu odbočkou je rychlost omezena na rychlost 50/60 km·h⁻¹. Rychlost 50 km·h⁻¹ při jízdě mezi lichou a sudou skupinou je dána prostorovým uspořádáním zhlaví a použitím dvojitých kolejových spojek (DKS). Zobrazení modelu stanice Adamov vytvořeném v SW OpenTrack je uvedeno v příloze I.

Tabulka 27 Přehled parametrů kolejí stanice Adamov

Číslo kolejje	Užitečná délka kolejje [m]	Využitelná délka kolejje bez ETCS [m]	Vymezení směru k hlavnímu návěstidlu		Využitelná délka kolejje bez ETCS [m]		Uvolňovací rychlost [km·h ⁻¹]	
			S	L	S	L	S	L
1	664	647	S1	L1	647	647	20	20
2	662	645	S2	L2	645	645	20	20
3	585	569	S3	L3	569	569	20	20
3b	63	52	S	L3b	S	52	S	0
3+3b	769	751	S3	L3b	769	769	0	20
4	331	317	S4	Lc4	317	317	15	20
4b	183	171	Sc4b	L4b	171	171	20	20
4+4b	595	579	S4	L4b	595	595	10	0

Zdroj: (108)

ŽST Blansko

Stanice Blansko byla naposledy významně stavebně upravována v letech 1996–1998. V roce 2022 byl fyzicky zrušen přejezd na rájeckém zhlaví a nahrazen silničním nadjezdem. Stanice má čtyři průběžné dopravní koleje s nástupišti. Nástupiště u kolejí 2 a 4 jsou úroňová, nástupiště mezi kolejemi 1 a 5 je ostrovní, přístupné podchodem. V obvodu stanice, u kolejí 1a a 2a, je umístěna zastávka Blansko město, která byla modernizována v průběhu roku 2022. Přehled kolejí ve stanici je uveden v tabulce 28.

Tabulka 28 Přehled parametrů kolejí stanice Blansko

Číslo koleje	Užitečná délka koleje [m]	Využitelná délka koleje bez ETCS [m]	Vymezení směru k hlavnímu návěstidlu		Využitelná délka koleje bez ETCS [m]		Uvolňovací rychlost [km·h ⁻¹]	
			S	L	S	L	S	L
1	772	754	S1	L1	754	754	20	10
2	682	665	S2	L2	665	665	20	20
1a	1045	1024	Sc1a		915		0	
2a	1045	1024	Sc2a		1024		20	
3	292	279	Sc3	L3	170	170	0	0
4	671	654	S4	L4	654	545	20	0
5	324	310		L5		310		20
5a	229	216	S5a		216		20	
5+5a	654	637	S5a	L5a	637	637	20	20

Zdroj: (109)

Stanice Blansko je vybavena SZZ 3. kategorie s hybridním stavědlem typu ETB s rychlostní návěstní soustavou. SZZ je ovládáno z dopravní kanceláře ŽST Blansko. Stanice není vybavena GTN ani jiným systémem s přenosem čísla vlaků. Dopravní dokumentace je vedena prostřednictvím elektronické dopravního deníku (EDD) a nemá přímou vazbu na skutečnou činnost SZZ. Stanice je obsazena výpravčím. V mezistaničním úseku Blansko – Rájec-Jestřebí je zabezpečovací zařízení 3. kategorie obousměrný tříznakový automatický blok s traťovými souhlasy. V traťovém úseku Blansko – Rájec-Jestřebí jsou 3 traťové oddíly. Ke zjišťování volnosti úseku koleje slouží kolejové obvody.

Obvod stanice je vymezen vjezdovými návěstidly 1L, 2L, 1S a 2S. Pro jízdu přímým směrem je umožněna jízda traťovou rychlostí. Pro jízdu odbočkou je rychlost omezena na rychlost 60 km·h⁻¹. Na adamovském zhlaví je rychlost omezena na 40 km·h⁻¹ při jízdě odbočkou přes DKS, je to způsobeno prostorovým uspořádáním zhlaví, kde jsou použity výhybky malých poloměrů a DKS. Na rájeckém zhlaví je rychlost jízdy odbočkou omezena na 60/80 km·h⁻¹. Zobrazení modelu stanice Blansko vytvořeném v SW OpenTrack je uvedeno v příloze I.

ŽST Rájec-Jestřebí

Stanice Rájec-Jestřebí byla v letech 1996–1998, od té doby je provozována v prakticky nezměněné podobě. Stanice má čtyři průběžné dopravní koleje. U kolejí č. 3, 1, 2 jsou zřízena úroňová nástupiště. Z hlediska sestavy a dodržení technologie se jedná o problematický stav.

V obvodu stanice jsou zároveň zřízeny dva přejezdy. Přehled kolejí ve stanici je uveden v tabulce 29.

Tabulka 29 Přehled parametrů kolejí stanice Rájec-Jestřebí

Číslo koleje	Užitečná délka koleje [m]	Využitelná délka koleje bez ETCS [m]	Vymezení směru k hlavnímu návěstidlu		Využitelná délka koleje bez ETCS [m]		Uvolňovací rychlost [km·h ⁻¹]	
			S	L	S	L	S	L
1	661	644	S1	L1	644	644	20	20
2	770	752	S2	L2	752	752	20	10
3	671	654	S3	L3	545	545	0	0
4	414	400		L4		400		400
4a	289	276	S4a		276		20	
4+4a	762	744	S4a	L4a	744	744	20	10

Zdroj: (110)

Stanice Rájec-Jestřebí je vybavena SZZ 3. kategorie s hybridním stavědlem typu ETB s rychlostní návěstní soustavou. SZZ je ovládáno z dopravní kanceláře ŽST Rájec-Jestřebí. Stanice není vybavena GTN ani jiným systémem s přenosem čísla vlaků. Dopravní dokumentace je vedena prostřednictvím EDD a nemá přímou vazbu na skutečnou činnost SZZ. Stanice je obsazena výpravčím. V mezistaničním úseku Rájec-Jestřebí – Skalice nad Svitavou je zabezpečovací zařízení 3. kategorie obousměrný tříznakový automatický blok s traťovými souhlasy. V traťovém úseku Rájec-Jestřebí – Skalice nad Svitavou je 5 traťových oddílů. Ke zjišťování volnosti úseku koleje slouží kolejové obvody.

Obvod stanice je vymezen vjezdovými návěstidly 1L, 2L, 1S a 2S. Pro jízdu přímým směrem je umožněna jízda traťovou rychlostí. Pro jízdu odbočkou je rychlost omezena na 60 km·h⁻¹. Při jízdě přes výhybkové spojky 3/4 a 16/18 je možná rychlost jízdy odbočkou 80 km·h⁻¹. Zobrazení modelu stanice Rájec-Jestřebí vytvořeném v SW OpenTrack je uvedeno v příloze I.

7.2 Sestava simulačního modelu reálné trati

Sestava simulačního modelu byla provedena podle zásad stanovených v kapitole 6.3 a 6.5. Jelikož už byla problematika tvorby simulačního modelu detailně popsána v těchto kapitolách, budou zde popsány pouze rozhodné skutečnosti a specifika tvorby modelu reálné infrastruktury.

Zadávání infrastruktury

Základem tvorby simulačního modelu je zadání vstupních parametrů traťové části do síťového grafu. Jako podklad pro infrastrukturní parametry slouží především tyto dokumenty: traťové plány, situační schémata, tabulky traťových poměrů a závěrové tabulky. Každý vrchol síťového grafu reprezentuje kilometrickou polohu místa, kde dochází ke změně rozhodných parametrů. Pro správnou funkci simulačního modelu bylo zapotřebí upravit některé kilometrické polohy stanic. Dle zvyklostí na síti Správy železnic je kilometrická poloha stanice určena polohou dopravní kanceláře (výpravní budovy), pro správné fungování SW OpenTrack je nutné přesunout *Station Vertex* do všech dopravních kolejích. Kilometrická poloha je potom reprezentována středem dopravní koleje, případně středem nástupiště (podle typu simulace). V tomto modelu byla upravena kilometrické poloha stanice Blansko z km 178,740 do km 178,921 a kilometrické poloha stanice Rájec-Jestřebí z km 185,317 do km 185,133.

Z hlediska prvků zabezpečovacího zařízení byla do modelu umístěna všechna návěstidla platná pro jízdu vlaku a všechny v současné době fungující balízy systému ETCS. Dále byla do modelu vložena všechna přejezdová zabezpečovací zařízení, protože i ta mají vliv na provoz ETCS. Výhybky byly v modelu vytvořeny se základní polohou dle závěrové tabulky, přičemž se v případě potřeby předpokládá pro každou výhybku ve vlakové cestě doba přestavování 0,1 minuty (dle směrnice SŽDC č. 104).

Z hlediska tvorby jízdních cest *Routes a Paths* bylo pro tvorbu tohoto modelu uvažováno již s výhradním provozem ETCS. V současné době, kdy je trať provozována v režimu s dodatečnými provozními opatřeními, jsou stále určující rychlosti dané návěstidly, nicméně brzdné křivky jsou generovány stejně jako při výhradním provozu ETCS. V testovaných vlakových trasách je však četnost tohoto jevu minimální.

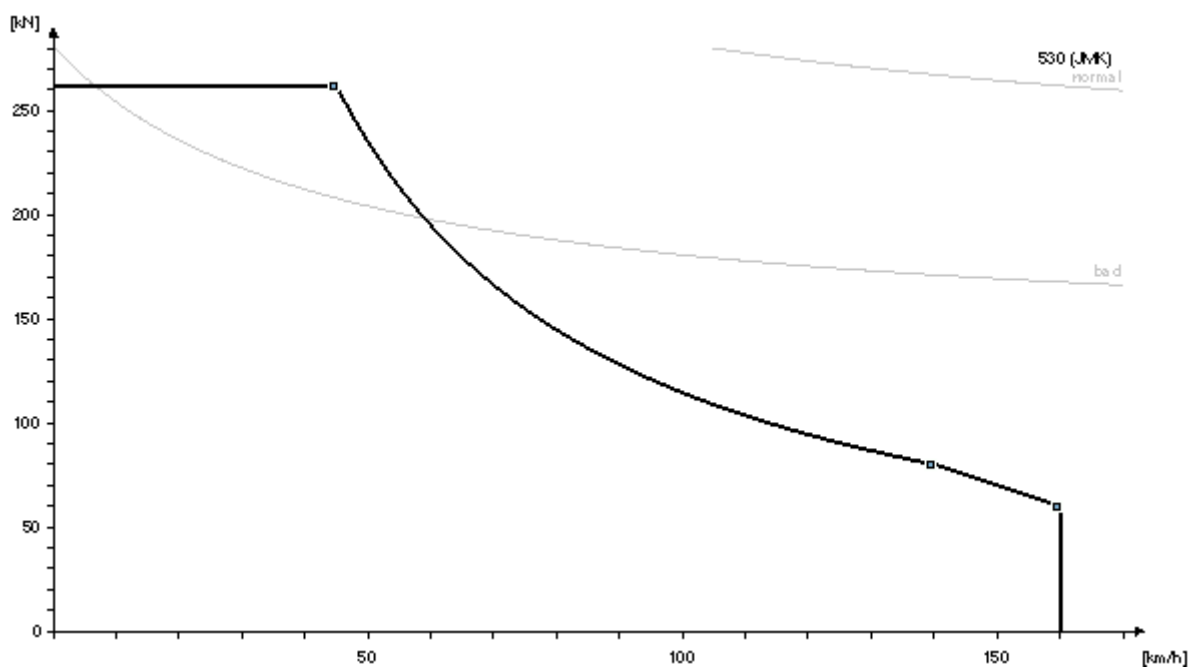
Pro budoucí využití tohoto simulačního modelu k testování provozu na této trati, případně k dalšímu rozšíření modelu v rámci navazující vědecké činnosti se autor rozhodl vytvořit přesný model i u těch infrastrukturních prvků, které nejsou v rámci testování dle této kapitoly využívány. V rámci testování dle této kapitoly jsou využívány pouze 3 varianty průjezdu řešenou oblastí (*Itineraries*). Varianty vychází z uskutečněných testovacích jízd a liší se staničními i traťovými kolejemi, po kterých vlak skutečně jel.

Použitá vozidla

Z hlediska volby vozidla vhodného pro testování, bylo rozhodující najít typickou soupravu pro osobní vlaky, která je vybavena vlakovou částí systému ETCS L2 a zároveň je již provozována pod dohledem ETCS. V Jihomoravském kraji jsou na páteřních linkách S2 a S3

nasazovány jednotky Škoda 18Ev, které jsou označovány jako jednotky ř. 530 MORAVIA. Jednotky jsou čtyřvozové a byly dodány v jednosystémovém provedení pro provoz ve střídavé trakční napájecí soustavě 25 kV 50 Hz. Kromě čtyřvozových jednotek jsou na výše zmíněných linkách v provozu také dvouvozové jednotky Škoda 19Ev, které jsou označovány jako ř. 550, simulace jízdy těchto jednotek zde však není dále řešena. Nasazení jednotek do provozu s cestujícími proběhlo v roce 2023. V roce 2023 zároveň probíhalo testování a postupné uvádění jednotek do provozu pod dohledem ETCS. Postupně také dochází k zacvičování strojvedoucích pro jízdu pod dohledem ETCS. Autor se rozhodl využít tohoto procesu k vlastnímu testování pro účely této práce.

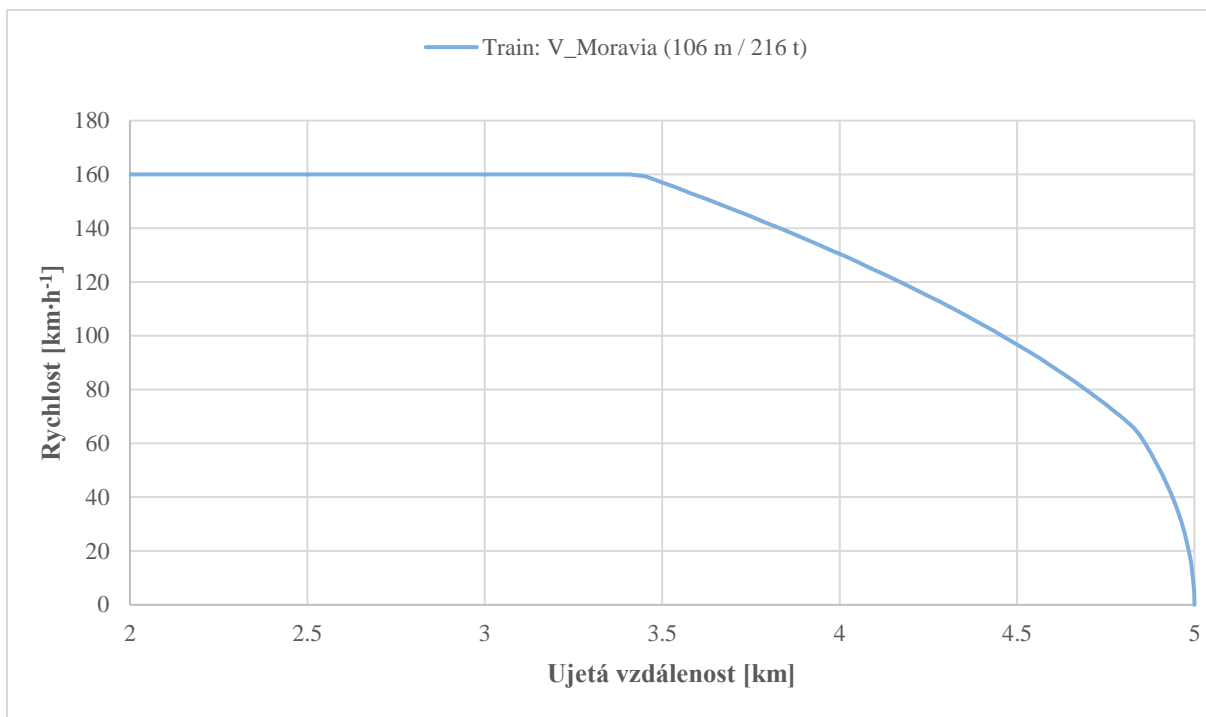
Celková hmotnost jednotky s cestujícími je 216 t, délka je 106 m. Maximální rychlost jednotky je $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Stanovené brzdicí procento BWP je 144 %. Jednotka je vybavena osmi trakčními motory o výkonu 420 kW. Maximální tažná síla při rozjezdu jednotky je 262 kN při rychlosti do $45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Trakční charakteristika jednotky převedená do modelu v SW OpenTrack je uvedena na obrázku 43.



Obrázek 43 Trakční charakteristika jednotky ř. 530

Zdroj: autor v SW OpenTrack

Pro soupravu ř. 530 byly v souladu s postupem popsáním v kapitole 6.4 vygenerovány brzdné křivky. Dráha potřebná k zastavení v režimu ETCS L2 je stanovena na 1580 m za 64 s (na základě výsledků konverzního modelu). Průběh brzdné křivky je uveden na obrázku 44.



Obrázek 44 Průběh brzdné křivky jednotky MORAVIA

Zdroj: autor

Jízdní řád

Dalším nutným vstupem do simulace je v tomto případě jízdní řád. Jedná se celkem o 4 vlakové trasy v úseku Odb. Svitava – ŽST Rájec-Jestřebí. Časové údaje vstupního jízdního řádu získané zatabelárního jízdního řádu (TJŘ) jsou uvedeny v tabulce 30 a 31.

Tabulka 30 Jízdní řád směr Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí

Stanice	P/O	Os 4732	Os 4746
Odb. Svitava	odjezd	15:41:30	19:12:30
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	15:44:00	19:15:00
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	15:44:30	19:15:30
ŽST Adamov	příjezd	15:46:30	19:17:30
ŽST Adamov	odjezd	15:47:30	19:18:30
zast. Adamov zastávka	příjezd	15:49:00	19:20:00
zast. Adamov zastávka	odjezd	15:49:30	19:20:30
ŽST Blansko	příjezd	15:55:00	19:26:00
ŽST Blansko	odjezd	15:59:00	19:31:30
zast. Blansko město	příjezd	16:01:00	19:33:30
zast. Blansko město	odjezd	16:02:00	19:34:00
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:04:30	19:36:30
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:05:00	19:37:00
ŽST Rájec-Jestřebí	příjezd	16:07:30	19:39:30

Zdroj: autor podle TJŘ

Tabulka 31 Jízdní řád směr Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava

Stanice	P/O	Os 4741	Os 4757
ŽST Rájec-Jestřebí	odjezd	16:50:30	21:21:00
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:52:30	21:23:00
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:53:00	21:23:30
zast. Blansko město	příjezd	16:55:30	21:26:00
zast. Blansko město	odjezd	16:56:00	21:27:00
ŽST Blansko	příjezd	16:57:30	21:28:30
ŽST Blansko	odjezd	17:02:00	21:31:00
zast. Adamov zastávka	příjezd	17:07:30	21:36:30
zast. Adamov zastávka	odjezd	17:08:00	21:37:00
ŽST Adamov	příjezd	17:09:30	21:38:30
ŽST Adamov	odjezd	17:10:30	21:39:30
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	17:13:00	21:42:00
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	17:13:30	21:42:30
Odb. Svitava	příjezd	17:15:00	21:44:00

Zdroj: autor podle TJŘ

Jízdní řády byly do modelu vloženy na základě známých tabelárních jízdních řádů. Data z jízdního řádu byla použita pro prvotní kalibraci modelu provozu na této trati. Data vycházejí z jízdního řádu 2023/2024, změna č. 1. Z plánovaného jízdního řádu byly také odvozeny plánované jízdní doby (tabulka 32), které jsou dále porovnány s výsledky simulace a praktického měření v kapitole 7.4.

