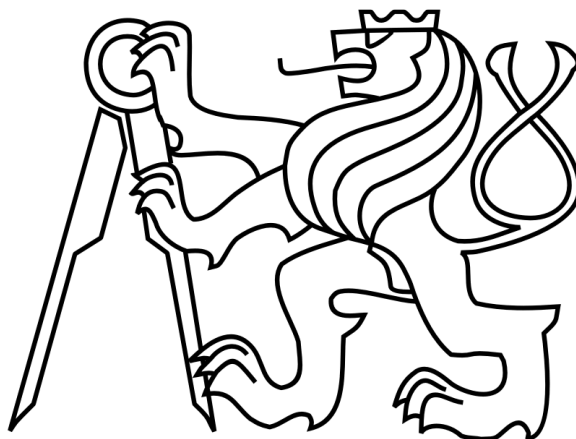


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Optimalizační algoritmy
pro systém řízení a zabezpečení železniční dopravy**

2019

Dušan Kamenický

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. září 2019

Dušan Kamenický

Kamenický Dušan

Optimalizační algoritmy pro systém řízení a zabezpečení železniční dopravy

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní

2019

Anotace

Práce se zabývá problematikou řízení železničního provozu v podmínkách ČR. Úvodní analytická část se detailně věnuje dosavadnímu přístupu v oblasti řízení provozu i současným poznatkům a trendům v této oblasti jak v ČR, tak v zahraničí. Práce definuje novou, v ČR dosud nezavedenou architekturu řízení provozu, která vychází i z předpokladů nasazení nových informačních technologií a systémů řízení a zabezpečení železničního provozu, které jsou v současné době nasazovány či diskutovány. Zaměřuje se na návrh a detailní popis jednotlivých úrovní řízení provozu, jejich rozhraní a funkcí. Výrazný důraz je kladen na posílení úrovně operativního řízení, v rámci níž jsou popsány stěžejní funkce predikce jízdy vlaků, detekce konfliktů a řešení dopravní situace. Nově navrhovaná architektura řízení provozu je aplikovaná nejen na stávající způsob řízení provozu v prostorových oddílech, ale současně na flexibilní způsob řízení provozu, kdy oprávnění k jízdě není vázáno na pevné prostorové oddíly, ale může být vydáno do libovolného místa infrastruktury na základě znalosti polohy ostatních vlaků v řízené oblasti. Práce přináší nový, systematicky uchopený přístup principů řízení železniční dopravy s využitím nových technologií a prostředků výpočetní techniky, které dosud nebyly v masivním měřítku nasazeny.

Kamenický Dušan

Optimization Algorithm for Traffic Management System and Interlocking System

Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences

2019

Annotation

This thesis deals with the issue of railway traffic management in the Czech Republic. The introductory analytical part is devoted in detail to the current approach in the field of traffic management and current knowledge and trends in this field both in the Czech Republic and abroad. The thesis defines a new, here not yet implemented architecture of traffic management, which also assumes deployment of new technologies of railway traffic control and interlocking systems that are currently being deployed or discussed. It focuses on design and detailed description of individual layers of traffic management, their interfaces and functions. Emphasized is strengthening of the operational management layer, where the key functions of train movement prediction, conflict detection and resolution of traffic situation is described. The newly designed architecture of traffic management system is applied not only to the current fixed block system but also to more flexible traffic management systems where the movement authority is not tied to fixed blocks but may be issued to any location on the infrastructure based on the knowledge of other trains position in the controlled area. The thesis introduces a new systematic approach to the principle of railway traffic management using new technologies and computer technology, which have not yet been deployed on a massive scale.

1	Úvod	6
2	Východiska pro řešení disertační práce	7
2.1	Definice systému	7
2.2	Stávající způsob řízení provozu	8
2.2.1	Architektura řízení provozu v ČR.....	8
2.2.2	Analýza stávajících telematických aplikací v ČR	11
2.2.2.1	Procesy telematických aplikací.....	11
2.2.2.2	IT podpora řízení provozu a vedení dopravní dokumentace	13
2.2.2.3	Automatizace řízení provozu.....	14
2.2.3	Konflikty v jízdách vlaků	15
2.2.3.1	Tvorba Plánu vlakové dopravy	15
2.2.3.2	Stávající řešení konfliktů v jízdách vlaků	15
2.3	Zahraniční trendy řízení provozu.....	17
2.4	Automatizace řízení vozidla	18
2.5	Interoperabilita	19
2.5.1	Subsystem řízení a zabezpečení	20
2.5.2	Subsystem provoz a řízení dopravy.....	22
3	Cíle disertační práce a předpoklady pro její řešení	24
4	Návrh řešení	26
4.1	Architektura řízení provozu.....	26
4.1.1	Definice úrovní řízení provozu	26
4.1.2	Kompetence úrovní řízení provozu	28
4.1.3	Návrh aplikace změn na stávající síť SŽDC	29
4.1.4	Návrh struktury informačních systémů.....	30
4.1.5	Kritéria pro stanovení hranic řízených oblastí.....	32
4.2	Kritéria optimalizace provozu	34
4.2.1	Posouzení možných kritérií	34
4.2.1.1	Kritérium minimalizace hodnoty zpoždění.....	35
4.2.1.2	Kritérium spotřeby trakční energie	37
4.2.1.3	Kritérium minimalizace šíření zpoždění	38
4.2.2	Uvažované kritérium optimalizace provozu.....	39
4.3	Úroveň operativního řízení provozu	40
4.3.1	Výpočet predikce jízdy vlaků	40
4.3.1.1	Výchozí stav.....	40
4.3.1.2	Teoretický základ.....	41