Tabulka 32 Jízdní doby Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí

Úsek mezi dopravními body		Os 4732 [s]	Os 4746 [s]		Os 4741 [s]	Os 4757 [s]
Odb. Svitava - zast. Babice nad Svitavou	sudý směr	150	150	lichý směr	90	90
zast. Babice nad Svitavou - ŽST Adamov		120	120		150	150
ŽST Adamov - zast. Adamov zastávka		90	90		90	90
zast. Adamov zastávka - ŽST Blansko		330	330		330	330
ŽST Blansko - zast. Blansko město		120	120		90	90
zast. Blansko město - zast. Dolní Lhota		150	150		150	150
zast. Dolní Lhota - ŽST Rájec-Jestřebí		150	150		120	120

Zdroj: autor podle TJŘ

7.3 Provádění měření v terénu

Stěžejní částí přípravy simulačního modelu reálné trati bylo provádění terénního výzkumu. Provádění terénního výzkumu bylo rozděleno do dvou částí. V první části bylo prováděno pozorování na stanovišti strojvedoucího, v druhé části bylo nutné získat některé vstupní materiály o zabezpečovacím zařízení, které nebylo možné získat v digitální podobě.

Autor byl při všech popsaných testovacích jízdách přítomen na stanovišti strojvedoucího. Z dostupných dat informačních systémů provozovatele dráhy je sice možné dohledat všechny podstatné skutečnosti týkající se jízdy vlaku, ale přímým pozorováním šlo vždy hned zaznamenat „podezřelé“ jevy, které by vedly k nežádoucímu ovlivnění měření. Mezi takové provozně-organizační jevy patří například nepředpokládané ovlivnění jízdy vlaku pohybem osob v kolejišti, mimořádnou událostí, bezpečnostní pomalou jízdou, chybou strojvedoucího nebo nepříznivými povětrnostními podmínkami. Další skupinu tvoří provozně-technické jevy, které mohou nastat během jízdy vlaku, jedná se například o poruchu vozidla, poruchy a závady na infrastruktuře, závady v řízení provozu, vliv jízdy jiných vlaků, snížení rychlosti vlivem dopravních opatření nebo jízdu na přivolávací návěst. Všechny tyto skutečnosti si autor v rámci terénního měření poznamenal, společně s orientačními časy událostí tak, aby je případně bylo možné přiřadit ke konkrétnímu času dle záznamu z registračního rychloměru.

Pro detailní tvorbu infrastrukturního modelu bylo dále nutné zajistit potřebná data o staničním, vlakovém a traťovém zabezpečovacím zařízení. Jednalo se zejména o data ze závěrových tabulek, jejichž digitalizace probíhá postupně. Kompletní závěrové tabulky jsou uloženy přímo ve stanici případně u příslušné odborné správy provozovatele dráhy. Aby simulace co nejvíce odpovídala reálné infrastruktuře, prováděl autor i ověřování stavění možných jízdních cest a zabezpečených prvků na simulacích jednotlivých jednotných obslužných pracovišť (JOP).

7.4 Porovnání výsledků a vyhodnocení

Vlastní simulace byla provedena na sestaveném simulačním modelu, kde byly vytvořeny itineráře jízdy (*Itieneraires*), které přesně odpovídají reálné jízdě vlaků Os 4732, 4746, 4741 a 4757 dne 26. 4. 2024. Vlak Os 4732 byl v celé zájmové trase veden po 2. traťové koleji, ve stanici Adamov po 2. staniční koleji, ve stanici Blansko po 4. staniční koleji a ve stanici Rájec-Jestřebí po 1. staniční koleji. Vlak Os 4746 byl v celé zájmové trase veden po 2. traťové koleji, ve stanici Adamov po 2. staniční koleji, ve stanici Blansko po 4. staniční

koleji a ve stanici Rájec-Jestřebí po 2. staniční koleji. Vlaky Os 4741 a 4757 byly vedeny vždy po 1. traťové koleji a ve všech stanicích po 1. staniční koleji. Prvotní výsledky simulace byly porovnány s jízdním řádem a následně byla provedena kalibrace modelu tak, aby dosažené jízdní doby odpovídaly stanovenému jízdnímu řádu. Odpovídajících hodnot bylo dosaženo při nastavení využití maximálního dostupného výkonu a maximální rychlosti na hodnotu 95 %, v případě zpoždění vlaku v simulaci na 98 %. Následně byla provedena opětovná simulace jednotlivých vlakových tras. Porovnání výsledků je rozděleno na dvě části. V první části jsou výsledky simulace porovnány se sestaveným jízdním řádem, v druhé části jsou dosažené výsledky porovnány navíc i s daty zjištěnými z registračního rychloměru hnacího vozidla ř. 530.

Porovnání simulace se sestaveným jízdním řádem

Simulační SW OpenTrack umožňuje přímé porovnání hodnot dodržování jízdního řádu. V tabulce 33 a 34 je provedeno porovnání hodnot příjezdů a odjezdů v jednotlivých dopravních bodech.

Tabulka 33 Simulace jízdního řádu Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí

Stanice	P/O	Os 4732			Os 4746		
		plán	simulace	odch. [s]	plán	simulace	odch. [s]
Odb. Svitava	odjezd	15:41:30	15:41:30	0	19:12:30	19:12:30	0
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	15:44:00	15:43:53	-7	19:15:00	19:14:53	-7
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	15:44:30	15:44:30	0	19:15:30	19:15:30	0
ŽST Adamov	příjezd	15:46:30	15:46:45	15	19:17:30	19:17:45	15
ŽST Adamov	odjezd	15:47:30	15:47:30	0	19:18:30	19:18:30	0
zast. Adamov zastávka	příjezd	15:49:00	15:48:40	-20	19:20:00	19:19:40	-20
zast. Adamov zastávka	odjezd	15:49:30	15:49:30	0	19:20:30	19:20:30	0
ŽST Blansko	příjezd	15:55:00	15:54:41	-19	19:26:00	19:25:41	-19
ŽST Blansko	odjezd	15:59:00	15:59:00	0	19:31:30	19:31:30	0
zast. Blansko město	příjezd	16:01:00	16:00:18	-42	19:33:30	19:32:48	-42
zast. Blansko město	odjezd	16:02:00	16:02:00	0	19:34:00	19:34:00	0
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:04:30	16:04:14	-16	19:36:30	19:36:14	-16
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:05:00	16:05:00	0	19:37:00	19:37:00	0
ŽST Rájec-Jestřebí	příjezd	16:07:30	16:07:09	-21	19:39:30	19:38:49	-21

Zdroj: autor

Tabulka 34 Simulace jízdního řádu Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava

Stanice	P/O	Os 4741			Os 4757		
		plán	simulace	odch. [s]	plán	simulace	odch. [s]
ŽST Rájec-Jestřebí	odjezd	16:50:30	16:50:30	0	21:21:00	21:21:00	0
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:52:30	16:52:15	-15	21:23:00	21:22:45	-15
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:53:00	16:53:00	0	21:23:30	21:23:30	0
zast. Blansko město	příjezd	16:55:30	16:55:14	-16	21:26:00	21:25:44	-16
zast. Blansko město	odjezd	16:56:00	16:56:00	0	21:27:00	21:27:00	0
ŽST Blansko	příjezd	16:57:30	16:57:09	-21	21:28:30	21:28:09	-21
ŽST Blansko	odjezd	17:02:00	17:02:00	0	21:31:00	21:31:00	0
zast. Adamov zastávka	příjezd	17:07:30	17:07:04	-26	21:36:30	21:36:04	-26
zast. Adamov zastávka	odjezd	17:08:00	17:08:00	0	21:37:00	21:37:00	0
ŽST Adamov	příjezd	17:09:30	17:09:10	-20	21:38:30	21:38:10	-20
ŽST Adamov	odjezd	17:10:30	17:10:30	0	21:39:30	21:39:30	0
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	17:13:00	17:12:44	-16	21:42:00	21:41:44	-16
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	17:13:30	17:13:30	0	21:42:30	21:42:30	0
Odb. Svitava	příjezd	17:15:00	17:15:30	30	21:44:00	21:44:30	30

Zdroj: autor

Z porovnání jízdního řádu se simulací vyplývá, že stanovené časy příjezdů a odjezdů byly dodrženy s výjimkou příjezdu sudých vlaků do ŽST Adamov a průjezdu lichých vlaků Odb. Svitava. Tento jev je způsoben tím, že reálně je na zastávce Babice nad Svitavou uvažováno se zastavením pouze na znamení. V rámci simulace bylo uvažováno s tím, že vlak na zastávce zastaví na minimální možný pobyt 0,5 minuty. Z hlediska validace modelu je podstatné především srovnání dosažených jízdních dob, které je uvedeno v tabulce 35.

Tabulka 35 Porovnání jízdních dob Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí (obousměrně)

Úsek mezi dopravními body	Os 4732			Os 4746		
	plán [s]	simulace [s]	odch. [s]	plán [s]	simulace [s]	odch. [s]
Odb. Svitava - zast. Babice nad Svitavou	150	143	-7	150	143	-7
zast. Babice nad Svitavou - ŽST Adamov	120	135	15	120	135	15
ŽST Adamov - zast. Adamov zastávka	90	70	-20	90	70	-20
zast. Adamov zastávka - ŽST Blansko	330	311	-19	330	311	-19
ŽST Blansko - zast. Blansko město	120	78	-42	120	78	-42
zast. Blansko město - zast. Dolní Lhota	150	134	-16	150	134	-16
zast. Dolní Lhota - ŽST Rájec-Jestřebí	150	129	-21	150	109	-41
Úsek mezi dopravními body	Os 4741			Os 4757		
	plán [s]	simulace [s]	odch. [s]	plán [s]	simulace [s]	odch. [s]
ŽST Rájec-Jestřebí - zast. Dolní Lhota	120	105	-15	120	105	-15
zast. Dolní Lhota - zast. Blansko město	150	134	-16	150	134	-16
zast. Blansko město - ŽST Blansko	90	69	-21	90	69	-21
ŽST Blansko - zast. Adamov zastávka	330	304	-26	330	304	-26
zast. Adamov zastávka - ŽST Adamov	90	70	-20	90	70	-20
ŽST Adamov - zast. Babice nad Svitavou	150	134	-16	150	134	-16
zast. Babice nad Svitavou - Odb. Svitava	90	120	30	90	120	30

Zdroj: autor

Výsledky porovnání jízdních dob potvrzují, že z hlediska dodržení stanoveného jízdního řádu je rizikovým jevem dodržení jízdních dob při zastavení vlaku na zast. Babice nad Svitavou. V ostatních případech byly jízdni doby vždy dodrženy, přičemž platí, že celková odchylka jízdních dob zjištěných simulací od jízdních dob stanovených jízdním řádem je u vlaku Os 4732 12,6 %, u vlaku Os 4746 14,4 % a u vlaků Os 4741 a 4757 14,1 %. **Celková odchylka jízdních dob je 13,8 %.** Vzhledem k tomu, že odchylka jízdních dob, s výjimkou úseku ŽST Blansko – zastávka Blansko město, nepřesahuje hodnotu 0,5 minuty (jízdni doby jsou zaokrouhlovány vždy na celé 0,5 minuty), lze výsledky simulačního modelu považovat za validní.

Porovnání simulace se skutečně naměřenými hodnotami

Časy zastavení vlaků v zastávkách a jejich odjezdů změřil autor v rámci terénního výzkumu. Tyto hodnoty byly však pouze orientační a byly dále zpřesněny pomocí rozboru výstupů registračního rychloměru jednotky ř. 530. V tabulkách 36 a 37 je provedeno porovnání hodnot příjezdů a odjezdů v jednotlivých dopravních bodech.

Tabulka 36 Porovnání simulace a skutečné jízdy Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí

Stanice	P/O	Os 4732			Os 4746		
		simulace	záznam	odch. [s]	simulace	záznam	odch. [s]
Odb. Svitava	odjezd	15:41:30	15:41:35	5	19:12:30	19:12:45	15
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	15:43:53	15:44:10	17	19:14:53	19:14:56	3
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	15:44:30	15:44:41	11	19:15:30	19:15:32	2
ŽST Adamov	příjezd	15:46:45	15:47:11	26	19:17:45	19:18:00	15
ŽST Adamov	odjezd	15:47:30	15:47:45	15	19:18:30	19:18:34	4
zast. Adamov zastávka	příjezd	15:48:40	15:49:14	34	19:19:40	19:20:01	21
zast. Adamov zastávka	odjezd	15:49:30	15:49:54	24	19:20:30	19:20:35	5
ŽST Blansko	příjezd	15:54:41	15:55:22	41	19:25:41	19:26:03	22
ŽST Blansko	odjezd	15:59:00	16:00:15	75	19:31:30	19:31:48	18
zast. Blansko město	příjezd	16:00:18	16:01:45	87	19:32:48	19:33:20	32
zast. Blansko město	odjezd	16:02:00	16:02:25	25	19:34:00	19:34:02	2
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:04:14	16:04:53	39	19:36:14	19:36:28	14
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:05:00	16:05:24	24	19:37:00	19:37:02	2
ŽST Rájec-Jestřebí	příjezd	16:07:09	16:07:57	48	19:38:49	19:39:20	31

Zdroj: autor

Tabulka 37 Porovnání simulace a skutečné jízdy Rájec-Jestřebí – Odb. Svitava

Stanice	P/O	Os 4741			Os 4757		
		simulace	záznam	odch. [s]	simulace	záznam	odch. [s]
ŽST Rájec-Jestřebí	odjezd	16:50:30	16:54:51	261	21:21:00	21:21:11	11
zast. Dolní Lhota	příjezd	16:52:15	16:56:49	274	21:22:45	21:23:12	27
zast. Dolní Lhota	odjezd	16:53:00	16:57:22	262	21:23:30	21:23:38	8
zast. Blansko město	příjezd	16:55:14	17:00:01	287	21:25:44	21:26:07	23
zast. Blansko město	odjezd	16:56:00	17:01:27	327	21:27:00	21:26:44	-16
ŽST Blansko	příjezd	16:57:09	17:02:54	345	21:28:09	21:28:37	28
ŽST Blansko	odjezd	17:02:00	17:03:34	94	21:31:00	21:31:17	17
zast. Adamov zastávka	příjezd	17:07:04	17:08:42	98	21:36:04	21:36:36	32
zast. Adamov zastávka	odjezd	17:08:00	17:09:17	77	21:37:00	21:37:17	17
ŽST Adamov	příjezd	17:09:10	17:10:45	95	21:38:10	21:38:41	31
ŽST Adamov	odjezd	17:10:30	17:11:14	44	21:39:30	21:39:18	-12
zast. Babice nad Svitavou	příjezd	17:12:44	17:13:35	51	21:41:44	21:41:51	7
zast. Babice nad Svitavou	odjezd	17:13:30	17:14:01	31	21:42:30	21:41:51	-39
Odb. Svitava	příjezd	17:15:30	17:16:05	35	21:44:30	21:43:46	-44

Zdroj: autor

Reálné časy příjezdů a odjezdů byly ovlivněny vnějšími podmínkami. Tyto skutečnosti byly zaznamenány v rámci terénního výzkumu. V případě jízdy vlaku Os 4732 došlo

k navýšení zpoždění na odjezdu vlaku z ŽST Blansko vlivem pravidelného předjíždění vlakem Ex 276, který byl opožděn. U vlaku Os 4741 bylo zpoždění způsobeno vstupním zpožděním na odjezdu z ŽST Skalice nad Svitavou, který byl uskutečněn na přivolávací návěst (PN). K dalšímu navýšení zpoždění došlo na odjezdu ze zastávky Blansko město, kde byl vlak předjet po 2. traťové koleji a 2a. staniční koleji vlakem Ex 371, tím došlo k prodloužení pobytu na zastávce před cestovým návěstidlem Sc1a ŽST Blansko. Rozhodným ukazatelem, který není dle záznamu terénního výzkumu zpožděním ovlivněn, jsou jízdní doby mezi jednotlivými dopravními body. Porovnání skutečných jízdních dob se simulací je uvedeno v tabulce 38.

Tabulka 38 Porovnání simulace a skutečných jízdních dob (obousměrně)

Úsek mezi dopravními body	Os 4732			Os 4746		
	simulace [s]	zázn. [s]	odch. [s]	simulace [s]	zázn. [s]	odch. [s]
Odb. Svitava - zast. Babice nad Svitavou	143	155	12	143	131	-12
zast. Babice nad Svitavou - ŽST Adamov	135	150	15	135	148	13
ŽST Adamov - zast. Adamov zastávka	70	89	19	70	87	17
zast. Adamov zastávka - ŽST Blansko	311	328	17	311	328	17
ŽST Blansko - zast. Blansko město	78	90	12	78	92	14
zast. Blansko město - zast. Dolní Lhota	134	148	14	134	146	12
zast. Dolní Lhota - ŽST Rájec-Jestřebí	129	153	24	109	138	29
Úsek mezi dopravními body	Os 4741			Os 4757		
	simulace [s]	zázn. [s]	odch. [s]	simulace [s]	zázn. [s]	odch. [s]
ŽST Rájec-Jestřebí - zast. Dolní Lhota	105	118	13	105	121	16
zast. Dolní Lhota - zast. Blansko město	134	159	25	134	149	15
zast. Blansko město - ŽST Blansko	69	87	18	69	113	44
ŽST Blansko - zast. Adamov zastávka	304	308	4	304	319	15
zast. Adamov zastávka - ŽST Adamov	70	88	18	70	84	14
ŽST Adamov - zast. Babice nad Svitavou	134	141	7	134	153	19
zast. Babice nad Svitavou - Odb. Svitava	120	124	4	120	115	-5

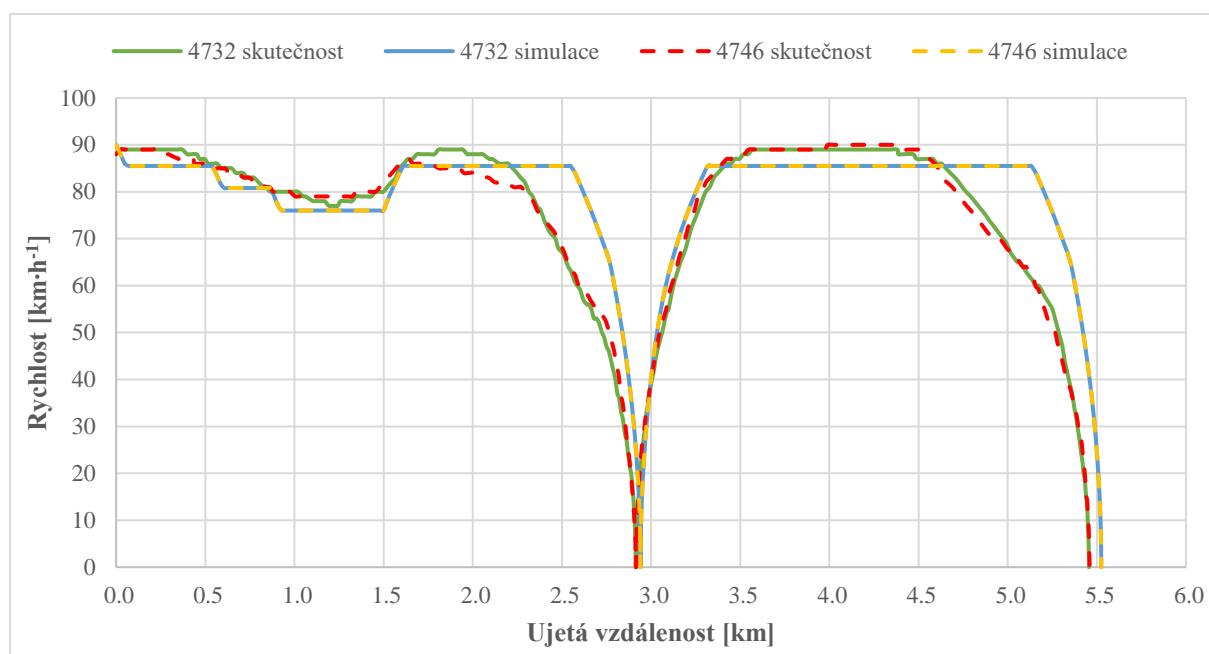
Zdroj: autor

Výsledky simulace a záznamu skutečné jízdy vlaku ve všech případech potvrzují validitu hodnot získaných pomocí simulace. Celková odchylka jízdních dob ze skutečných jízd vlaku od jízdních dob zjištěných simulací je u vlaku Os 4732 11,3 %, u vlaku Os 4746 9,2 %, u vlaku Os 4741 9,5 % a u vlaku Os 4757 12,6 %. **Celková odchylka jízdních dob je 10,6 %.** Tato odchylka může být způsobena individuálním řízením jízdy vlaku strojvedoucím.

Navíc u jízdy vlaku Os 4757 byl použit k vedení vlaku systém AVV. V obou případech platí, že strojvedoucí ani systém AVV nevyužívají na maximum výkon jednotky ani hraniční hodnoty brzdných křivek.

Porovnání dráhových tachografů simulace a reálné jízdy vlaku

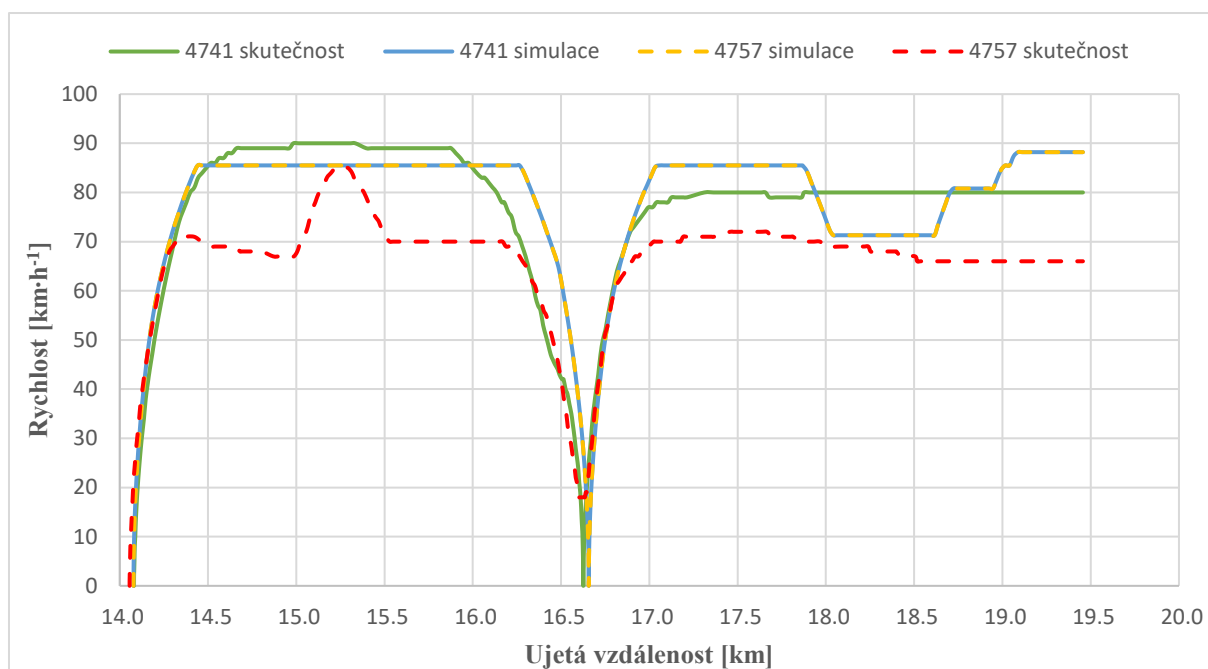
Porovnání na základě jízdních dob bylo provedeno v předcházející podkapitole. Z hlediska potvrzení správnosti simulačního modelu a vytvořených modelů aplikovaných trakčních a brzdných křivek je zásadní pro potvrzení správnosti simulací a aplikovatelnost navrhovaného řešení v obecné rovině. Na obrázku 45 a 46 jsou uvedeny výřezy dráhových tachografů pro úsek Odb. Svitava – Adamov v sudém i lichém směru. Kompletní dráhové tachografy pro úsek Odb. Svitava – Rájec-Jestřebí jsou uvedeny v příloze J.



Obrázek 45 Dráhový tachograf jízdy vlaku Odb. Svitava – ŽST Adamov

Zdroj: autor

Z dráhového tachografu je patrné, že při skutečné jízdě vlaku, kdy brzdění ovládá strojvedoucí, nekopíruje v úvodní fázi brzdění křivka skutečné jízdy vlaku křivku, která je vygenerovaná simulačním modelem. To je způsobeno především tím, že strojvedoucí nejede podle limitu (shodného s křivkou *Indication*) zobrazeného na DMI. Dále je patrná odchylka v místě zastavení. To je dáno především tím, že strojvedoucí zastavuje v místě obvyklého zastavení, zatímco simulační model předpokládá zastavení před úrovní konce nástupiště.



Obrázek 46 Dráhový tachograf jízdy vlaku ŽST Adamov – Odb. Svitava

Zdroj: autor

Dráhový tachograf na obrázku 46 ukazuje významně jiný průběh křivky skutečné jízdy vlaku Os 4757, který je způsobený nezastavením v zastávce Babice nad Svitavou (na znamení). Tuto odchylku by v případě potřeby bylo možné v modelu ještě upravit a nechat vlak zastávkou projet sníženou rychlostí tak, aby se průběh křivky více přiblížil skutečnosti. U vlaku Os 4741 průběh křivky lépe odpovídá simulaci.

Vyhodnocení výsledků simulace a reálného měření

Cílem této kapitoly bylo ověření validity navrženého simulačního modelu na reálné infrastruktuře. Model byl zjednodušen na simulaci ETCS L2, z důvodu dostupnosti reálné předlohy. Z hlediska nastavení parametrů infrastruktury, parametrů zabezpečovacího zařízení a ETCS, nastavení brzdných křivek a dalších rozhodných parametrů jednotlivých souprav lze považovat toto ověření za dostatečné.

Výsledky simulace byly srovnány s výsledky reálného měření v oblasti dosahovaných jízdních dob. **Bylo potvrzeno, že maximální odchylka dosahovaných jízdních dob se u jednotlivých testovacích jízd pohybuje mezi 9-15 %.** Dále byl zkoumán průběh jízdy na jednotlivých dráhových tachografech, kde bylo možné vyzorovat odchylku skutečné jízdy vlaků od simulace. **Při tomto srovnání bylo zjištěno, že strojvedoucí při své jízdě maximálně nevyužívá limity stanovených brzdných křivek a zejména při začátku brzdění je patrná odchylka od simulace.** Opakováním simulací a dalším srovnáním s již sestaveným jízdním řádem byla testována hladina použitelného maximálního výkonu a maximální rychlosti.

Bylo zjištěno, že pro dosažení validních výsledků simulace je nutné hladinu použitelného maximálního výkonu a maximální rychlost nastavit na 95 %, v případě zpoždění vlaku v simulaci na 98 %.

8 URČENÍ PŘÍNOSŮ PRÁCE PRO VĚDU I PRAXI

V práci je široce řešena problematika provozování systémů automatické kontroly jízdy vlaku. Autor komplexně popsal teoretický úvod do systémů automatické kontroly jízdy vlaku. Na základě provedené analýzy se dále rozhodl v pokračování výzkumu vlivu zavádění systému ERTMS na kapacitu tratí. Jednalo se o logický krok, protože právě zavádění systému ERTMS je v současné době v České republice velice aktuálním tématem.

Autor se pro naplnění cíle práce rozhodl využít simulační modelování provozu na mikroskopické úrovni. Výhodou tohoto přístupu je možnost přímého odečtení výsledných hodnot na základě jednotlivých simulovaných provozních stavů. Simulace umožňuje zahrnout všechny podstatné technické a technologické aspekty, které plynou ze zavádění prostředků automatické kontroly jízdy vlaku.

Autor navrhl vlastní simulační model pro ověření míry ovlivnění kapacity trati nasazením prostředků automatické kontroly jízdy vlaků pomocí simulace. Na základě rozsáhlé množiny experimentů autor postupně vypracoval tříúrovňový simulační model, pomocí kterého lze komplexně posoudit skutečný efekt těchto systémů. Z hlediska návrhu možností hodnocení míry ovlivnění kapacity trati byly dále stanoveny kvantitativní a kvalitativní ukazatele, kterými je možné vliv na kapacitu tratí popsat. Důležitou podmínkou výběru bylo co nejmenší zkreslení výsledků přímo získaných prostřednictvím simulace, proto bylo jako rozhodný ukazatel vyhodnocení traťové části zvoleno následné mezidobí. Pro posouzení simulace jízdního řádu byl zvolen ukazatel průměrný přírůstek zpoždění. Na základě vyhodnocení výsledků tříúrovňového simulačního bylo možné stanovit konkrétní závěry, které popisují vliv implementace systémů automatické kontroly jízdy vlaku na kapacitu tratí.

V průběhu provádění výzkumu se, v jednotlivých částech této disertační práce, ukázala komplexnost celého problému a projevila se potřeba zaměřit další výzkum na některé oblasti, které tato práce nemohla již rozsahově pojmut. Jedná se například o simulaci vlivu systémů automatického vedení vlaku a systémů CBTC na kapacitu tratí, dále se jedná o simulační posouzení vhodnosti jednotlivých systémů podle druhu provozování dané železniční infrastruktury. Další důležitou vědeckou výzvou je návrh systému, který by spojoval výhody všech dosud uplatňovaných systémů v oblasti automatické kontroly jízdy vlaku. Důležitým aspektem automatizace je také účelné hospodaření s trakční energií, kdy v rámci optimalizace dochází ke vzájemnému ovlivňování jízd vlaků. Zásadní je proto do budoucna popsat i vliv takových systémů na kapacitu tratí. Vliv na kapacitu tratí má také automatizace řízení provozu

a způsob provozování dané části infrastruktury, i v této oblasti je žádoucí popsat vliv zavádění těchto úprav na kapacitu tratí. Všechny výše nastíněné okruhy témat mohou být v budoucnu zkoumány v rámci navazující vědecké činnosti v rámci školícího pracoviště.

ZÁVĚR

Disertační práce navrhuje jeden z možných přístupů k hodnocení kapacity dané části železniční infrastruktury. Stanovený cíl práce, tedy návrh simulačního modelu pro provoz vlaků pod dohledem systémů automatické kontroly jízdy vlaku, byl beze zbytku splněn. **Na základě podrobné analýzy současného stavu vědeckého poznání a vlastního autorského výzkumu byl vytvořen tříúrovňový simulační model pro posouzení kapacity tratí vybavených systémem ETCS na úrovních L2 a L3.**

Tříúrovňový simulační model umožňuje posoudit vliv systémů automatické kontroly jízdy vlaků ve třech různých úrovních. V první úrovni je posouzena samostatně traťová část, kdy bylo rozhodující stanovit vliv délky vzniklých prostorových oddílů na velikost následného mezidobí v daném úseku, následně pak i vliv nasazení ETCS L3 a provoz v pohyblivých prostorových oddílech. V další úrovni jsou posuzována staniční zhlaví. V třetí úrovni je simulace provedena na komplexním modelu trati, ve kterém je zkoumán vliv zavádění ETCS na kvalitu dodržování jízdního řádu. **Prostřednictvím tříúrovňového simulačního modelu bylo zjištěno, že při posuzování širé trati je, pro získání ekvivalentních hodnot následného mezidobí, při změně zabezpečení trati z automatického bloku na systém ETCS L2, zapotřebí provést zkrácení pevných prostorových oddílů na délku 0,5 km.** V případě vybavení trati systémem ETCS L3 pak dochází ke zmenšení hodnoty následného mezidobí až o 18 %. V případě posuzování staničních zhlaví dochází při nasazení systému ETCS L2 s benefity ke zmenšení hodnot následného mezidobí o 6 %, při nasazení systému ETCS L3 až o 21 %. Při simulaci provozu na jednokolejné trati došlo ke zhoršení ukazatele přírůstku zpoždění o 12 % (v případě ETCS L2 s benefity) a zlepšení ukazatele přírůstku zpoždění o 3 % (v případě ETCS L3). Bylo prokázáno, že v případě simulace provozu na jednokolejné trati nemá nasazení systému ETCS L2 a L3 významný vliv na hodnotu stanoveného ukazatele přírůstku zpoždění. Celkové shrnutí změny stanovených ukazatelů (následného mezidobí, přírůstku zpoždění) je uvedeno v tabulce 39.

Tabulka 39 Celkové shrnutí nejvýznamnějších výsledků dosažených simulací

Úroveň simulačního modelu	ETCS L2 Změna hodnoty ukazatele [%]	ETCS L3 Změna hodnoty ukazatele [%]
Traťová část – první úroveň (T)	0	18
Staniční zhlaví – druhá úroveň (S)	6	21
Kombinovaná část – třetí úroveň (K)	-12	3

Zdroj: autor

Autor došel k závěru, že využití systému ETCS může mít kladný vliv na kapacitu tratí, pokud bude využíván potenciál ETCS L2 s benefity a budou implementovány modifikace zařízení, které umožní provoz ve zkrácených prostorových oddílech. Přispívajícím faktorem může být i možnost zkracování brzdných křivek při využití brzdného modelu pro *gamma trains*. Samostatným problémem je potom zavádění provozu v pohyblivých prostorových oddílech a nasazení systému ETCS L3, které by přispělo k dalšímu zlepšení hodnotících ukazatelů kapacity tratí.

Zkoumaná problematika se ukázala jako natolik rozsáhlá, že přesahuje rámec této disertační práce. Proto se autor ve vyhodnocení vlastního přínosu práce pro vědu i praxi rozhodl uvést i další možné směry navazující vědecké činnosti v této oblasti.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

1. **Railway Technology.** *Lille VAL* [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: https://www.railway-technology.com/projects/lille_val/
2. **YIN, Jiateng, Tao TANG, Lixing YANG, Jing XUN, Yeran HUANG a Ziyou GAO.** Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. *Ransportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2017, (85), 548-572 [cit. 2021-6-15]. ISSN 0968-090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2017.09.009
3. **SIAHVASHI, Ali a Bijan MOAVENI.** *Automatic Train Control based on the Multi-Agent Control of Cooperative Systems.* The Journal of Mathematics and Computer Science [online]. 2010, 1(4), 247-257 [cit. 2021-6-12]. Dostupné z: doi:10.22436/jmcs.001.04.02
4. **ČSN EN 62290–1.** *Drážní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou – Část 1: Systémové principy a základní pojmy.* Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
5. **SmartTail4.0.** *How Swiss railway industry gets smart* [online]. Bern: SBB AG Infrastruktur, 2021 [cit. 2021-7-18]. Dostupné z: <https://www.smartrail40.ch/index.asp>
6. **ZAHRADNÍK, Jiří a Karol RÁSTOČNÝ.** *Aplikácie zabezpečovacích systémov.* Žilina: Žilinská univerzita, 2006. ISBN 80-8070-546-1.
7. **PACHL, Joern.** *Railway operation and control.* Mountlake Terrace: WA: VTD Rail Pub., 2009. ISBN 9780971991583.
8. **ANDERS, Enrico, Gregor THEEG a Sergej VLASENKO.** *Railway signalling & interlocking: international compendium.* Hamburg: Eurailpress, 2009. ISBN 3777103942.
9. **Ministerstvo dopravy ČR.** *Národní implementační plán ERTMS* [online]. Evropská komise, 2017, 52 [cit. 2023-7-18]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Evropska-unie-na-zeleznici/Evropska-unie-na-zeleznici/NIP-ERTMS-2017.pdf.aspx?lang=cs-CZ>
10. **WINTER, Peter a Jens BRABAND.** *Compendium on ERTMS: European rail traffic management system.* Hamburg: Eurailpress, c2009. ISBN 978-3-7771-0396-9.
11. **ENDERSBY, Tom.** *Viability of ETCS limited supervision for GB application: high-level study.* RSSB [online]. 2016, 73 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.2394.9208