4.3.1.2.1	Fáze rozjezdu.....	42
4.3.1.2.2	Fáze brzdění	46
4.3.1.2.3	Pobyty vlaku	49
4.3.1.2.4	Vazby mezi vlaky	49
4.3.1.3	Uvažované předpoklady.....	50
4.3.1.4	Míra podrobnosti výpočtu predikce jízdy vlaku	51
4.3.1.5	Přepočet predikce jízdy vlaku.....	52
4.3.2	Detekce konfliktů	55
4.3.2.1	Obecné důvody omezení jízdy vlaku	55
4.3.2.2	Detekce konfliktů způsobených jízdou jiných vlaků.....	56
4.3.2.2.1	Řízení provozu v prostorových oddílech	56
4.3.2.2.2	Řízení provozu flexibilním způsobem.....	59
4.3.2.2.3	Odstranění konfliktů v jízdách vlaků	68
4.3.3	Principy algoritmů pro optimalizaci řízení provozu.....	68
4.3.3.1	Využití technologií pro řízení provozu.....	69
4.3.3.2	Řešení konfliktů v jízdách vlaků.....	71
4.3.3.3	Možnosti využití umělé inteligence.....	72
4.3.3.4	Scénáře řešení mimořádných situací	73
4.3.4	Požadavky na rozhraní aplikace	74
4.3.4.1	Navrhované změny v zobrazování prvků nákrešného GVD provozních aplikací..	75
4.4	Úroveň přímého řízení provozu	77
4.4.1	Řízení provozu v prostorových oddílech	79
4.4.2	Řízení provozu flexibilním způsobem.....	80
4.4.3	Požadavky na rozhraní aplikace	83
4.5	Popis infrastruktury.....	84
4.6	Optimalizace jízdy vlaku	86
5	Ověření řešení	89
6	Závěr.....	92
7	Literatura.....	93
7.1	Použitá literatura.....	93
7.2	Autorova literatura.....	95
8	Seznam obrázků	96

1 Úvod

Disertační práce se zaměřuje na nové přístupy řízení železničního provozu. V současné době se zvyšují požadavky na kvantitativní i kvalitativní parametry železničního systému. V oblasti řízení provozu jsou rozšiřovány informační systémy pro automatizovaný sběr informací a datovou výměnu informací mezi jednotlivými subjekty železniční dopravy. V oblasti bezpečnosti jsou zaváděny nové systémy zabezpečení provozu, zejména systém ETCS, umožňující vzájemnou komunikaci infrastruktury a vozidel. Avšak nevhodné začlenění nového systému zabezpečení do současných podmínek může mít i negativní dopad na některé parametry infrastruktury, zejména její kapacitu. Proto se zaváděním nových technologií musí být kromě bezpečnosti sledovány rovněž další parametry železničního systému, jako jsou kapacita infrastruktury, spolehlivost, přesnost, či energetická náročnost. Je zřejmé, že výstavba nových tratí je jistě velmi účinným nástrojem pro zvýšení kapacity železniční infrastruktury, z ekonomického hlediska je však náročná a prakticky obtížně realizovatelná. Práce se tak zaměřuje na možnosti využití nových technologií pro zvýšení efektivity využití železniční sítě.

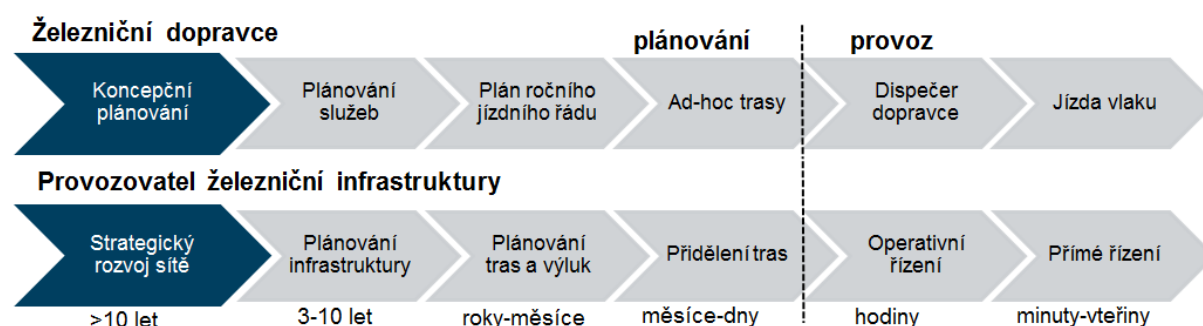
Díky pokroku technologií, zejména v oblasti výpočetní techniky a komunikací, je možné zavádět do reálného provozu metody umožňující optimalizaci železničního provozu v reálném čase. Tyto technologie umožňují změnit přístup k způsobu organizace, řízení a zabezpečení provozu. Předpokládá se tak efektivnější využití stávající infrastruktury. Nové přístupy souvisí především s uvažovaným odlišným způsobem zabezpečení železničního provozu. Dosavadní přístupy uvažovaly s řízením provozu v pevných prostorových oddílech, což plyne ze stávajícího způsobu zabezpečení železničního provozu. S využitím moderních technologií lze výrazně změnit tyto principy a lze uvažovat i o flexibilním způsobu řízení a zabezpečení provozu založeném na vzájemné komunikaci všech vozidel s infrastrukturou.

Práce se zaměřuje na problematiku architektury organizace řízení provozu, technologických postupů a technických systémů řízení a zabezpečení železničního provozu s cílem nalézt nové možnosti efektivnějšího řízení železničního provozu.