12. **DURMUŞ, Mustafa, Ugur YILDIRIM a Mehmet SÖYLEMEZ.** *Interlocking System Design for ERTMS / ETCS: An Approach with Batches Petri Nets.* IFAC Proceedings Volumes [online]. 2012, 45(29), 110-115 [cit. 2023-04-05]. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20121003-3-MX-4033.00021
13. **NACHTIGALL, Petr a Jan OUŘEDNÍČEK.** *Wider aspects of deceleration supervision in ERTMS/ETCS.* MATEC Web of Conferences [online]. 2018, 235 [cit. 2023-04-05]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201823500010
14. **SASSI, Insaf, Salvatore Danilo IOVINO a Nicola RICEVUTO.** *Onboard Train Integrity as enabler for ETCS Level 3* [online]. Birmingham UK: WCCR, 2022 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/361792014_Onboard_Train_Integrity_as_enabler_for_ETCS_Level_3
15. **NACHTIGALL, Petr a Jan OUŘEDNÍČEK.** *Zajištění dohledu nad zastavením (snížením rychlosti) v ERTMS/ETCS v souvislostech Kontext zabezpečení zastávky (snížení rychlosti) v rámci ERTMS/ETCS.* Vědeckotechnický sborník ČD [online]. 2019, 2019(47), 26 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/333566976_Zajisteni_dohledu_nad_zastavenim_snizenim_rychlosti_v_ERTMSETCS_v_souvislostech_Context_of_security_of_the_stop_speed_reduction_under_the_ERTMSETCS
16. **FERRARI, Alessio.** *Product Line Engineering Applied to CBTC Systems Development* [online]. 2017, 12 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z:
<http://puma.isti.cnr.it/rmydownload.php?filename=cnr.isti/cnr.isti/2012-A2-043/2012-A2-043.pdf>.
17. **CHEN, Rongwu. a Jin GUO.** *Development of the new CBTC system simulation and performance analysis.* WIT Transactions on the Built Environment [online]. 2010-08-04, s. 497-507 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: doi:10.2495/CR100461
18. **HUBER+SUHNER Excellence in connectivity solutions.** *CBTC Connectivity Solutions White paper* [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z:
<https://fdocuments.in/document/white-paper-cbtc-connectivity-solutions-1.htm>
19. **DI CLAUDIO, Mariano, Alessandro FANTECHI, Giacomo MARTELLI, Simone MENABENIOVÁ a Paolo NESI.** *Model-based development of an Automatic Train Operation component for Communication Based Train Controls* [online]. 2014, 7 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.5114.8486

20. **Indian railways.** *An Introductory Handbook on Communications Based Train Control (CBTC)*, 2021. [cit. 2023-12-25].
Dostupné z: <https://rdso.indianrailways.gov.in/uploads/files/Introductory%20Handbook%20on%20CBTC.pdf>.
21. **STOVER, Jeffrey.** *CITYFLO 650 System Overview*. 2010. [cit. 2023-12-25].
Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vanessa_Massara/post/Can_anyone_suggest_references_papers_books_and_maps_about_the_history_of_trams_streetcars_and_buses_in_your_city_state_or_country/attachment/59d61ddc79197b807797b379/AS%3A273751826993154%401442278929581/download/bombardier.pdf.
22. **Railway International.** *Malaga metro reaches the city centre thanks to Alstom's CBTC signalling technology*, 2023 [Online]. [cit. 2023-12-25]. Dostupné z: <https://railway-international.com/news/65995-malaga-metro-reaches-the-city-centre-thanks-to-alstom-s-cbtc-signalling-technology>.
23. **Thales Group.** *SelTrac™ G8*. 2023 [online]. [cit. 2023-12-25]. Dostupné z: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/transport/urban-mobility/seltractm-g8#seltracug8>.
24. **NAKASHIMA, Kenta, Toru, YANAGIDA, Kenichi, FUJII, Shintaro, OKI a Sungin LIM.** *New CBTC System for Smart Operation*. Hitachi Review. 2018, roč. 67, č. 7, s. 5 [online]. [cit. 2023-12-25]. Dostupné z: https://www.hitachi.com/rev/archive/2018/r2018_07/pdf/P066-070_R7a05.pdf.
25. **Railway International.** *Siemens mobility to provide CBTC signaling for the first driverless metro system in Kaohsiung, Taiwan*, 2022 [Online]. [cit. 2023-12-25].
26. Dostupné z: <https://www.railway-international.com/news/60774-siemens-mobility-to-provide-cbtc-signaling-for-the-first-driverless-metro-system-in-kaohsiung-taiwan>.
27. **MARTINEZ, Laura a Martin ULLRICH.** Terminology, differences, and challenges of Communications-Based Train Control and European Train Control systems [online]. 2020-08-19, s. 15-26 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: doi:10.2495/CR200021
28. **YIN, Jiateng, Tao TANG, Lixing YANG, Jing XUN, Yeran HUANG a Ziyu GAO.** *Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies [online]. 2017, 85, 548-572 [cit. 2023-04-06]. ISSN 0968090X.
Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2017.09.009
29. **ALVÁREZ, Rodrigo a Juan ROMÁN.** *White paper - ETCS L2 CBTC over LTE: Convergence of the radio layer in advanced train control systems*, 2013 [online]. [cit.

- 2023-04-05]. Dostupné z: <https://railsystemsaustralia.com.au/wp-content/uploads/2019/10/RSA-White-Paper-ETCS-L2-and-CBTC-over-LTE-Convergence-of-the-radio-layer-in-advanced-Train-Control-Simpactsystems.pdf>
30. **BRISO-RODRÍGUEZ, Cesar, Juan Moreno GARCÍA-LOYGORRI a Lei ZHANG.** *Transmission-Based Signaling Systems*. Modern Railway Engineering [online]. 2018, 2018-03-07 [cit. 2023-04-07]. ISBN 978-953-51-3859-4. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.70617
 31. **GURNÍK, Peter.** *Next Generation Train Control (NGTC): More Effective Railways through the Convergence of Main-line and Urban Train Control Systems*. Transportation Research Procedia [online]. 2016, 14, 1855-1864 [cit. 2023-04-06]. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2016.05.152
 32. **CAO, Yuan, Lianchuan MA a Yuzhuo ZHANG.** Application of fuzzy predictive control technology in automatic train operation. *Cluster Computing* [online]. 2019, 22(S6), 14135-14144 [cit. 2021-8-18]. ISSN 1386-7857. Dostupné z: doi:10.1007/s10586-018-2258-0
 33. **MOLKOVÁ, Tatiana.** *Kapacita železničních tratí*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-317-1.
 34. **BULÍČEK, Josef.** *Modelování technologických procesů v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2011. ISBN 978-80-7395-442-0.
 35. **LIANG, Jiajian.** *Metaheuristic-based dispatching optimization integrated in multi-scale simulation model of railway operation* [online]. Stuttgart, 2017 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: <http://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9095>. Disertační práce. Universität Stuttgart. Vedoucí práce Ullrich Martin.
 36. **GU, Jingda, Xiaofeng YANG, Trillion Q. ZHENG a Miao WANG.** *Modelling and Simulation of Double-Train Macroscopic Representation Emulator in Urban Rail Transit*. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 3928-3933 [cit. 2021-8-18]. ISBN 978-1-4799-7312-5. Dostupné z: doi:10.1109/ECCE.2018.8557663
 37. **SMA+Partner.** *Viriato Applications 2021* [online]. [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: <https://www.railml.org/en/introduction/applications/detail/viriato.html>
 38. **DE FABRIS, Stefano, Giorgio MEDEOSI a Giuliano MONTANARO.** *Tenissimo: Improving the microscopic simulation of railway networks* [online]. 2018-07-02, s. 199-211 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: doi:10.2495/CR18018

39. **SMA+ optimising railways.** *GESCHÄFTSBERICHT: optimising railways*, 2020 [online]. [cit. 2021-8-18]. 2020 Dostupné z: https://www.sma-partner.com/images/Downloads/GB20_210628.pdf
40. **MIDDELKOOP, Dick. a Michiel BOUWMAN.** *Simone: Large scale train network simulations*. Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304) [online]. IEEE, 2001, s. 1042-1047 [cit. 2021-8-18]. ISBN 0-7803-7307-3. Dostupné z: doi:10.1109/WSC.2001.977412
41. **Caliper Corporation.** *TransCAD Transportation Planning Software, 2021* [online]. [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: <https://www.caliper.com/tcovu.htm>
42. **SCHEIER, Benedikt.** *Eisenbahnbetriebssimulationen 2005* [online]. [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: https://elib.dlr.de/58418/1/AU_FS_Vergleich_OpenTrack_RailSys_Scheier_050303.pdf
43. **SCHÜTTERT, Andreas, Bastian KOGEL a Nils NIESEN.** *Deutschlandweite Kapazitätsermittlung von Strecken und Knoten*. Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen [online]. 2016, s. 16 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: <https://publications.rwth-aachen.de/record/720257/files/720257.pdf>
44. **SEWCYK, Bernd a Michael KETTNER.** *Network Evaluation Model NEMO*. Institute of Transport, Railway Construction and Operation (IVE) [online]. University of Hanover, s. 5 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/014.pdf>
45. **MARTON, Peter a Robert ADAMKO.** *Villon - A tool for simulation of operation of transportation terminals*. *Komunikacie* [online]. 2010, 10(2), 10-14 [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261608524_Villon_-_A_tool_for_simulation_of_operation_of_transportation_terminals
46. **MARINOV, Marin a José VIEGAS.** *A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network*. *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. 2011, 19(1), 516-539 [cit. 2021-8-18]. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2010.08.009
47. **SIMCON.** *About Simcon*. 2021 [online]. [cit. 2021-8-19]. Dostupné z: <https://www.simcon.sk/en/company/about-simcon>
48. **Embarcadero SW.** *Powerful Transportation Software Simulation Tool Is Delphi Made*, 2021 [online]. [cit. 2021-8-19]. Dostupné z: <https://blogs.embarcadero.com/powerful-transportation-software-simulation-tool-is-delphi-made/>

49. **ADAMKO, Norbert a Valent KLIMA.** Optimisation of railway terminal design and operations using Villon generic simulation model. *TRANSPORT* [online]. 2008, 23(4), 335-340 [cit. 2021-8-19]. ISSN 1648-4142. Dostupné z: doi:10.3846/1648-4142.2008.23.335-340
50. **JÁNOŠÍKOVÁ, Ľudmila, Antonín KAVIČKA a Michael BAŽANT.** *Optimal operation scheduling and platform track assignment in a passenger railway station.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit [online]. 2014, 228(3), 271-284 [cit. 2021-8-19]. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1177/0954409712472275
51. **The Anylogic Company.** *Anylogic: Rail simulation software.* 2021 [online]. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/rail-logistics/>. [cit. 2021-8-19].
52. **MOKSHIN, Vladimir, Alexander KIRPICHNIKOV a Alex SOIKO.** Simulation and optimization of the cargo terminal in the AnyLogic environment. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, 1368 [cit. 2021-8-19]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1368/4/042082
53. **MURAVEV, Dmitri, Hao HU, Aleksandr RAKHMANGULOV a Pavel MISHKUROV.** *Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port.* International Journal of Information Management [online]. 2021, 57 [cit. 2021-8-19]. ISSN 02684012. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133
54. **LI, Jin, Yedi YANG a Qunxin ZHAO.** *Study on Passenger Flow Simulation in Urban Subway Station Based on Anylogic.* *Journal of Software* [online]. 2014, 9(1), 140-146 [cit. 2021-8-19]. ISSN 1796-217X. Dostupné z: doi:10.4304/jsw.9.1.140-146
55. **MACOMI.** *Railway Simulation Software RailGenie.* 2021[online]. [cit. 2021-8-19]. Dostupné z: <https://macomi.nl/railway-simulation/>.
56. **REMIJN, Ivan.** *At the Crossroads: Design for Railway Freight Capacity Decision-Making.* 2020 [online]. [cit. 2021-8-19]. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad6558e54-098f-48be-9951-9c4ea1969350>. Disertační práce. Delft University of Technology. Vedoucí práce M.E. Warnier.
57. **NASH, Andrew B.** *OpenTrack - Simulation of Railway Networks, version 1.10.* Zürich (Švýcarsko): OpenTrack Railway Technology Ltd., ETH Zurich Institute for Transport Planning and Systems, 2020.

58. **ETH Zürich.** *OpenTrack Railway Technology* [online]. Dostupné z:
http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html [cit. 2021-8-22].
59. **CHEN, Zhen a Bao Ming HAN.** *Simulation Study Based on OpenTrack on Carrying Capacity in District of Beijing-Shanghai High-Speed Railway.* *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, 505-506, 567-570 [cit. 2021-8-22]. ISSN 1662-7482.
 Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.505-506.567
60. **LJUBAJ, Ivica, Tomislav Josip MLINARIĆ, Tomislav LEŽAIĆ a Martin STARČEVIĆ.** The Possibility of Capacity Increase on the Modernised and Electrified Railway Line R201 along the Zaprešić – Zabok Section. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, 235 [cit. 2021-8-22]. ISSN 2261-236X. Dostupné z:
 doi:10.1051/mateconf/201823500009
61. **LJUBAJ, Ivica, Tomislav Josip MLINARIĆ a Dino RADONJIĆ.** *Proposed Solutions for Increasing the Capacity of the Mediterranean Corridor on Section Zagreb - Rijeka.* *Procedia Engineering* [online]. 2017, 192, 545-550 [cit. 2021-8-22]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.06.094
62. **CUI, Yong, Ullrich MARTIN a Jiajian LIANG.** *PULSim: User-Based Adaptable Simulation Tool for Railway Planning and Operations.* *Journal of Advanced Transportation* [online]. 2018, 2018, 1-11 [cit. 2021-8-22]. ISSN 0197-6729.
 Dostupné z: doi:10.1155/2018/7284815
63. **GOVERDE, Rob.** *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis* [online]. Delft (Nizozemsko), 2005 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z:
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aa40ae4f1-1732-4bf3-bbf5-fdb8dfd635e7>. Disertační práce. Technische Universiteit Delft. Vedoucí práce I.A. Hansen.
64. **THOMAS, Peter.** *Frankfurter allgemeine: Die Dirigenten des Fahrplans.* *Frankfurter allgemeine*, 2010 [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z:
<https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/deutsche-bahn-die-dirigenten-des-fahrplans-1626948.html>.

65. **ZHONG, Mingxuan, Yixiang YUE a Deyi LI.** *Analyzing and Evaluating Infrastructure Capacity of Railway Passenger Station by Mesoscopic Simulation Method.* 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-5 [cit. 2021-8-22]. ISBN 978-1-5386-7528-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICIRT.2018.8641593
66. **INCONTROLSIM.** *Incontrol Simulation Software*, 2021 [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: <https://www.incontrolsim.com/application-areas/public-transport-hubs/>.
67. **ŠRÁMEK, Přemysl.** *Vliv periodického jízdního řádu na kapacitu trati* [online]. Pardubice, 2017 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/69284/SramekP_VlivPeriodicky_TM_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertační práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Tatiana Molková.
68. **ŠRÁMEK, Přemysl, Jaromír ŠIROKÝ a Pavlína HLAVSOVÁ.** *The periodic timetable influence on line capacity.* 2018 [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/72342/ICTTE_Belgrade_2018_Sramek_Siroky_Hlavsova.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
69. **Berkeley Simulation Software.** *BerkeleySimulation.com.* 2021 [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: <https://berkeleysimulation.com/rtc.php>.
70. **RWTH Aachen.** *At RWTH Aachen University* [online]. Aachen (Německo);, 2021 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: <http://www.via.rwth-aachen.de/english/research.php?x=15>
71. **HANSEN, Ingo A.** *Railway Network Timetabling and Dynamic Traffic Management.* (ICRARE-2009) Iran university of science and Technology Tehran I.R. Iran [online]. Iran university of science and Technology, 2009, s. 11 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5d61290d-a5a4-49fd-8b9b-c3a4e1a842d0/datastream/OBJ/ndards/ndards/iso_9000_iso_14000.htm
72. **DIVIŠ, Roman a Antonín KAVIČKA.** *Design and development of a mesoscopic simulator specialized in investigating capacities of railway nodes.* Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium, 2015 [online]. ISSN 978-88-97999-57-7. Dostupné z: http://www.msc-les.org/proceedings/emss/2015/EMSS2015_52.pdf. [cit. 2021-8-22].

73. **BULÍČEK, Josef a Vlastislav MOJŽÍŠ.** *Capacity of railway lines in context of present and future situation.* Scientific papers of the University of Pardubice. Series B, Jan Perner Transport Faculty. [online]. 2008, 14, 172-192 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/66966>
74. **MOJŽÍŠ, Vlastislav Mojžíš, Tatiana MOLKOVÁ a Josef BULÍČEK.** *Innovative approach to determining railway line capacity.* 5th International Scientific Conference „Theoretical and Practical Issues in Transport“ [online]. Pardubice, 2010, [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/47693240_Innovative_approach_to_determining_railway_line_capacity
75. **International Union of Railway.** *UIC CODE 406.* 2. Paris (Francie):, 2013.
76. **KRÝŽE, Pavel.** *Nová metodika zjišťování kapacity dráhy.* Vědeckotechnický sborník Správy železnic, státní organizace č. 3/2020 [online]. Praha: Správa železnic, státní organizace, 2020, s. 112-130 [cit. 2021-8-22]. ISSN 2694-9172. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/117048102/VTS+Spr%C3%A1vy+%C5%BEeleznic+3-2020.pdf/c23181d5-bb63-466c-93ad-009205f44933>
77. **Správa železniční dopravní cesty, státní organizace.** *Směrnice SŽDC č. 104. Provozní intervaly a následná mezidobí.* Praha. 2013.
78. **POURYOUSEF, Hamed a Pasi LAUTALA.** Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules. *Journal of Rail Transport Planning & Management* [online]. 2015, 5(4), 211-224 [cit. 2021-8-22]. ISSN 22109706. Dostupné z: doi:10.1016/j.jrtpm.2015.10.001
79. **ROTOLI, Francesco, Elena NAVAJAS a Antonio SORIA.** *Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the EU context.* JRC Technical Report, 2016 [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: doi:10.2791/037759.
80. **CERRETO, Fabrizio.** *Micro-simulation based analysis of railway lines robustness* [online]. [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308919612_Micro-simulation_based_analysis_of_railway_lines_robustness/link/57f7ab5108ae8da3ce590ca7/download

81. **RANJBAR, Vahid, Nils OLSSON a Hans SIPILÄ.** *Impact of signalling system on capacity – Comparing legacy ATC, ETCS level 2 and ETCS hybrid level 3 systems.* Journal of Rail Transport Planning & Management [online]. 2022, 23 [cit. 2023-04-06]. ISSN 22109706. Dostupné z: doi:10.1016/j.jrtpm.2022.100322
82. **DINGLER, Mark H.** *The impact of operational strategies and new technologies on railroad capacity* [online]. Urbana, Illinois, 2010 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/18362/Dingler_Mark.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertační práce. University of Illinois at Urbana-Champaign. Vedoucí práce Christopher P.L. Barkan.
83. **NING, Bin.** *Advanced Train Control Systems* [online]. WIT Press, 2010, 2010-06-29, s. 113-122 [cit. 2021-8-22]. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. ISBN 978-1-84564-494-9. Dostupné z: <https://www.witpress.com/books/978-1-84564-494-9>
84. **BARTER, Wiliam.** *ERTMS Level 2: effect on capacity compared with “best practice” conventional signalling.* [Online]. [cit. 2022-08-14]. 2008, s. 213-222. Dostupné z: <https://doi.org/10.2495/CR080221>.
85. **LANDEX, Alex a Lars Wittrup JENSE.** *Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System.* Conference: RailNorrköping 2019, 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA) [online]. Norrköping (Švédsko): ICROMA, 2019 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/334836397_Infrastructure_Capacity_in_the_ERTMS_Signaling_System/link/5d42f6d892851cd04699a7c7/download
86. **COVIELLO, Nicola.** *The influence of ETCS and traffic composition on daily capacity of single track lines.* [online]. Torino, 2013 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.491066.1550157236!/X13_019_report.pdf. Disertační práce. Politecnico di Torino. Vedoucí práce Bruno Dalla Chiara.
87. **BREJCHA, Radim.** *Modelové řešení dopravní infrastruktury v závislosti na rozsahu dopravního provozu* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/42161/BrejchaR_ModeloveReseni_VM_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertační práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Vlastislav Mojžíš.