2 Východiska pro řešení disertační práce

2.1 Definice systému

Železniční doprava se vyznačuje vysokou mírou determinismu – většina procesů je předem plánována. Z hlediska řízení provozu je každý pohyb vozidel po infrastruktuře předem plánován, ať už v řádu hodin nebo jednoho roku. Každému vlaku je přidělena trasa, určená v čase a prostoru. Tato trasa by měla být realizovatelná z hlediska parametrů infrastruktury a pohybu ostatních vlaků. Předmětem této práce však není dlouhodobé plánování tras v grafikonu vlakové dopravy, naopak, naplánovaný GVD je nezbytnou vstupní informací – definuje ideální stav, k němuž má řízení provozu směřovat. Tato práce se zabývá technologickými postupy a technickými systémy, které řídí železniční provoz za účelem splnění naplánovaného grafikonu vlakové dopravy.



Obrázek 1: Časová osa plánování a řízení provozu
Zdroj: [33]

Obrázek 1 znázorňuje časovou osu plánování a řízení provozu. Z výše uvedeného je patrné, že předmětem zkoumaného systému je část označená jako *provoz* – tedy řádově minuty až hodiny před samotnou jízdou vlaků. Jedná se o korekci odchylek od naplánovaného GVD, vzniklých nepředpokládanými jevy, ať už na straně infrastruktury nebo vozidla. Dále zkoumaný systém zahrnuje přípravu jízdních cest – nikoliv však po stránce řešení technické bezpečnosti, ale z pohledu technologických postupů přípravy jízdní cesty úzce souvisejících s bezpečností. Částečně do zkoumaného systému zasahuje i část označená jako plánování – jedná se o plánování tzv. ad-hoc tras¹, případně procesů souvisejících s mimořádnými situacemi.

Z hlediska identity je systém navrhován pro prostředí blízké infrastruktuře SŽDC. Tím je myšleno, že provozování dopravy je specifikováno právními dokumenty různé legislativní úrovně (ať už evropské nebo národní), čímž jsou determinovány okrajové podmínky pro navrhovaný systém. Přestože se práce nevyhýbá různým doporučením, která tyto právní dokumenty pozměňuje, je nutné jejich principiální respektování. Dále je provozování železniční dopravy ovlivňováno národními

¹ Přidělení trasy na základě aktuálních požadavků dopravce podaných v souladu se Směrnicí SŽDC č. 70

zvyklostmi, proto je systém navrhován v kontextu ČR. Má-li však být tato práce přínosem, musí reflektovat aktuální vývoj technologií s cílem sledovat budoucí stav infrastruktury a vozidel. Proto není pozornost zaměřena pouze na řízení provozu po infrastruktuře vybavené stávajícími technologiemi, ale především na řízení provozu v kontextu nově vyvíjených a implementovaných technologií založených na vzájemné kooperaci mezi vozidly a infrastrukturou.

Disertační práce tak analyzuje stávající stav na síti SŽDC, sleduje aktuální trendy u zahraničních správců infrastruktury, zabývá se právními dokumenty, fyzikálními jevy či vlastnostmi člověka ovlivňující návrh systému, doporučuje úpravy způsobu řízení železničního provozu na stávající i novými technologiemi vybavené infrastruktuře. Práce definuje systém z hlediska architektury, prvků a vazeb, jednotlivých rozhraní a z hlediska funkcí. Výchozí předpoklady jsou uvedeny v kapitole 3.

2.2 Stávající způsob řízení provozu

2.2.1 Architektura řízení provozu v ČR

Řízení železničního provozu je podle předpisu SŽDC D7 [7] definováno jako „*souhrn činností skládající se ze vzájemné výměny informací, požadavků a pokynů mezi zaměstnanci řízení provozu, elektrodispečery a dopravci, spočívající v jejich plánovitém a operativním usměrňování za účelem dosažení maximální efektivity řídicího procesu a splnění požadavků Plánu vlakové dopravy*“.

SŽDC definuje procesy řízení železniční dopravy především svými interními předpisy, z nejpodstatnějších lze jmenovat:

- SŽDC D1 Dopravní a návěstní předpis [5]
- SŽDC D3 Předpis pro zjednodušené řízení drážní dopravy [6]
- SŽDC D7 Předpis pro operativní řízení provozu [7]
- SŽDC D7/2 Organizování výlukových činností [8]

kteří vycházejí a blíže konkretizují požadavky definované vyššími právními dokumenty, především Zákon č. 266/1994 Sb., o drahách, s účinností od 01. 01. 2015 a Vyhláška MD č. 173/1995 Sb. [11].

Historicky je řízení železniční dopravy silně spjata se stavěním jízdních cest, kdy obsluhou zabezpečovacího zařízení výpravčí, ve spolupráci s hláskáři, hradlaři, výhybkáři, resp. signalisty, přímo ovlivňuje prvky v infrastruktuře pro zajištění bezpečné jízdy vlaku. Řízení sledu vlaků je převážně v kompetenci výpravčích v jednotlivých stanicích. Řešení konfliktů v jízdách vlaků je distribuováno na lokální úroveň.

Dle předpisu SŽDC D7 [7] článek 217-219.: „*Za řízení sledu vlaků a organizaci provozu v přidělené dopravně a v návazných mezistaničních úsecích je zodpovědný výpravčí.*“

„*Jízdu vlaků výpravčí organizuje s ohledem na pořadí důležitosti vlaků dle příslušných ustanovení předpisu SŽDC D1 tak, aby nebyla narušena jízda vlaku vyšší důležitosti.*“

„*Sled vlaků odchylný od stanoveného pořadí důležitosti vlaků může výpravčímu povolit nebo nařídit pouze příslušný provozní dispečer.*“

Vyšší úroveň operativního řízení, kterou zajišťuje dispečerský aparát, je zastoupena především provozními dispečery. Historicky se dispečerský aparát zaměřoval především na kontrolní činnost. Do řízení sledu vlaků zasahoval pouze v ojedinělých případech. Důvod lze spatřovat především v nedostatku informací, kdy provozní dispečeré dostávali informace o poloze vlaků pouze z významnějších stanic, případně v situacích výraznějšího narušení jízdy vlaku. Na základě těchto dat nebylo možné optimalizovat řízení provozu na této úrovni. Zároveň předávání dispozic prostřednictvím telefonního spojení mělo své omezené možnosti.

Postupným zvyšováním technických možností zabezpečovacího zařízení se rozšiřovala i řízená oblast. To umožňuje výpravčímu větší přehled o dopravní situaci. Postupně se mění problém s nedostatkem informací pro rozhodování o řízení sledu vlaků v problém nadměrného množství informací, který člověk není schopen v reálném čase zpracovat a vyhodnotit bez kvalitní IT podpory.

V České republice se postupně přechází od klasického řízení železniční dopravy, kdy každá stanice byla obsazena výpravčím, kteří si mezi sebou domlouvali jízdu vlaků, k dálkovému způsobu řízení, kdy výpravčí dálkově ovládají až stovky kilometrů tratí. Většina tratí pod správou SŽDC bude ovládána ze dvou center v Přerově a Praze, tzv. Centrální dispečerská pracoviště. Začlenění tratí do dálkového řízení provozu a určení hranic řízených oblastí je uvedeno v [12].

CDP umožňuje soustředit řízení a zabezpečení železničního provozu daného traťového úseku do jednoho sálu. Koncepce řízení provozu v CDP Přerov a CDP Praha jsou rozdílné. Řídící sály v CDP Přerov jsou uspořádány do třech řad. První řada je určena pro tzv. úsekové dispečery (typicky 3 v každém sále), kteří vykonávají řízení místního provozu v jednotlivých dopravních – jedná se především o posun nebo jízdy vlaků do traťových úseků přilehlých k řízené oblasti. Druhá řada je určena pro tzv. řídicí dispečery (typicky 2 v každém sále), kteří vykonávají řízení tranzitních vlaků řízenou oblastí. Třetí řada je určena pro operátory dopravy (typicky 2 v každém sále), kteří obsluhují informační systémy pro cestující a tvoří podporu úsekových i řídicích dispečerů. Podrobné informace o organizaci provozu jsou uvedeny v [13]. Koncepce řídicích sálů v CDP Praha předpokládá uspořádání do čtyř řad, kdy první dvě řady jsou obsazeny úsekovými dispečery

(CDP Praha nerozlišuje úsekové a řídící dispečery, viz [14], řízená oblast je rozdělena mezi jednotlivé úsekové dispečery, přičemž každému jsou přiděleny přibližně 2-3 stanice), třetí řada je určena pro operátory dopravy a čtvrtá řada je určena pro operativní řízení, zastoupené provozními dispečery.

Na základě studií a analýz autor disertační práce identifikoval, že současná praxe v ČR kombinuje činnosti operativního a přímého řízení². Rozhodovací procesy výpravčího v oblasti řízení sledu vlaků jsou negativně ovlivněny vykonáváním rutinních úkonů v podobě stavění jízdních cest pro každý vlak a posunový díl. Výpravčí musí tedy nejen plánovat provoz ve své oblasti, ale s korekcemi v řízení musí čekat do doby, kdy mu situace umožní zamýšlenou cestu realizovat.

Rozhodnutí výpravčího je tak závislé na jeho zkušenostech a schopnostech, aktuálním fyzickém a psychickém stavu, aktuálnosti, přesnosti a spolehlivosti informací poskytovaných příslušnou aplikací, časovém vytížení při vykonávání rutinních činností v podobě stavění jízdních cest či jinou obsluhou zabezpečovacího zařízení a dalších podnětech souvisejících s výkonem služby. Přestože centrální řízení železničního provozu umožňuje výpravčímu³ větší přehled o aktuální situaci ve své řízené oblasti, kvalita řízení stále závisí na schopnostech výpravčího.

Dosavadní koncepce řízení provozu v ČR uvažující provázanost těchto činností se nejeví jako vhodná, obzvláště při mimořádných situacích, kdy automatizační systém není schopen řešit konflikty v jízdách vlaků a plnou zodpovědnost za operativní i přímé řízení přenesl na obsluhujícího zaměstnance. Ten je pak vystaven extrémní a často nečekané zátěži, přičemž často musí řešit nejen sled vlaků, ale především bezpečnost železniční dopravy. Zásadním problémem je rovněž spolehlivost vstupních informací a požadavky na některé bezpečnostně relevantní funkce, které nezajišťuje zabezpečovací zařízení, a v současné době jsou na zodpovědnosti obsluhujícího zaměstnance.

V souvislosti s rozdělením unitární železnice na správce infrastruktury a dopravce vznikají nová rozhraní, která dodnes nejsou uspokojivě vyřešena. Dopravci, kteří poskytují služby cestujícím a zákazníkům v nákladní dopravě, zřizují své vlastní dispečerské aparáty, jejichž účelem je řešení provozních situací a zajištění plnění závazků na straně dopravce. Tito dispečeré výrazně zasahují do sledu svých vlaků obzvláště v případech poruch lokomotiv či zajištění přípojných vazeb u výrazně

² Pojmy přímé řízení, operativní řízení a strategické řízení v tomto kontextu zavádí autor disertační práce poprvé ve studii [33] a blíže jsou vysvětleny v kapitole 4.1

³ pro účely tohoto dokumentu, v souladu s předpisem SŽDC D7, se pod pojmem výpravčí uvažují i traťoví (úsekoví a řídící) dispečeré centrálního dispečerského pracoviště a dirigující dispečeré při zjednodušeném řízení železniční dopravy

zpožděných vlaků. Proto je nezbytná jejich koordinace s provozními dispečery na straně správce infrastruktury, přičemž každý z nich disponuje s jinou množinou informací.