88. **NOVOTNÝ, Radek.** *Metodika budování škálovatelných simulačních modelů železničních systémů* [online]. Pardubice, 2020 [cit. 2021-08-22]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/76vw5m/>. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce prof. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.
89. **KAVIČKA, Antonín., Roman DIVIŠ a Petr VESELÝ.** *Railway station capacity assessment utilizing simulation-based techniques and the UIC406 method.* Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020) [online]. CAL-TEK srl, 2020, 2020, s. 41-49 [cit. 2021-8-22]. ISBN 9788885741447. Dostupné z: doi:10.46354/i3m.2020.emss.007
90. **MICHL, Zdeněk a Martin SOJKA.** *Microsimulation as a tool for evaluation of infrastructure and operational concept alternatives in a complex railway node.* Logistika - nauka [online]. Czech Technical University in Prague, 2014, (4), 3029-3037 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/OpenTrack.Logistyka.Michl_Sojka.2014.pdf
91. **ADAMKO, Norbert, Valent KLIMA a Peter MARTON.** Designing railway terminals using simulation techniques. *International Journal of Civil Engineering* [online]. 2010, 8(1), 56-67 [cit. 2021-8-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/292687204_Designing_railway_terminals_using_simulation_techniques
92. **DEDÍK, Milan, Vladimíra ŠTEFANCOVÁ, Jozef GAŠPARÍK, Vladimír EUPTÁK a Martin VOJTEK.** *Traffic Capacity Assessment of the Selected Track Section on the Slovak Railways Network after the Implementation of ETCS L3 Based on Signaling Principle.* Applied Sciences [online]. 2022, 12(11) [cit. 2023-04-07]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12115597
93. **BAŽANT, Michael, Josef BULÍČEK a Seyed Ali GHAHARI.** *Impact Assessment of Interlocking Systems on Single-Track Railway Lines as a Measure Leading to Resilient Railway System.* Journal of Advanced Transportation [online]. 2022, 2022, 1-18 [cit. 2023-04-05]. ISSN 2042-3195. Dostupné z: doi:10.1155/2022/7025130
94. **POURYOUSEF, Hamed, Pasi LAUTALA a Thomas WHITE.** *Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe.* Journal of Modern Transportation [online]. 2015, 23(1), 30-42 [cit. 2021-8-22]. ISSN 2095-087X. Dostupné z: doi:10.1007/s40534-015-0069-z

95. **BULÍČEK, Josef.** *Systémová analýza: studijní opora.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 9788073956301.
96. **ČERNÁ, Anna a Jan ČERNÝ.** *Manažerské rozhodování o dopravních systémech.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-849-7.
97. **BULÍČEK, Josef.** *Transport modelling: studijní opora na CD. Ed. 1st.* Pardubice: University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, 2014. ISBN 978-80-7395-792-6.
98. **TUTUBALIN, Valerii Nikolaevich.** *Teorie pravděpodobnosti.* Praha Moskva. Státní nakladatelství technické literatury Mir, 1978
99. **ZVÁRA, Karel.** *Regresní analýza.* Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0125-5.
100. **Správa železnic, státní organizace.** *SŽ Z8 díl IV (prozatímní) Evropský vlakový zabezpečovač ETCS.* Praha, 2019.
101. **Správa železnic, státní organizace.** *SŽ TSI CCS/MP1: Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače.* Praha, 2022.
102. **European Railway Agency.** *System Requirements Specification: SUBSET-026-1, version 3.6.0.,* 2016. [cit. 2023-8-20]. Dostupné také z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/archived-set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1>.
103. **Správa železnic, státní organizace.** *SŽ TSI CCS/MP3: Technické požadavky a zásady pro projektování traťové části ETCS STOP,* 2022.
104. **European Railway Agency.** *System Requirements Specification: SUBSET-026-3, version 3.6.0.,* 2016. [cit. 2023-8-20]. Dostupné také z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/archived-set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1>.
105. **European Railway Agency.** *System Requirements Specification: SUBSET-041, version 3.2.0.,* 2015. [cit. 2023-8-20]. Dostupné také z: <https://www.era.europa.eu/era-folder/archived-set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1>.
106. **Správa železnic, státní organizace.** *SŽ SM069: Směrnice pro tvorbu jízdního řádu a přidělování a využívání kapacity dráhy,* 2021.
107. **Správa železnic, státní organizace.** *Předpis SŽDC S3: Železniční svršek,* 2021.
108. **Správa železnic, státní organizace.** *SŽ D1 ČÁST PRVNÍ: Dopravní a návěstní předpis pro tratě nevybavené evropským vlakovým zabezpečovačem.,* 2024.
109. **Správa železnic, státní organizace.** *Staniční řád železniční stanice: Adamov a odbočky Svitava,* 2024.

110. **Správa železnic, státní organizace.** *Staniční řád železniční stanice: Blansko*, 2024.
111. **Správa železnic, státní organizace.** *Staniční řád železniční stanice: Rájec-Jestřebí*, 2024.
112. **WANG, Yihui, Bart DE SCHUTTER, Ton VAN DEN BOOM a Bin NING.**
Optimal trajectory planning for trains – A pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2013, **29**, 97-114 [cit. 2023-12-25]. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2013.01.007
113. **DONG, Hairong, Bin NING, Baigen CAI a Zhongsheng HOU.** *Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways*. IEEE Circuits and Systems Magazine [online]. 2010, 10(2), 6-18 [cit. 2023-12-25]. ISSN 1531-636X. Dostupné z: doi:10.1109/MCAS.2010.936782
114. **GAO, Shigen, Hairong DONG, Yao CHEN, Bin NING a Guanrong CHEN.**
Approximation-Based Robust Adaptive Automatic Train Control: An Approach for Actuator Saturation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems [Online]. 2013, roč. 14, č. 4, s. 1733-1742. [cit. 2023-12-25]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2266255>.
115. **ALBRECHT, Thomas a Anne BINDER a Christian GASSEL.** *Applications of real-time speed control in rail-bound public transportation systems*. IET Intelligent Transport Systems [Online]. 2013, roč. 7, č. 3, s. 305-314. [cit. 2023-12-25]. ISSN 1751-956X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2011.0187>.
116. **GOVERDE, Rob , Nikola BEŠINOVIĆ, Anne BINDER, Valentina CACCHIANI a Egidio QUAGLIETTA.** A three-level framework for performance-based railway timetabling. Online. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, roč. 67, s. 62-83. [cit. 2023-12-25]. ISSN 0968090X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.004>.
117. **NAKAMURA, Hideo.** *How to Deal with Revolutions in Train Control Systems*. Engineering [online]. 2016, 2(3), 380-386 [cit. 2023-04-06]. ISSN 20958099. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENG.2016.03.015
118. **KUMAR, Kaushal.** HS - Automatic Train Control: Concept of System [online]. Signal & Telecommunication / UTHS / RDSO/KK, 2012 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://rdso.indianrailways.gov.in/works/uploads/File/High%20Speed%20%20Signalling%20Concept%20System.pdf>. Report. Urban transport & High speed directorate Research Designs & Standards Organisation.

VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ VĚDECKO VÝZKUMNÁ ČINNOST DOKTORANDA

Publikační činnost doktoranda související s tématem disertační práce

J_{imp} – článek v recenzovaném odborném periodiku (databáze Web of Science)

1. **NACHTIGALL, Petr, Jaromír ŠIROKÝ a Erik TISCHER.** *Assessing the efficiency of increasing the track speed in the line section Rokycany – Plzeň hl. n.* Sustainability. 2020. roč. 18, č. 12, s. 1-13. ISSN: 2071-1050.
2. **ŠIROKÝ, Jaromír, Petr NACHTIGALL, Erik TISCHER a Josef GAŠPARÍK.** *Simulation of Railway Lines with a Simplified Interlocking System.* Sustainability. 2021. roč. 13, č. 3, s. nestránkováno. ISSN: 2071-1050.
3. **NACHTIGALL, Petr, Jaromír ŠIROKÝ, Josef BULÍČEK a Erik TISCHER.** *Improving single-track railway line capacity using extended station switch point area.* Journal of Rail Transport Planning & Management. Vol. 24. 2022. doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100354.

J_{sc} – článek v recenzovaném odborném periodiku (databáze Scopus)

4. **NACHTIGALL, Petr, Jaromír ŠIROKÝ a Erik TISCHER.** *The use of simulation modelling for determining the capacity of railway lines in the Czech conditions.* Open Engineering. 2020. Vol. 10, no. 1, s. 224-231. ISSN: 2391-5439.

J_{ost} – článek v recenzovaném odborném periodiku (ostatní)

5. **NACHTIGALL, Petr a Erik TISCHER.** *Možnosti zavedení automatického provozu pražského metra B.* Vědeckotechnický sborník ČD. 2017, roč. 44, č. prosinec, s. 1-16. ISSN: 1214-9047.
6. **ŠIROKÝ, Jaromír, Přemysl ŠRÁMEK, Katarína MAGDECHOVÁ, Erik TISCHER a Pavlína ŠIROKÁ.** *Capacity range calculation.* Perner's Contacts. 2019. Vol. XIX, no. 4, s. 44-56. ISSN: 1801-674X.

D – stať ve sborníku

7. **ŠIROKÝ, Jaromír, Petr NACHTIGALL, Erik TISCHER a Katarína MAGDECHOVÁ.** *Possibilities of Introduction of Automated Operation on the Prague Metro.* Transport Means: proceedings of the international scientific conference. Kaunas: Kaunas University of Technology. 2018, s. 356-365. ISSN 1822-296X.s. (sborník – Scopus)

8. **ŠIROKÝ, Jaromír, Přemysl ŠRÁMEK, Katarína MAGDECHOVÁ, Erik TISCHER a Pavlína ŠIROKÁ.** *Timetable performance evaluation. In Transport Means : proceedings of the international scientific conference.* Kaunas: Kaunas University of Technology. 2019. s. 1427-1432 s. (sborník – Scopus)
9. **NACHTIGALL, Petr a Erik TISCHER.** *Efficiency of Increasing of the Track Speed Using Simulation in Opentrack.* Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation 109 Symposium (EMSS 2020). Rende: CAL-TEK SRL. 2020. s. 130-136. ISBN 978-1-71382-056-7. ISSN 2724-0029. (sborník – Scopus)
10. **NACHTIGALL, Petr, David ŠOUREK a Erik TISCHER.** *Level of Detail of the Simulation Model and its Influence on the Result Accuracy.* International scientific conference HORIZONS OF RAILWAY TRANSPORT 2020. 2021. roč. 53, č. March, s. 91-97. (sborník – Web of Science)
11. **NACHTIGALL, Petr a Erik TISCHER.** *Calculation of the minimal lenght of the high-speed line.* Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2021. roč. 31, č. July, s. 30-35. (sborník – Scopus)
12. **NACHTIGALL, Petr a Erik TISCHER.** *ETCS as a tool to increase the capacity of railway line – simulation assesment.* CLC 2022 - Carpathian Logistics Congress : Conference Proceedings. Ostrava: TANGER, spol. s r.o., 2022. s. 220–227 s. ISBN 978-80-88365-08-2. (sborník – Scopus)
13. **NACHTIGALL, Petr a Erik TISCHER.** *Simulation assessment of the headway under the ETCS L3.* Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2023. roč. 43, č. November, s. 81-85. (sborník – Scopus)
14. **ŠIROKÝ, Jaromír; NACHTIGALL, Petr; TISCHER, Erik; SCHEJBAL, Karel a MICHÁLEK, Tomáš.** *The Modelling of Traction Energy Consumption of a Container Train.* Transportation Research Procedia. 2024, roč. 77, s. 76-84. ISSN 23521465. (sborník – Scopus)

V letech 2019-2022 zapojení do vědeckého týmu v rámci projektu **Spolupráce Univerzity Pardubice a aplikační sféry v aplikačně orientovaném výzkumu lokačních, detekčních a simulačních systémů pro dopravní a přepravní procesy (PosiTrans)**, reg. č.: **CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008394.**

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Základní principy technologie ATO	1
Příloha B: Očekávaný budoucí vývoj systémů ATC	8
Příloha C: Provozně funkční vlastnosti ETCS a CBTC	14
Příloha D: Rozdělené grafy simulace brzdných křivek.....	17
Příloha E: Simulace kombinované části - nákresný jízdní řád.....	(na CD)
Příloha F: Vygenerovaná vstupní zpoždění.....	19
Příloha G: Přehled výsledků pro všechny skupiny - simulace staničních zhlaví.....	20
Příloha H: Simulace kombinované části - splněné jízdní řády.....	(na CD)
Příloha I: Model trati Odb. Svitava - Rájec-Jestřebí	(na CD)
Příloha J: Dráhové tachografy Odb. Svitava - Rájec-Jestře	(na CD)

PŘÍLOHA A: ZÁKLADNÍ PRINCIPY TECHNOLOGIE ATO

Podrobná analýza fungování systému ATO je uvedena v této příloze, protože simulace systémů ATO je již nad rámec zpracování této disertační práce. Je však jedním z možných dalších směrů navazujícího výzkumu v této oblasti. Vliv prostředků ATO lze zkoumat obdobně jako vliv prostředků ATP. Vždy však záleží na konkrétních provozních podmínkách a typu nasazeného systému ATO. Funkční úrovně systému ATO jsou popsány v následujících podkapitolách.

Plánování a operativní řízení provozu

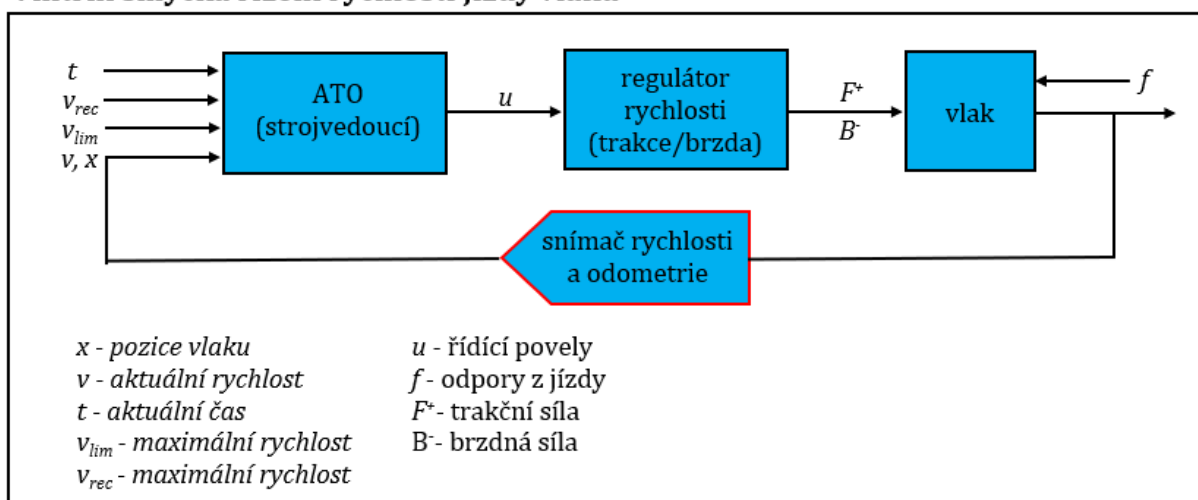
Pro správnou funkci systémů je nutné nejdříve správně analyzovat a naplánovat všechny fáze přípravy a plánování provozu: sestava jízdního řádu, sestavení obrátů kolejových vozidel, sestavení turnusů obslužného personálu atd. V tomto případě se jedná o řízení na makroskopické úrovni. V běžném provozu však prakticky dochází k tomu, že jsou tyto naplánované procesy často narušeny různými typy mimořádností a poruch, které mohou způsobit nesplnitelnost původního plánu. Tyto situace je nutné řešit na úrovni operativního řízení provozu. Jednou ze základních podmínek úspěšného řízení provozu na operativní úrovni je kvalitní aplikační a technologická podpora. Pro definované situace je možné využít i automatizované algoritmy řešení. Ostatní provozní situace řeší přímo dispečeri operativního řízení provozu (111).

Přímé řízení jízdy vlaku

Samotné řízení jízdy vlaku je založeno na principu tzv. vnitřní regulační smyčky vlaku. Tato smyčka je navržena s ohledem na bezpečnou ale zároveň efektivní jízdu vlaku. Z tohoto pohledu se jedná o řízení na mikroskopické úrovni. Přímé ovládání jízdy vlaku se děje zadáváním základních povelů pro řízení jízdy vlaku, které jsou: zrychlování, jízda, posun a brzdění. Vnitřní regulační smyčka je vymezena vstupními parametry vnější regulační smyčky (traťovou a vozidlovou částí zabezpečovacího zařízení, včetně zařízení ATO). Strojvedoucí nebo zařízení pro automatizované řízení jízdy vlaku je z tohoto pohledu tzv. vykonavatelem příkazů dispečerské úrovně řízení. Podmínkou pro přesné řízení jízdy vlaku je znalost informací o jízdě v reálném čase, např. aktuální rychlost vlaku, vzdálenost konce oprávnění k jízdě, vzdálenost do příští zastávky, dynamika vlaku a komplexní infrastrukturní parametry. Doplňkovými parametry jsou pak například plynulost jízdy, přesnost jízdy a hospodárnost provozu (111).

Řízení rychlosti vlaku je jednou z nejdůležitějších funkcí pro provoz vlaku. Jejím hlavním cílem je zabezpečit bezpečnost a včasnost jízdy vlaku a plnění jízdního řádu. Pro různé typy systémů existují různé strategie řízení jízdy vlaku, které se snaží optimalizovat požadované výstupní charakteristiky. Pro každý typ vlaku existuje optimální strategie jízdy. Je dokázáno, že optimální strategií lze docílit snížení spotřeby energie až o 15 %. Obvykle je generováno více rychlostních profilů, ale vytvoření rozhodovacího algoritmu pro aktuálně optimální profil je stále předmětem vědeckého výzkumu v tomto oboru. Schématické znázornění vnitřní smyčky kontroly rychlosti vlaku je uvedeno na obrázku A1 (111).

Vnitřní smyčka řízení rychlosti jízdy vlaku



Obrázek A1 Schéma vnitřní smyčky kontroly jízdy vlaku

Zdroj: (111) s úpravou autora

Pro důkladnější popis a sestavení odpovídajícího modelu vnitřní smyčky kontroly jízdy vlaku, je nutné problematiku řízení jízdy vlaku rozdělit na tři části: modelování jízdy vlaku, optimalizaci rychlostního profilu vlaku a efektivní řízení metod pro sledování rychlosti vlaku (27).