2.2.2 Analýza stávajících telematických aplikací v ČR

Nezbytnou úlohu v systému řízení a zabezpečení zastávají informační systémy umožňující výměnu dat mezi jednotlivými správci infrastruktury, dopravci a cestujícími, resp. přepravci v nákladní dopravě. Tvoří nezbytnou podporu v úrovni strategického řízení provozu při přidělování kapacity dopravní cesty, plánování výluk a řešení dalších dlouhodobých strategií. Nezastupitelnou roli mají informační systémy v operativním a přímém řízení z hlediska sledování a prognózy jízdy vlaku, sestavy vlaku a jeho parametrů, kdy poskytují podklad pro rozhodování dispečerů.

2.2.2.1 Procesy telematických aplikací

Návrh telematických aplikací musí zohledňovat technické specifikace interoperability, konkrétně TSI TAF [15] a TSI TAP [16], na síti SŽDC jsou tyto požadavky přeneseny do směrnice Is10 [17]. Podrobnou analýzu telematických aplikací v ČR provedl autor ve studii [33].

Z hlediska přidělení trasy vlaku má v prostředí SŽDC význam především aplikace KADR. Požadavky na přidělení tras v rámci ročního jízdního řádu jsou do systému KADR importovány ze systému KANGO. Pro ad-hoc trasy může dopravce komunikovat se systémem KADR prostřednictvím webové aplikace nebo vlastní aplikací dopravce podporující rozhraní dle technických specifikací interoperability pro telematické aplikace (TSI TAF a TSI TAP). Prvním důležitým procesem je „žádost o trasu“. Dopravce následně musí provést tzv. „aktivaci trasy“ pro její denní realizaci, v rámci níž může provést částečné změny parametrů vlaku. Přidělená a aktivovaná trasa je předávána systému ISOŘ⁴. Provozní dispečer na vstupu provádí její tzv. posouzení, kdy ověřuje konzistenci došlých dat a jejich soulad s plánem. Systém KADR má nepostradatelnou vazbu se systémem DOMIN, který koncentruje data o omezeních infrastruktury – předpokládané i nepředpokládané výluky, plánuje se i evidence pomalých jízd. Vzhledem k nedostatkům v popisu infrastruktury jsou omezení infrastruktury v systému vedena v rozlišení úrovně stanic a traťových úseků. Při plánování trasy je tedy obsluha upozorněna na omezení v příslušném úseku trati nebo obvodu stanice, ale posouzení, zda je úsek pro dané vozidlo sjízdný či nikoliv musí provést obsluha sama. Další vazba propojuje systém KADR se systémem REVOZ, který je centrálním registrem vozidel pro informační systémy podporující operativní řízení. Databáze obsahuje pouze hnací vozidla, která mají přístup na síť SŽDC. Současně platná legislativa striktně nenařizuje, aby správce infrastruktury vyžadoval po dopravcích zavedení dat do registru o všech vozidlech pohybujících se po jeho síti. To znemožňuje zavést

⁴ Informační systém operativního řízení (dále ISOŘ) firmy OLTIS Group

kontrolní mechanismy v informačních systémech, které by umožňovaly detekovat irelevantnost zadaných dat, případně dlouhodobě sledovat technický stav vozidel provozovaných na jejich infrastruktuře. Systém KADR rovněž komunikuje se systémem KAPO, který správce infrastruktury využívá pro kalkulaci poplatků za využití dopravní cesty.

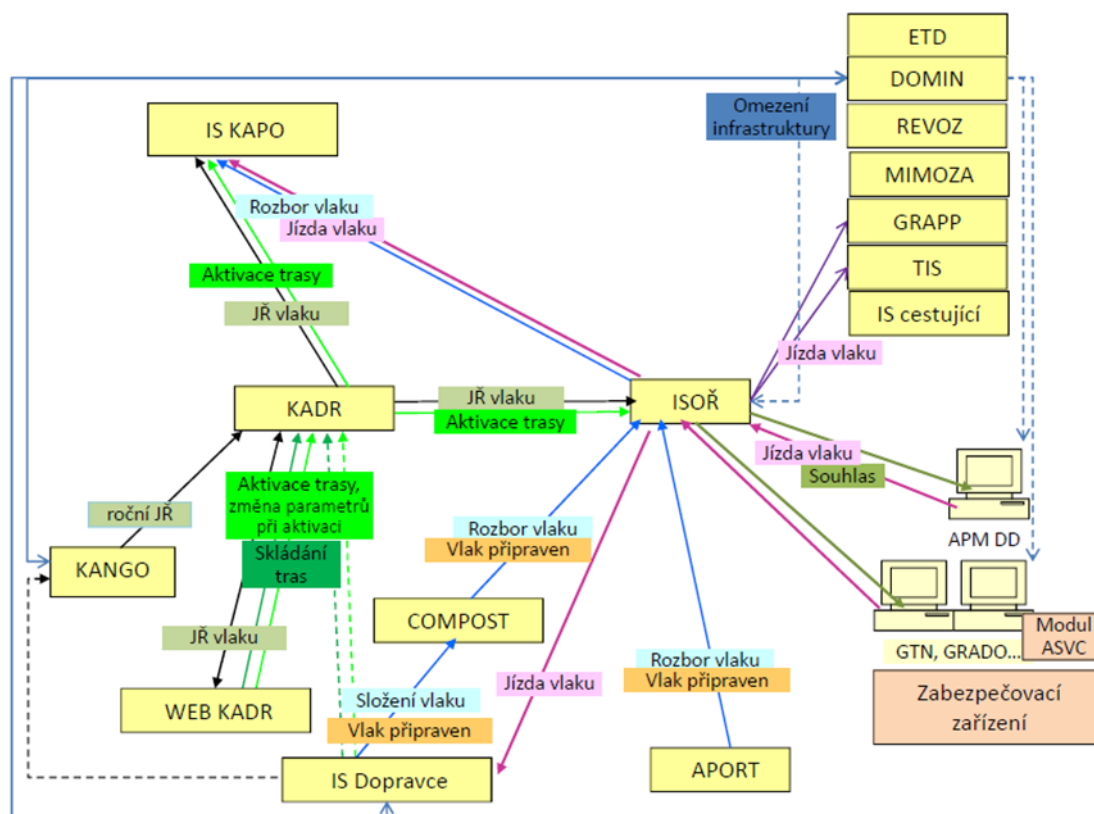
V rámci operativního řízení zaujímá ústřední úlohu ISOŘ, který je především centrální databází dat pro operativní řízení. Základním vstupem systému ISOŘ jsou data o jízdním řádu každého vlaku od systému KADR a o aktivaci trasy. Druhým významným procesem je „rozbor vlaku“, kterým dopravce poskytuje správci infrastruktury nezbytné souhrnné informace o již sestaveném vlaku – např. délka, hmotnost vlaku atd. V případě, že je ve vlaku řazena mimořádná zásilka, musí dopravce poskytnout informaci „složení vlaku“, kde jsou uvedeny kompletní informace o řazení a parametrech vozů. V současné době může dopravce poskytnout informace „rozbor vlaku“ a „vlak připraven“ prostřednictvím aplikace APORT. Pokud poskytuje informaci „složení vlaku“, využije systém CompoST, která následně předá systému ISOŘ souhrnnou informaci „rozbor vlaku“.

Třetím významným procesem je poskytnutí informace „vlak připraven“, kde dopravce informuje správce infrastruktury o posledních nezbytných informacích o vlaku (např. kontakt na strojvedoucího) a zároveň, že jsou ukončeny všechny úkony nutné k odjezdu vlaku z výchozí stanice. Pokud jsou v systému ISOŘ informace „aktivace trasy“, „rozbor vlaku“ a „vlak připraven“, může být vydán „souhlas“ s jízdou, což je informace pro výpravčí, že mohou připravovat vlakové cesty pro jízdu tohoto vlaku.

V systému ISOŘ jsou koncentrovány informace o příjezdu, odjezdu, resp. průjezdu definovanými body infrastruktury prostřednictvím zpráv „jízda vlaku“, které jsou získávány automatizovaně z nadstavbových systémů zabezpečovacích zařízení (např. GTN⁵, GRADO⁶), případně manuálním zápisem do elektronického dopravního deníku. Tyto informace jsou poskytovány obvykle s rozlišením jednotlivých stanic, případně výhyben, odboček nebo obvodů železničních uzlů. Informace o jízdě vlaků jsou poskytovány dalším systémům, např. KAPO, informačním systémům dopravce, informačním systémům pro cestující atd. Výpravčí může do systému ISOŘ zaslat zprávu „prognóza jízdy vlaku“, kde poskytuje informaci o předpokládané změně odchylky od naplánované trasy vlaku (např. prodloužení pobytu ve stanici).

⁵ Graficko-technologická nadstavba elektronických stavědel firmy AŽD

⁶ Nadstavba elektronických stavědel pro vizualizaci dopravní situace v podobě nákrešného GVD a vedení dopravní dokumentace firmy Starmon



Obrázek 2: Procesy stávajících informačních systémů na síti SŽDC

Zdroj: [33]

2.2.2.2 IT podpora řízení provozu a vedení dopravní dokumentace

V praxi mají na řízení železničního provozu zásadní vliv výpravčí, kteří rozhodují na základě informací o stavu infrastruktury indikovaného zabezpečovacím zařízením, o poloze vlaků v jimi řízené oblasti a informací z provozních aplikací, především aplikací Traťová poloha vlaků nebo nadstavbových systémů elektronických zabezpečovacích zařízení (GTN a GRADO), které v rámci řízené oblasti slučují informační systém (zobrazují splněný a výhledový grafikon vlakové dopravy včetně nezbytných parametrů vlaků) a vedení dopravní dokumentace.

Uvedené aplikace mají pouze omezenou predikci jízdy vlaku. V případě zpoždění jsou trasy vlaků posouvány rovnoběžně s naplánovanou trasou, aniž by byly zohledněny aktuální parametry vlaků a stav infrastruktury – aplikace neumožňují provádět aktualizovaný výpočet dynamiky jízdy vlaků, včetně využití rezerv jízdniho řádu. Ani jedna z aplikací automaticky nedetekuje konflikty⁷ v plnění grafikonu vlakové dopravy ani neposkytuje podporu pro vyhodnocení možností rozhodnutí a výběr nejlepší alternativy.

⁷ Stav k roku 2016, nově detekce konfliktů a její zobrazení implementováno v aplikaci GTN jako jedna z funkcí vyvíjeného systému ASVC2, viz kapitola 2.2.2.3

Koordinaci mezi jednotlivými oblastmi výpravčích a uplatňování požadavků dopravců (vznesených dispečery dopravce), zajišťuje provozní dispečer. Provozní dispečeré mohou v rámci své klientské aplikace přesouvat zobrazené trasy vlaků ve výhledovém grafikonu vlakové dopravy tak, aby přibližně modelovali předpokládaný budoucí stav a posoudili jednotlivé varianty řešení dopravní situace. Předávání dispozic je omezeno současnými prostředky, kdy se využívá pouze telefonního spojení, v případě CDP Praha ústního povelu.