Simulační modelování jízdy vlaku může probíhat pomocí jednobodového nebo vícebodového modelu. U jednobodových modelů je celý vlak vztažen k jednomu hmotnému bodu. Jízdu vlaku lze v takové případě jednoduše vyjádřit pohybovou rovnicí dle vzorce [A1].

$$F = M_v \cdot (1 + \rho_d) \cdot a + O_j + O_t \quad [A1]$$

kde:

M... dopravní hmotnost vlaku [kg]

ρ_d ... součinitel rotačních hmot [-]

a... zrychlení [m·s⁻²]

O_j ... jízdní odpory [N]

O_t ...traťové odpory [N]

Zdroj: (111) s úpravou autora

Pro popis aerodynamického odporu a odporový součinitel rotujících částí se k vyjádření síly používá – *Davis formula*, které je uvedena ve vzorci [A2]:

$$W(v) = M(c_0 + c_1v + c_2v^2) \quad [A2]$$

kde:

M ... hmotnost vlaku [kg]

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

c_i ... koeficienty odporu [N]

$w(v)$... vozidlové odpory [N]

Zdroj: (112) s úpravou autora

Takto matematicky vyjádřený model jízdy vlaku je aplikovatelný v modelech ATO pro městské železniční tranzitní systémy, kde jsou jízdní odpory mnohem menší než tažná a brzdná síla. Tento zjednodušený model vykazuje značnou míru nepřesnosti pro dlouhé a těžké vlaky složené z mnoha vozidel. Řešením je využití nelineárního modelu, který zahrnuje i další vlastnosti vlaku, Příklad formulace je uveden ve vzorci [A3]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = F_1 - B_1 - k\Delta x_{1,2} - m_1(c_0 + c_1x_1 + c_2x_1^2) + R_1^a(X) \\ m_i \ddot{x}_i = F_i + B_i - k(\Delta x_{i,i+1} - \Delta x_{i-j,i}) - m_i(c_0 + c_1x_i + c_2x_i^2) + R_i^a(X), i = 2, \dots, n-1 \\ m_n \ddot{x}_n = F_n - B_n + k\Delta x_{n-1,n} - m_n(c_0 + c_1x_n + c_2x_n^2) + R_n^a(X) \end{cases} \quad [A3]$$

kde:

m_i ... hmotnost vlaku [kg]

x_i ... pozice vozidla

F_i ... trakční síla [N]

B_i ... brzdná síla [N]

$i + 1 \cdot m_i(c_0 + c_1x_i + c_2x_i^2)$... koeficient aerodynamického odporu a odporu rotujících částí

$R_i^a(x)$ ostatní vozidlové odpory

Zdroj: (111) s úpravou autora

Optimalizace rychlostního profilu vlaku

Rychlostní profil je spolu s prostředky přímého řízení vlaku základní částí systému ATO. Pomocí optimální trajektorie je dosahováno cílů automatizace, účinnosti a hospodárnosti provozu vlaků. Jedním z ukazatelů je spotřeba energie pro jízdu i do stanice $i + 1$ (vzorec [A4]).

$$E = \int_0^T [F(t) \cdot v(t)] dt \quad [A4]$$

kde:

E ... spotřebovaná energie [J]

T ... přípustný čas [s]

F_t ... trakční síla [N]

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

Zdroj: (111) s úpravou autora

Pokud je jízdní komfort cestujících vyjádřen jako funkce změny stavové veličiny F (tj. trhnutí při střídání zrychlení a zpomalení), je možné ji vyjádřit vztahem daným ve vzorci [A5].

$$E = \int_0^T [F(t) \cdot v(t)] dt \quad [A5]$$

kde:

E ... spotřebovaná energie [J]

T ... přípustný čas [s]

F_t ... trakční síla [N]

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

Zdroj: (111) s úpravou autora

Kromě toho lze jízdní komfort cestujících považovat za funkci změny řídicí veličiny F , tj. celkového trhnutí, které je dáno vztahem [A6].

$$R = \int_0^T \frac{1}{M} \left| \frac{dF(t)}{dt} \right| dt \quad [\text{A6}]$$

kde:

R ... jízdní komfort [-]

T ... přípustný čas [s]

F_t ... trakční síla [N]

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

M ... hmotnost vlaku [kg]

Zdroj: (111) s úpravou autora

Na základě různých matematických formulací vznikla řada modelů, které umožňují optimalizaci rychlostního profilu, lze stanovit jejich základní rozdělení do tří kategorií: analytické algoritmy, numerické algoritmy a evoluční algoritmy.

Řízení rychlosti jízdy vlaku a jeho možné aplikace v reálných dopravních systémech

Jakmile je vygenerován doporučený (optimalizovaný) rychlostní profil, je dalším krokem navádění (řízení) rychlosti jízdy vlaku podle tohoto profilu bezpečně a plynule. V případě řízení na stupních automatizace GoA0 a GoA1, je jízda vlaku řízena strojvedoucím. U takových systémů je hlavním nástrojem dodržování optimalizovaného rychlostního profilu informační systém strojvedoucího, který strojvedoucího navádí na tento profil (opticky a akusticky). Na tratích a vozidlech vybavené vyšší úrovní automatizace GoA2, GoA3 a GoA4, je řízení rychlosti jízdy vlaku prováděno přímo systémem ATO (113, 114).

Nejpoužívanější metodou regulace rychlosti je proporcionálně integrální derivační regulátor, který průběžně vypočítává chyby mezi naměřenou a doporučenou rychlostí vlaku a upravuje rychlost vlaku tak, aby tato chyba byla co nejmenší. V poslední dekádě se však uplatňují i tzv. inteligentní metody řízení. Inteligentní metody řízení mohou být založeny například na metodě prediktivního fuzzy řízení. Tato metoda předpovídá výsledek každého možného řídicího povelu a vybírá nejlepší řídicí pravidlo na základě definovaných fuzzy množin výkonnosti. Další možností řízení rychlosti jízdy vlaku jsou například adaptivní metody řízení, které jsou lepší pro optimalizaci trajektorie vlaku v reálných podmínkách (111).

Systémy pracující s výše zmíněnými metodami řízení jsou reálně aplikované především v systémech městské hromadné dopravy. Systémy ATO zde bývají aplikovány zejména ve své zcela bezobslužné formě. Více než čtvrtina světových systémů metra má alespoň jednu linku automatického metra. Při dosahování vyšších traťových rychlostí je však zapotřebí systémy vyvinuté pro prostředky městské hromadné dopravy adaptovat na jiné provozní podmínky. Na konvenční železniční síti a na sítích vysokorychlostních tratí je naprostá většina vlaků stále

řízena strojvedoucím. Na rozdíl od uzavřených systémů městské dopravy je zde automatizace v oblastech řízení provozu a řízení jízdy vlaku mnohem komplexnějším problémem, protože je železniční síť relativně otevřeným systémem. Zároveň není pro tyto systémy zcela jasně definován provozní cíl. Pro provozování těchto systémů na mezinárodních železničních sítích není doposud vytvořen základ potřebné standardizace. Jedním z pokusů o standardizaci v této oblasti je projekt spolufinancovaný Evropskou unií, tzv. *Next Generation Train Control System* (NGTC).

Integrace řízení železniční dopravy a automatického provozu vlaků

Zcela reálným problémem provozování bezobslužného systému vlaků je koordinace, v běžné struktuře řízení oddělené, vrstvy řízení provozu a vrstvy přímého řízení jízdy vlaku. Optimálním způsobem řešení tohoto problému je centralizace řízení do jednoho centrálního pracoviště, které je vybaveno systémem pro vyhodnocení a řízení obou výše popsaných vrstev. Takový systém je možné označit jako integrovaný systém řízení. Tyto systémy jsou následně schopny sledovat stanovený provozní optimalizační cíl, např.: bezkonfliktní trajektorii vlaku, maximalizaci úspory energie, cestovní komfort, přesnost JŘ, maximalizaci propustné výkonosti.

Z provozního hlediska je nutné zajistit řízení trasy vlaku v bezkonfliktní poloze s jinými trasami, jakožto i tomu odpovídající trakční a brzdící síly vlaku a následné navedení vlaku do požadované polohy. Praktické řešení je práce s několika různými trajektoriemi, ze kterých je vždy vybrána ta, která vyhovuje dané provozní situaci. Vyhodnocení směrného optimalizačního cíle je vždy závislé na konkrétním provozovateli dráhy a dohody s dopravci. Jako výhodná metoda pro zpracování širšího spektra požadavků na funkční atributy systému se jeví modulární metoda. Tato metoda je složena z několika modulů, ke kterým patří např.: monitorování stavu provozu, modul řízení poruch, automatické navádění vlaku do cílové polohy a poradenský systém strojvedoucího (bude-li uplatněn obslužný provoz vlaku) (111).

Samotný model fungování musí být sestaven na základě formulovaných integrovaných matematických modelů, které v reálném čase zohledňují jízdní řád, kolejová vozidla (oběhy), turnusy posádky spolu s optimální trajektorií vlaku. Model zohledňující všechny tyto požadavky lze nazvat jako globální optimalizační modely. Výpočetní náročnost takového modelu však klade velké nároky na výpočetní výkon a kapacitní datovou komunikaci dotčených komponent systému. Důležitým aspektem při formulaci modelů je zohlednění provozních mimořádností, které významně narušují celé fungování systému. U zcela automatického provozu je to základní podmínka fungování. V tomto smyslu je klíčová analýza proběhlých

událostí a důkladné plánování postupů při mimořádnostech. Kromě mimořádností a mimořádných událostí se v provozu běžně vyskytují poruchy na sdělovacích a zabezpečovacích zařízeních. Tyto poruchy je také zapotřebí vzít v úvahu (111).

Role ATO v oblasti úspory trakční energie

Důležitým soudobým environmentálním ukazatelem je uhlíková výkonnost. Uhlíková výkonnost se vypočítává podle množství emisí skleníkových plynů, která přímo souvisí s celkovou spotřebou energie daného železničního systému. Hlavním zdrojem emisí je, z logiky věci, spotřebovaná trakční energie pro jízdu daných železničních vozidel. V konvenční praxi systémů ATO je optimalizace rychlostního profilu obvykle zaměřena na každý mezistaniční úsek zvlášť. Pro vyšší energetickou účinnost je však nanejvýš žádoucí plánovat a řídit vlaky v kooperativním režimu provozu. Takový typ provozu integruje energeticky účinný provoz vlaku se sestavou jízdního řádu pro ATO. Při vytváření takového modelu provozu je jedním z dobře využitelných nástrojů dvouúrovňový optimalizační model jízdy vlaku. První úroveň tohoto modelu určuje optimální jízdní řád (souhrn plánovaných jízdních dob v jednotlivých úsecích). V druhé úrovni jsou vyhledávány energeticky účinné rychlostní profily (množina suboptimálních řešení), které zohledňují požadovanou jízdní dobu. Variantně lze přidat i třetí úroveň, která zohledňuje i charakteristiku infrastruktury a vozidel na mikroskopické úrovni. Praktické výsledky případových studií ukazují, že účinnost implementace těchto modelů se projevuje snížením spotřeby trakční energie od 8,7 do 35,3 % oproti konvenčnímu způsobu provozování (115).

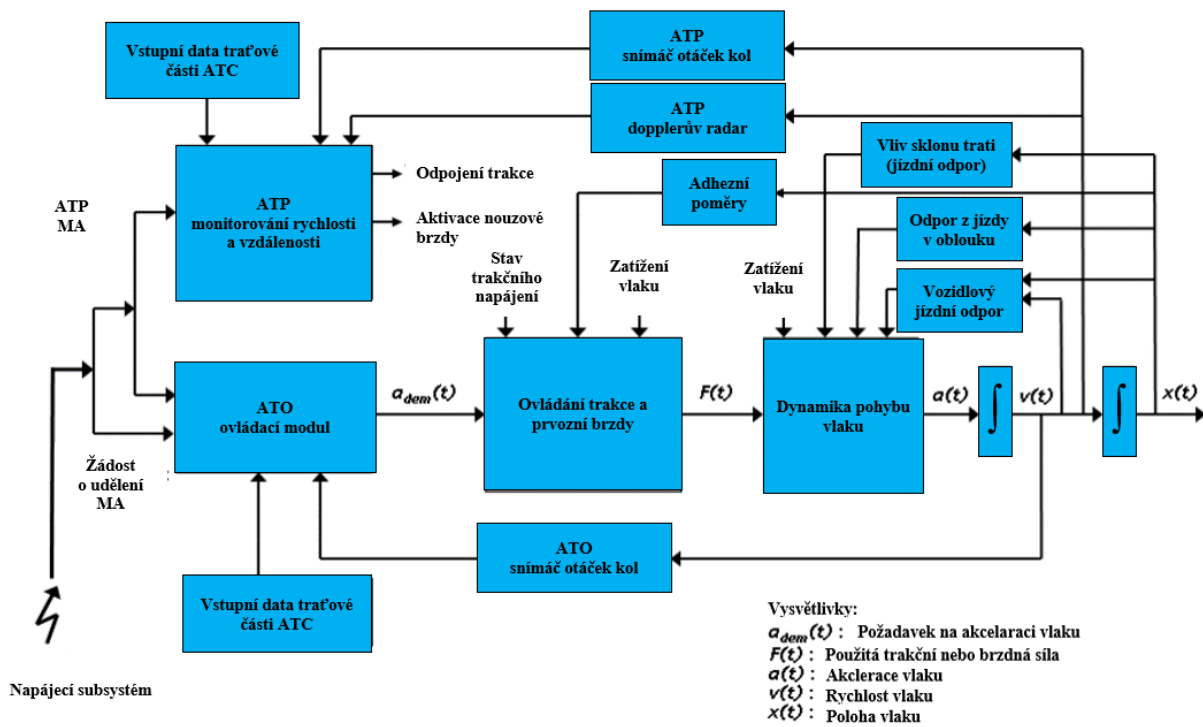
Výše uvedené modely ale stále nezohledňují další důležitý nástroj energetické optimalizace, kterým je rekuperace. Pro účinnou rekuperaci je nutné definovat energetický režim izolovaného železničního systému (případně části systému). V podstatě je možné aplikovat dva přístupy. Prvním, ale velmi nákladným řešením, je výstavba úložišť energie, nebo tzv. reversibilních rozvodů, které umožní efektivně řídit tok energie v systému. Druhým způsobem (hlavním), který je aplikovatelný bez potřeby výstavby dalších nákladných trakčních zařízení, je přístup, při kterém je generovaná (rekuperovaná) energie okamžitě spotřebována jiným vlakem, který se nachází ve stejném trakčním napájecím úseku. Optimalizace spotřeby trakční energie, při použití druhého způsobu rekuperace, je významnou výzvou v oblasti technologie provozu vlaků. Tímto tématem se zabývá výzkum kooperativního provozu vlaků. Optimalizované rychlostní profily jsou koordinovány tak, aby vždy byl k dispozici vlak, který rekuperovanou trakční energii spotřebovává (115).

PŘÍLOHA B: OČEKÁVANÝ BUDOUCÍ VÝVOJ SYSTÉMŮ ATC

Všechny subsystémy systému ATC dohromady, v závislosti na použité aplikační úrovni, umožňují zcela automatický provoz vlaků bez přítomnosti vlakového personálu. Z hlediska zkoumaného problému není účelné dále rozvádět funkce subsystému ATS, jelikož jeho význam nemá žádný vliv na simulaci, ani na určení vlivu automatizačních prostředků na kapacitu trati. Pro celkový přehled fakticky postačuje informace, že systém ATC se skládá ze subsystémů ATP, ATO a ATS, přičemž přímý vliv na samotnou jízdu vlaku mají pouze subsystémy ATP a ATO. Subsystém ATO může z hlediska jízdy vlaku zcela nahradit strojvedoucího, může také automaticky upravovat rychlost vlaku a plynule zastavovat ve všech určených bodech trati. Subsystémy ATO, v závislosti na jejich nastavení, mohou také zásadním způsobem ovlivnit spotřebu trakční energie a podle jízdního řádu navádět vlak do optimální časové a prostorové polohy. Systém ATP je však vždy nadřazen systému ATO a v závislosti na podobě aplikace systému je buďto integrován do komplexního systému vlakového zabezpečovače, nebo tvoří pouze jeho doplněk. Na základě informací zjištěných z traťové části systému, vypočítá ATO optimální rychlost jízdy podle skutečné rychlosti, maximální povolené rychlosti vlaku subsystémem ATP a podle údajů z jízdního řádu. Pokud povely k jízdě vydané subsystémem ATO odpovídají všem požadavkům stanovených subsystémem ATP, je prostřednictvím vozidlového modulu zadán povel řídicí jednotce vlaku. Systém ATO nepřetržitě odesílá do ATS data o své aktuální poloze na trati. Děje se tak prostřednictvím subsystému identifikace polohy vlaku – *train position identification* (TPI). Na základě skutečné polohy vlaku jsou následně upraveny parametry jízdy pro další úsek tak, aby se vlak co nejvíce blížil k optimální trase. Z hlediska ATO jsou důležitá taky data o následujícím stavu trati, která jsou získávána ze systému ATP (například postavení vlakových cest, volnost trati, rychlostní omezení atd.) (31).

Systémy ATO tedy umožňují automatické vedení vlaku. Jsou schopny automaticky zasahovat do jízdy vlaku tím, že dokážou vlak autonomně zpomalit a zrychlit a dále zastavovat podle daných dispozic. Samo o sobě se však nejedná o systémy zabezpečující jízdu vlaku a neplní bezpečnostně relevantní funkce tak jako je tomu u systémů ATP, které jsou zabezpečovacím zařízením. Systémy automatického vedení vlaku optimalizují hospodárnou jízdu vozidla. Podle údajů o aktuálním zpoždění systém vypočte ideální trajektorii. Do výpočtu je zahrnut rychlostní profil a aktuální stav trati před vlakem. Vlak je následně veden podle

vypočtené rychlostní křivky a na přesně vypočteném místě je aktivován režim výběhu, kterým jede až k místu zastavení. Před místem zastavení je aktivována funkce cílového brzdění, která vlak zastaví na definovaném místě. Systém ATO také zabezpečuje dodržení dovolené rychlosti podle stanového rychlostního profilu. Z hlediska automatizace jízdy vlaku je klíčová vazba mezi systémy ATP a ATO. Vzájemná vazba a princip řízení jízdy vlaku jsou popsány na diagramu uvedeném na obrázku B1.