2.2.2.3 Automatizace řízení provozu

V ČR je firmou AŽD Praha vyvíjen systém Automatického stavění vlakových cest (dále ASVC), jehož záměrem je zjednodušit práci dispečera při centrálním řízení železničního provozu v oblasti přímého řízení automatickým stavěním vlakových cest podle naplánovaných tras vlaků v grafikonu vlakové dopravy. Tento systém prošel během tvorby této disertační práce značným vývojem, který byl zapříčiněn nejen zkušenostmi z provozního ověření, ale významným podílem i podměty studie [33] vypracované autorem disertační práce.

V původním konceptu vývoje⁸ (ASVC1) systém predikoval jízdy vlaků, detekoval konflikty a vyhledával optimální řešení. Systém vyhledával optimum pouze v rámci oblasti DOZ⁹ s tím, že si sám vybíral optimální řešení. Výpravčí měl následně jen omezené možnosti korekce vybrané varianty, většinou pouhým zablokováním vykonávání určité jízdní cesty. Modul ASVC zasahoval do sledu jízdy vlaků a zároveň vydával pokyny ke stavění jízdních cest a ovlivňování dalších prvků v infrastruktuře prostřednictvím zabezpečovacího zařízení. Obsluha tohoto systému, tedy výpravčí, byl povinen kontrolovat činnosti systému v oblasti operativního řízení, zda je dodržen správný sled vlaků, a zároveň v oblasti přímého řízení, zda zabezpečovací zařízení vykonává správnou činnost. V rámci ověřovacího provozu se projevily komplikace související zejména s nedostatečnými vstupními informacemi, nepřipraveností právních dokumentů ohledně optimalizačních kritérií (blíže bude tato problematika popsána v kapitole 4.2) a zvolenými kompetencemi obsluhy systému (viz kapitola 2.3 a 4.1).

Další vývoj aplikace¹⁰ (ASVC2) více reflektuje závěry uvedené studie [33] a blíží se architektuře řízení navrhované v rámci této disertační práce. Především nově vyvíjený systém umožňuje oddělit úroveň přímého a operativního řízení. Vývoj se zaměřuje především na pokrytí přímé úrovně řízení, zajišťuje úzkou vazbu mezi stavědlem (elektronickým zabezpečovacím zařízením dodávaným firmou AŽD Praha) a informačním systémem operativního řízení. Zajišťuje vysílání požadavků stavědlu pro

⁸ Ověřovací provoz Lysá nad Labem – Milovice 04/2015 až 08/2017 a Liberec – Tanvald 10/2015 až 07/2016

⁹ Dálkové ovládání zabezpečovacího zařízení

¹⁰ Zhodnocení původního konceptu a směr dalšího vývoje uveden v [18].

ovládání prvků infrastruktury, optimalizační funkce jsou zaměřeny pouze na včasné vyslání těchto požadavků. Optimalizační funkce týkající se plánování sledu vlaků byly výrazně omezeny. Bylo vytvořeno rozhraní pro příjem dispozic od případného nadřazeného systému operativního řízení.

2.2.3 Konflikty v jízdách vlaků

2.2.3.1 *Tvorba Plánu vlakové dopravy*

Naplánovaný GVD by měl popisovat „ideální“ stav, kdy se všechny subjekty shodly na časových polohách vlaků, aniž by se jejich jízdy vzájemně ovlivňovaly. Tím je myšleno, že jsou zohledněny všechny provozní intervaly. V případě sítě SŽDC jsou provozní intervaly popsány ve Směrnici č. 104 [25] a zjednodušeně lze říci, že časové polohy jsou naplánovány tak, aby daný vlak ani nemusel začít snižovat svoji rychlost z důvodu jízdy jiného vlaku. Přitom uvedená směrnice uvažuje konvenční způsob řízení provozu s pevnými prostorovými oddíly. Cílem řízení provozu na úrovni operativního řízení je udržovat jízdy vlaků v trasách a časových polohách definovaných naplánovaným GVD.

Nicméně konkrétně na síti SŽDC nelze naplánovaný GVD považovat za bezkonfliktní. Do dlouhodobého plánu (roční GVD), který je konstruován jako bezkonfliktní, jsou zařazovány tzv. ad-hoc trasy vyhlášením tzv. Plánu vlakové dopravy. Avšak přidělení těchto tras již není bezkonfliktní. Navíc časová poloha konkrétního vlaku se značně liší od přidělené trasy – ať už vlak jede s náskokem nebo zpožděním. Pak už jízda daného vlaku je čistě podřízena operativnímu řízení. V tomto případě pak chybí to optimum, ke kterému by mělo operativní řízení směřovat. Má-li být realizován jakýkoliv systém pro optimalizaci řízení železničního provozu, je v první řadě nezbytné definovat ideální stav. Je tedy nezbytné, aby přidělování ad-hoc tras již zohledňovalo aktuální dopravní situaci. Časová poloha ad-hoc trasy byla realizovatelná vzhledem k aktuální poloze daného vlaku a s ohledem na ostatní vlaky v dlouhodobém plánu.

Obdobně je nezbytné přistupovat k plánovaným výlukám. Přestože výlukovou činností je omezena kapacita dopravní cesty, není vždy upraven naplánovaný GVD tak, aby byl bezkonfliktní. Nezohledňuje se současnost více výlukových činností v trase vlaku. Přitom v dnešní době, kdy většina cestujících hledá spojení ve vyhledávacích jen několik hodin před zamýšlenou jízdou a tištěné jízdní řády téměř neexistují, není nezbytné trvat na ročním GVD a může být provedena jeho změna tak, aby byla respektována tato omezení na infrastruktuře.