Obrázek B1 Diagram principu řízení jízdy vlaku

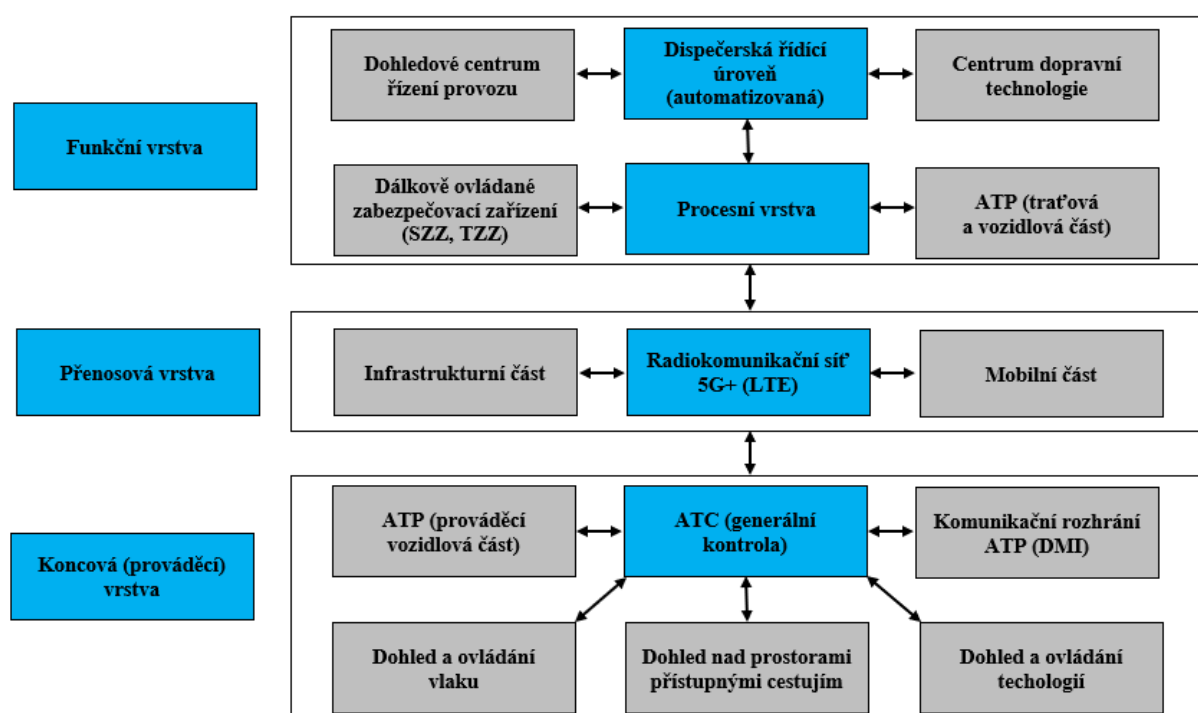
Zdroj: (116) s úpravou autora

Přestože systémy ETCS a CBTC nepochybně přispívají k celkovému zvýšení bezpečnosti na tratích, je nutné si uvědomit, že z hlediska kapacity nemusí mít kladný vliv na hodnocené ukazatele. Z hlediska výzkumu je proto klíčová znalost jejich funkcionalit a také způsob jejich chování v definovaných situacích. Tyto systémy také pracují na různých aplikačních úrovních, které jsou závislé na typu provozování dráhy, segregaci trati a dalších vnějších vlivech. V jednotlivých úrovních se samozřejmě bude lišit i jejich vliv na propustnost.

Očekávaný budoucí vývoj v oblasti systémů ATC

Z hlediska historie vývoje systémů ATC lze říct, že se systémy vyvíjely rozdílně, podle národních požadavků, ale přesto mají řadu společných principů. Tyto principy bylo možné využít při tvorbě jednotných zabezpečovacích systémů. Mezi hlavní zástupce těchto systémů je možné zařadit například: TVM 300, TVM 430, ATS-S, ATS-P, ATACS, LZB 80, BACC,

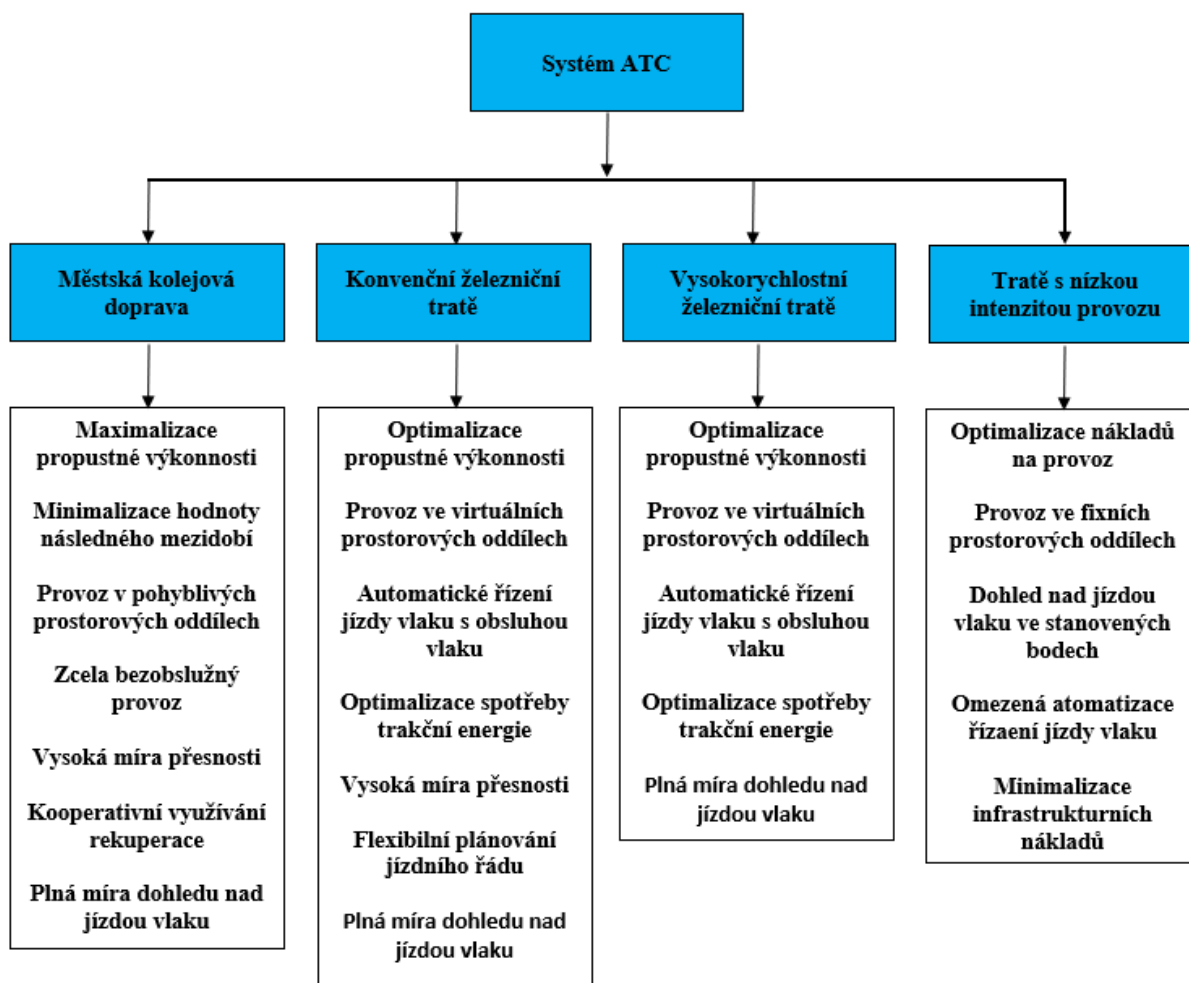
ASFA a CAT. Tyto systémy daly základ skupině systémů, které můžeme označit jako *Distance To Go* (DTG). Tyto systémy namísto pouhé kontroly dodržování okamžité rychlosti a reakce strojvedoucího kontrolují rychlost jízdy podle známé brzdě křivky k následujícímu bodu s omezením rychlosti, případně ke konci oprávnění k jízdě. V závislosti na typu systému se podstatně liší způsob, kterým se jízda vlaku kontroluje. Zároveň je odlišný i způsob přenosu dat mezi traťovou a mobilní částí. Na obrázku B2 je návrh architektury systémů ATC. Systém je sestaven v hierarchickém uspořádání. Skládá se z funkční vrstvy (procesoru), přenosové a koncové vrstvy. V návrhu optimální architektury systému ATC jsou logické závislosti ZZ agregovány v centrálním procesoru (ve funkční vrstvě) (116).



Obrázek B2 Návrh optimální struktury systému ATC

Zdroj: (116) s úpravou autora

Systémy pro automatickou kontrolu jízdy vlaku bude i v budoucnu výhodné koncipovat tak, aby jejich jednotlivé verze byly diverzifikovány podle způsobu určení s tím, že bude možná zpětná i vzájemná kompatibilita. Na základě předchozí analýzy bylo autorem vyhodnoceno, že bude zapotřebí paralelně provozovat 4 typy systému (rozděleno dle zaměření) – budou to systémy pro městskou kolejovou dopravu, konvenční železniční tratě, vysokorychlostní železniční tratě a tratě s nízkým využitím (117). Schéma rozdělení systémů a hlavní požadavky na tyto systémy jsou uvedeny na obrázku B3.



Obrázek B3 Rozdělení systémů ATC dle funkčního zaměření

Zdroj: (117) s úpravou autora

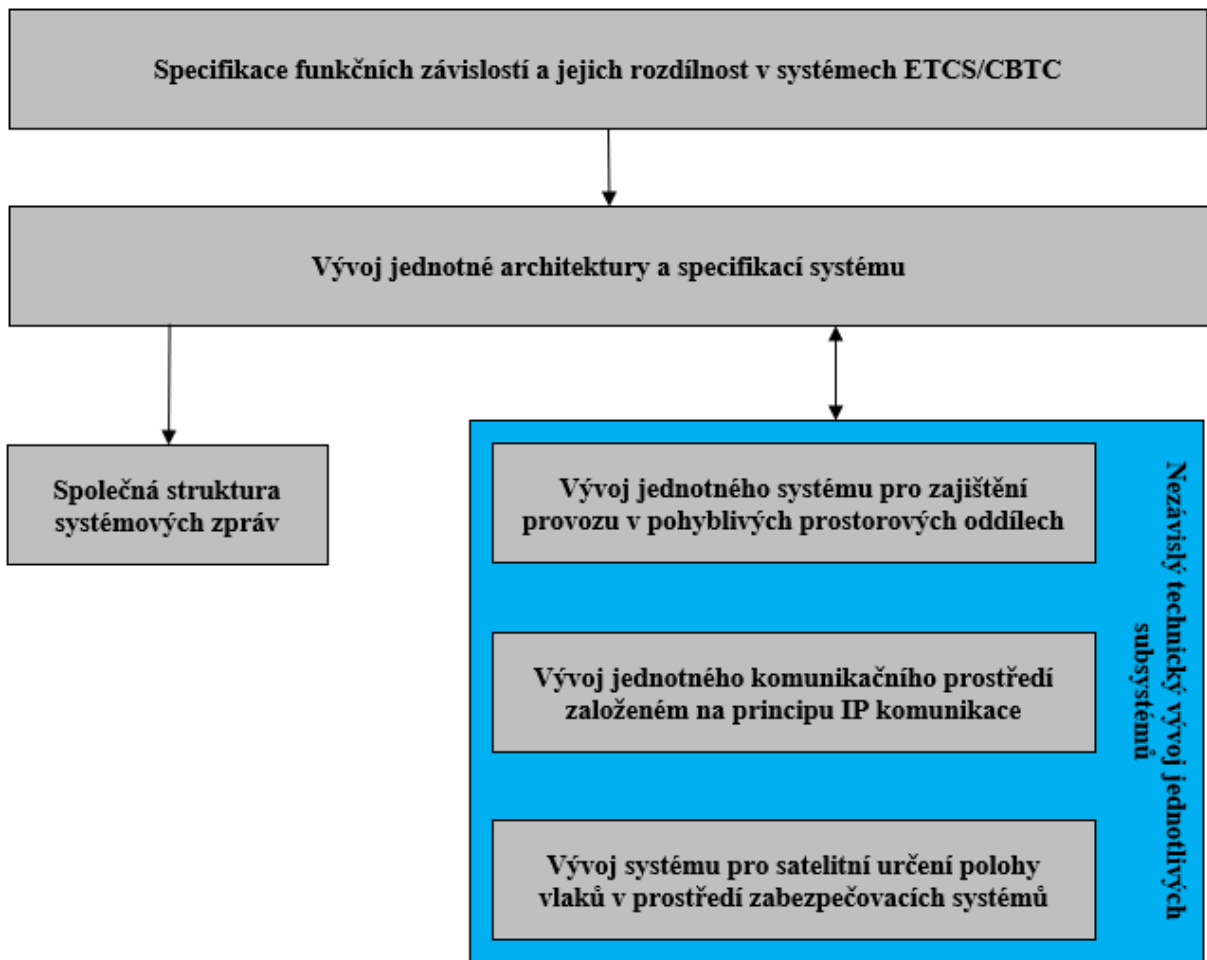
V návaznosti na výše nastíněné rozdělení, je i ze stávajících systémů možné vytipovat kandidátskou technologii pro každou z těchto kategorií. Pro systémy městské kolejové dopravy to bude především systém CBTC. Pro konvenční a vysokorychlostní tratě je to systém ETCS L2 nebo CTCS L2, L3. Pro tratě s nízkou intenzitou dopravy je to systém ETCS LC a CTCS L0, případně jiná národní řešení. Úspěšné zavádění a provozování těchto systémů a jejich odvozenin je důležitým ukazatelem toho, že jsou tato technologická řešení progresivní a vhodná k dalšímu rozvíjení. Z hlediska minimalizace budoucích nákladů a naprosté standardizace těchto systémů, je nanejvýš žádoucí nalézt jedinou společnou technologii. O toto se pokouší například projekt *Next Generation Train Control* (NGTC) (117).

Next Generation Train Control (NGTC)

Za účelem vzájemného propojení systémů ERTMS a CBTC vznikla v roce 2013 vědecko-výzkumná pracovní skupina, která měla za úkol prozkoumat možnosti vzájemné fúze těchto systémů do systému nové generace NGTC. Od začátku bylo rozhodnuto, že se bude pracovat se dvěma variantami systémů NGTC-Mainline a NGTC-Urban. Projekt zkoumal provozní a funkční shody a rozdíly. Po zpracování této analýzy následovalo zpracování systémové architektury v co největší míře soudržné pro zachování funkčnosti obou systémů. Dále byly rozvinuty jednotlivé pracovní balíčky, které jednotlivě řeší doplňkové systémy. Byly rovněž definovány hlavní funkční požadavky: definování TSI – identifikováno celkem 286 funkčních požadavků ze systému ETCS a 186 požadavků na funkce ATO, vycházejících ze systému CBTC (30).

Z realizovaných analýz vyplývá, že se předpokládá budoucí interoperativní řešení globální železniční sítě. Kromě definování požadavků na konvergenci systémů ETCS a CBTC do systému NGTC, byly definovány i další pracovní oblasti důležité pro budoucí fungování NGTC. Jsou to především komunikace založená na internetových protokolech, implementace pohyblivých prostorových oddílů a satelitní určování polohy, které by mohlo významně redukovat nákladovost infrastrukturní části systému a snížit náklady na její životní cyklus. Pohyblivé prostorové oddíly – dávají provozovatelům dráhy možnost minimalizovat následná mezidobí, přizpůsobit vzdálenosti mezi vlaky podle skutečné rychlosti, snížit náklady na traťovou část ZZ a zjednodušit údržbu. Radiová komunikace – u hlavních tratí je navrhováno použití systému GSM-R do roku 2028. V tomto období má být implementován jeho nástupce FRMCS. Hlavním cílem implementace FRMCS je zlepšení parametrů datové komunikace. Satelitní určování polohy vlaků – umožňuje snížit náklady na traťovou část ZZ a zjednodušit údržbu, předpokládá se využití systému GNSS pro určování polohy vlaku (30).

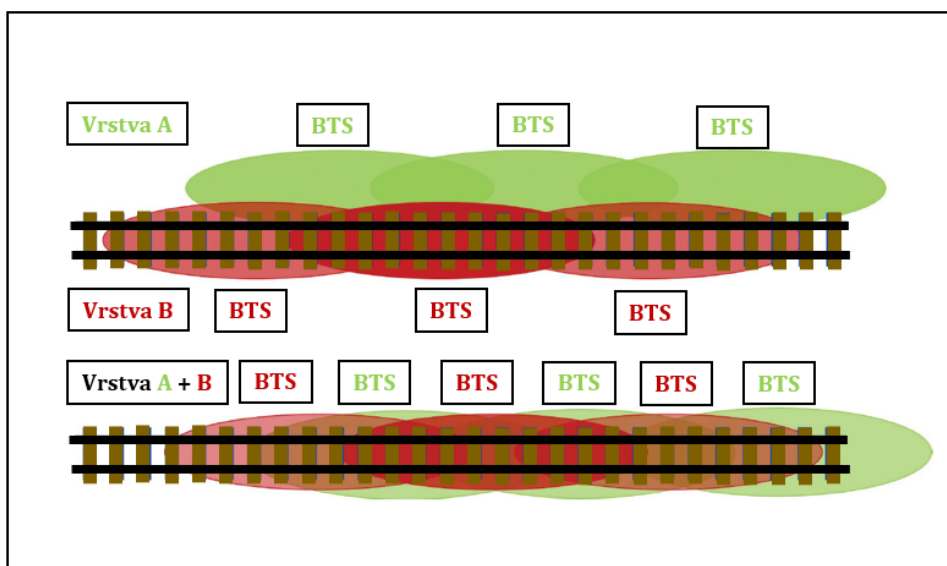
V rámci projektu NGTC bylo zjištěno především, že zavedení ATO do systému ETCS výrazně zvyšuje funkční konvergenci se systémy CBTC. Projekt NGTC identifikoval několik pracovních oblastí, které jsou klíčové pro možný vznik jednotného systému ATC. Rozčlenění pracovních oblastí pro další vývoj NGTC je uveden na obrázku B4.



Obrázek B4 Rozčlenění pracovních oblastí NGTC

Zdroj: (30) s úpravou autora

Všechny systémy nové generace jsou z hlediska datové komunikace založeny na principu vzdáleného přenosu signalizace – *Transmission-Based Signalling Systems (TBS)* – obrázek B5.



Obrázek B5 Princip zdvojené vrstvy pokrytí signálem

Zdroj: (29) s úpravou autora

PŘÍLOHA C: PROVOZNĚ FUNKČNÍ VLASTNOSTI ETCS A CBTC

V systému ETCS jsou pro udělení oprávnění k jízdě (MA) zásadní tři typy informací: aktuální poloha, maximální povolená rychlost a příští bezpečná poloha vlaku. Aktuální poloha je zjišťována prostřednictvím referenčních bodů (balíz) umístěných v kolejišti. Ze známé polohy těchto prvků se potom prostřednictvím odometrie dopočítává aktuální poloha vlaku. Tento princip je společný pro úrovně ETCS L1 a L2. Pro ETCS L3 doposud nejsou k dispozici oficiální specifikace. Uvažuje se zde o využití satelitní podpory. U systémů ETCS L2 a L3 probíhá obousměrná komunikace vozidlové a traťové části ETCS s RBC. Pro jednotlivé úrovně ETCS se však podstatně liší přenos uděleného MA do vozidlové části ZZ.

U systému ETCS L1 se zpráva o uděleném oprávnění k jízdě (MA) přenáší prostřednictvím LEU, která odešle definovaný telegram pomocí vlastní přepínatelné balízy. Pokud však dojde ke změně návěstního znaku na dalším návěstidle, je přenos dalšího oprávnění k jízdě (MA) umožněn až v dalším referenčním bodě. Vzdálenost je možné zkrátit prostřednictvím eurosmyček (ty se však již nově nezřizují) nebo dodatečně vložených přepínatelných balíz. Z úrovně ETCS L1 principiálně vychází úroveň ETCS L1 *Limited supervision* (LS).

U systému ETCS L2 se místo návěstidel a přepínatelných balíz informace přenášejí prostřednictvím GSM-R. Tím je dosaženo spojitého přenosu dat. Logika zabezpečení jízdy vlaku je stále v rozčlenění tratě na fixní prostorové oddíly.

U systému ETCS L3 se důležité informace přenášejí prostřednictvím nepřetržité radiové komunikace. Logika zabezpečení jízdy vlaku je založena na principu pohyblivých prostorových oddílů. Pro provoz v pohyblivých prostorových oddílech nejsou zapotřebí kolejové obvody ani počítače náprav. Kritickým místem této technologie je definice použité radiové technologie a zajištění nepřetržitého dohledu nad integritou vlaku. Logiku uspořádání prostorových oddílů lze rozdělit na překryvné oddíly, hybridní a virtuální pohyblivé bloky. Překryvná varianta umožňuje koexistenci variant ETCS L1, L2 a L3. Hybridní varianta trať fiktivně rozděluje na virtuální bloky, kdy je vlaku vždy přiřazen příslušný prostorový oddíl (tyto oddíly mají fixní polohu). Varianta skutečného pohyblivého bloku je specifická změnou délky oddílu v závislosti na skutečné rychlosti vlaku.

Pro přiblížení systému ETCS L2 k systému ETCS L3, se nabízí varianta, kdy budou fixní prostorové oddíly rozděleny na kratší sekce. Tím vznikne v podstatě obdoba hybridní

varianty systému L3. Nevýhodou tohoto řešení je nutná výstroj kolejových obvodů nebo počítače náprav.

Systémy ATC lze z hlediska jejich vývoje rozdělit do 4 kategorií (vývojových etap). Za čtvrtou, tedy prozatím poslední generaci, lze považovat systém CBTC. U CBTC obvykle nejsou potřeba kolejové obvody ani počítače náprav. Logika zabezpečení je založena na principu pohyblivého nebo virtuálního bloku. CBTC je projektováno s prostorovou, frekvenční, časovou a výkonovou redundancí.

V systémech CBTC je radiová komunikace mezi vlakem a tratí zpravidla zprostředkovávána prostřednictvím Wi-Fi signálu. Používají se frekvenční pásma 2,4 GHz a 5 GHz. Pro konvenční železnici však tento komunikační standard není dostatečný pro jeho technickou nevhodnost. Pro ETCS se od roku 1994 jako standard používá systém GSM-R. Na nevybavených tratích a v úrovni L1 může sloužit čistě jen pro hlasovou komunikaci. V úrovni L2 pro hlasovou komunikaci a přenos bezpečnostně kritických dat mezi vlakovou a traťovou částí. Pro úroveň L3 doposud není komunikační standard přesně definován. Očekává se, že systém GSM-R bude dále technicky a morálně zastarávat. Proto byl v roce 2012 spuštěn projekt FRMCS. U FRMCS se zvažuje využití technologie 5G, případně LTE-R (specifikace nebyla doposud stanovena) (26).

Další neméně významnou oblastí, která brání dalšímu rozvoji systému v úrovních automatizace GoA3 a GoA4 je zjišťování integrity vlaku. Zjištění integrity vlaku znamená schopnost systému ATC zjistit, zda je vlak celý. Význam zjišťování celistvosti spočívá především v bezpečném provozu celého řízeného systému. V systémech CBTC se zjišťování celistvosti pravidelným autotestováním prostřednictvím vozidlových antén v přední a zadní části vlaku. Informace o celistvosti vlaku je přenášena na řídicí vrstvu ATC, která v případě poruchy automaticky přejde do bezpečného stavu. U ETCS L3 není doposud definován způsob realizace zjišťování celistvosti vlaku. Uvažuje se o hybridním systému, který bude spolupůsobit s konvenčními prostředky zjišťování celistvosti vlaku. Dále se uvažuje o zapojení zařízení pro sledování spráha (CMD). Toto zařízení by bylo instalováno na každém voze a integrity vlaku by byla hlášena do přední části vlaku na koncové zařízení (HED) (30, 31).

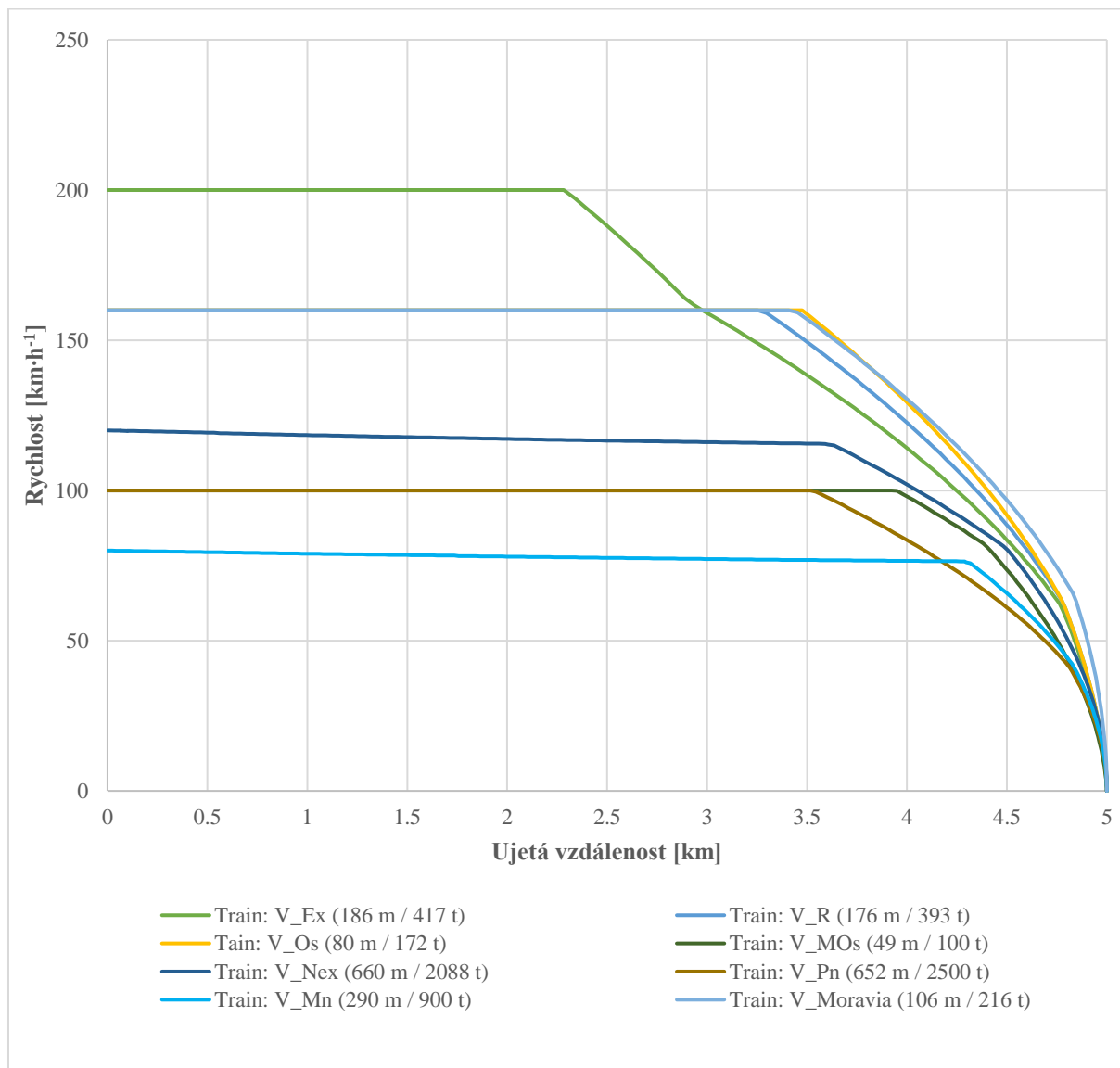
Pokud jde o interoperabilitu, uvažuje se o sloučení standardů systémů ETCS a CBTC. Za tímto účelem vznikl projekt systému řízení vlaků nové generace – NGTC. V rámci vzniku NGTC byly definovány společné znaky těchto systémů a návrh jeho nové struktury. Porovnání systému ETCS a CBTC z hlediska provozně-funkčních vlastností je uvedeno v tabulce C1.

Tabulka C1 Porovnání systému ETCS a CBTC z hlediska provozně-funkčních vlastností

	ETCS L1	ETCS L2	ETCS L3	CBTC
Typ provozování	Pevné prostorové oddíly	Pevné prostorové oddíly	Pohyblivé prostorové oddíly	Pohyblivé prostorové oddíly
Optická signalizace	Ano	Nemusí být instalována	Ne	Ne
Vzájemná interoperabilita	Ano	Ano	Ano	Ne
Funkční subsystémy ATC	ATP	ATP, ATO (samostatný systém)	ATP, ATO (samostatný systém)	ATP, ATO, ATS
Definované standardy	ERTMS	ERTMS	ERTMS	Pouze částečně IEEE
Typ přenosu dat	Bodový	Liniový	Liniový	Liniový
Přenos bezpečnostně kritických informací	Návěstidla, LEU, balízy, vložené eurosmyčky (jsou-li zřízeny)	Radiová komunikace pomocí GSM-R	Radiová komunikací s vyšším datovým standardem	Radiová komunikace Wi-Fi standard
Zjišťování volnosti koleje	Kolejové obvody, počítače náprav	Kolejové obvody, počítače náprav	Není definováno	Radiovou komunikací na základě známé vlastní polohy vlaku

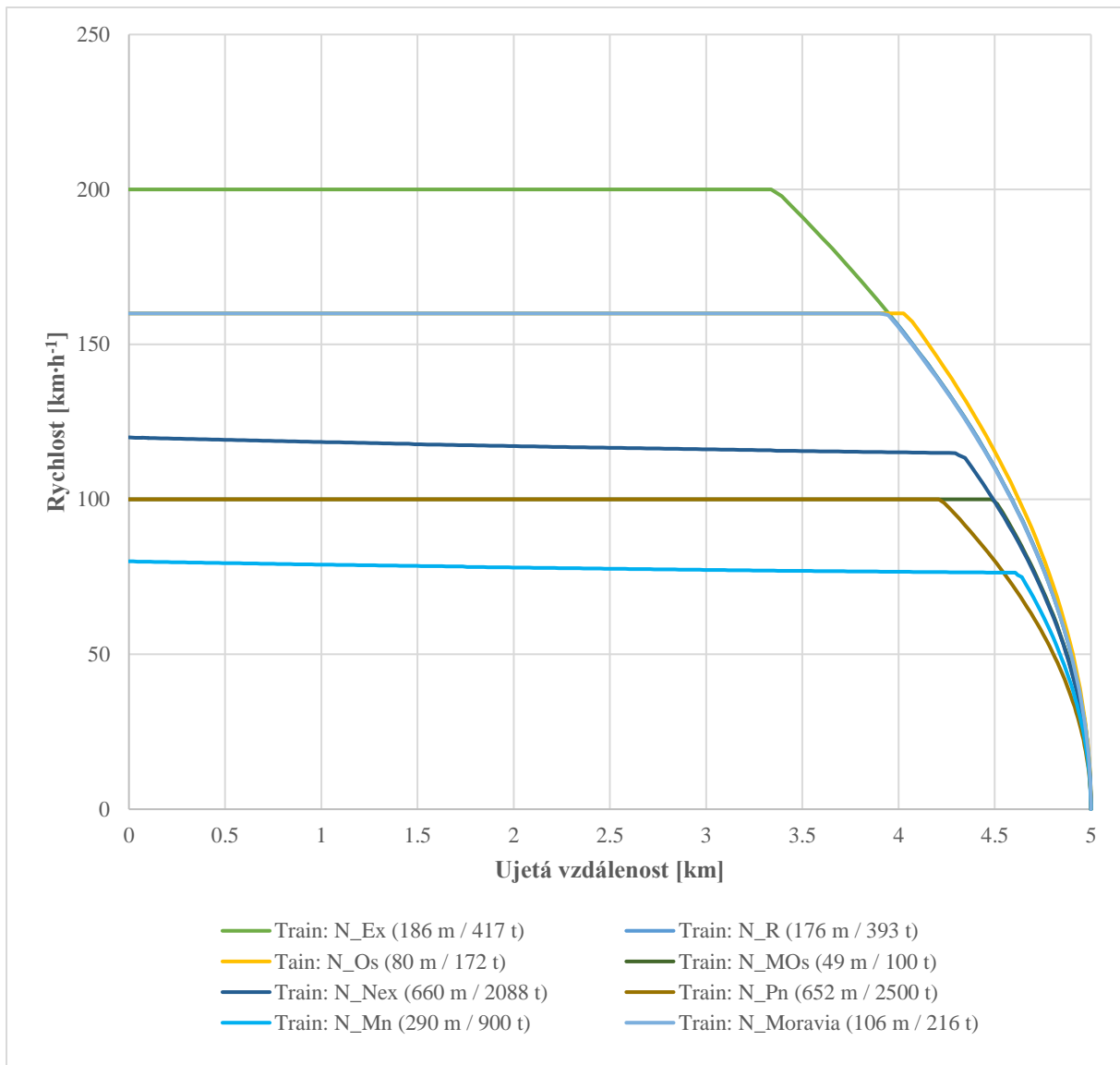
Zdroj: (26) s úpravou autora

PŘÍLOHA D: ROZDĚLENÉ GRAFY SIMULACE BRZDNÝCH KŘIVEK



Obrázek D1 Simulace brzdných křivek ETCS

Zdroj: autor



Obrázek D1 Simulace brzdých křivek pro konvenční provoz

Zdroj: autor

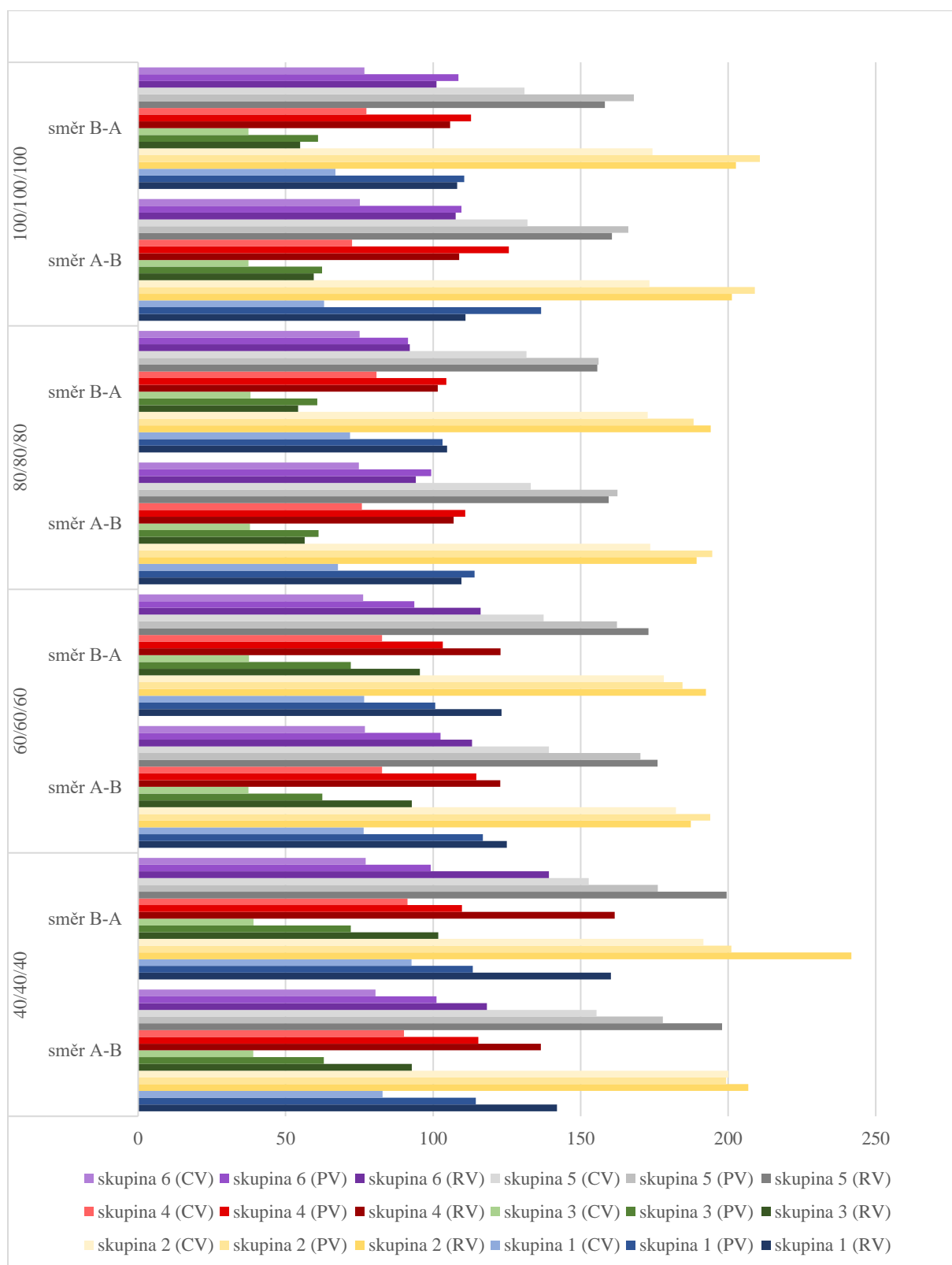
PŘÍLOHA F: VYGENEROVANÁ VSTUPNÍ ZPOŽDĚNÍ

Tabulka F1 Vygenerovaná vstupní zpoždění

	Simulační scénář									
Souprava	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ex 100	120	12	30	52	79	113	162	245	1497	16
R 803	120	320	110	47	6	177	82	20	572	133
Os 4600	120	17	49	91	157	318	16	34	71	124
Os 4801	120	250	186	299	6	23	44	69	80	165
NEx 40000	120	23	5	280	95	178	274	185	125	57
Pn 60000	120	73	94	121	155	180	512	9	22	37
Mn 80001	120	533	146	52	9	154	71	13	207	95

Zdroj: autor v SW OpenTrack

PŘÍLOHA G: PŘEHLED VÝSLEDKŮ PRO VŠECHNY SKUPINY – SIMULACE STANIČNÍCH ZHLAVÍ



Obrázek G1 Celkový graf následných mezidobí – simulace staničních zhlaví

Zdroj: autor