2.2.3.2 *Stávající řešení konfliktů v jízdách vlaků*

V případech, kdy vlivem aktuální provozní situace vznikají konflikty v jízdách vlaků, postupují dispečeré řídící provoz podle stanovených priorit vlaků. Priorita jednotlivých vlaků je v současnosti dána Vyhláškou č. 173/1995 Sb. [11], která je následně přenesena do vnitřního předpisu správce infrastruktury SŽDC D1 [5]. Odchyly od takto definované priority vlaků mohou dopravci požadovat

v rámci plánování dlouhodobého GVD a následně jsou zaneseny do Prováděcího nařízení část B předpisu SŽDC D7 [7]. Požadavek na změnu sledu svých vlaků odchylně od výše uvedených pravidel může dopravce uplatňovat u provozního dispečera.

Vyhláška 173/1995 [11], § 22 stanovuje:

(2) Operativní řízení drážní dopravy uplatňuje provozovatel dráhy při mimořádnostech v drážní dopravě (zpoždění, výluky kolejí, odklony vlaků pro nesjízdnost traťových úseků, zavedení mimořádných vlaků). Přitom zajišťuje, aby přednost v jízdě měly vlaky podle pořadí:

- a) nutné pomocné,*
- b) mimořádné v obecném zájmu,*
- c) mezinárodní vlaky Eurocity a Intercity, mezinárodní expresní vlaky a rychlíky (včetně jízd lokomotiv pro tyto vlaky),*
- d) mezinárodní osobní vlaky, vnitrostátní expresní vlaky a rychlíky a mezinárodní nákladní expresní vlaky,*
- e) vnitrostátní spěšné a osobní vlaky,*
- f) nákladní vlaky v pořadí:*
 - 1) vnitrostátní expresní,*
 - 2) mezinárodní ostatní,*
 - 3) rychlé,*
 - 4) spěšné,*
 - 5) průběžné,*
 - 6) vyrovnávkové,*
 - 7) manipulační,*
 - 8) přestavovací a vlečkové,*
- g) lokomotivní, služební a pracovní.*

Pokud se budou zaměstnanci řídící provoz striktně držet výše uvedených priorit vlaků, musí upřednostnit např. lehký osobní vlak vážící řádově stovky tun, který by měl být zpožděn o jednotky sekund, na úkor těžkého nákladního vlaku vážícího až tisíce tun, který bude zpožděn až v řádu minut či dokonce hodin. Takové řešení dopravní situace není vhodné z pohledu kapacity dopravní cesty, požadavků dopravce ani z hlediska spotřeby trakční energie.

2.3 Zahraniční trendy řízení provozu

Zahraniční trendy řízení železničního provozu byly autorem analyzovány v rámci studie [33]. V řadě sledovaných zemí dochází k centralizaci řízení a zabezpečení provozu. Obdobně jako v ČR jsou starší zabezpečovací zařízení nahrazována moderními elektronickými stavědly. Jejich zadávací úroveň je centralizována do větších řídicích center, z nichž jsou ovládány ucelené části tratí a uzlů. Postupně jsou implementovány systémy umožňující automatizaci přímého řízení – stavění vlakových cest (většinou formou zásobníku bez vyšší inteligence).

U některých významných železničních správců infrastruktury dochází k výraznému posílení úrovně operativního řízení. Implementují se moderní systémy (např. RCS¹¹), které umožňují dispečerovi ve svěřené oblasti reagovat na aktuální odchylky od naplánovaného jízdního řádu tak, že mu na základě znalostí infrastruktury a jejich stavů, na základě znalosti o vozidlech (trakční charakteristiky, zátěž) a na základě znalosti provozní situace umožňují:

- v řádu hodin až minut před realizací vyřešit všechny konflikty jízdního řádu,
- sestavit optimální provozní program a tento předat přímému řízení provozu,
- efektivně a automaticky řešit informovanost všech zúčastněných subjektů (včetně cestujících) okamžitou úpravou predikce jízdy vlaků,
- detekovat problematiku ohrožených přípojných vazeb a činit rozhodnutí v součinnosti s konkrétními dopravci.

Preferuje se, aby výše uvedené funkce predikce polohy vlaků a řešení konfliktů v jejich jízdách byly řešeny v celosíťovém rozsahu. Dále se rozvíjejí algoritmy, které umožňují automaticky řešit detekované konflikty v jízdách vlaků.

Ve Švýcarsku dominantní správce infrastruktury SBB využívá již několik let v provozu systém Integriertes Leit und Informationssystem (dále ILTIS), který je nadstavbou elektronických stavědel i starších reléových stavědel a tvoří rozhraní s obsluhou zabezpečovacího zařízení. Umožňuje automaticky stavět vlakové cesty podle předem naplánovaných tras vlaků, dodržovat sled vlaků a zachovávat závislost mezi jednotlivými vlaky vzhledem k jejich aktuální poloze. Zároveň poskytuje rozhraní pro systém RCS, určený pro operativní řízení.

Systém RCS přijímá od systému ILTIS informace o poloze vlaků a stavu infrastruktury a neustále přepočítává predikci polohy vlaků v závislosti na aktuální trakční charakteristice vozidla, sestavě

¹¹ Rail Control System (RCS) společnosti CSC Switzerland, implementován na síti švýcarského správce infrastruktury SBB, po úpravách na síti belgického správce infrastruktury Infrabel a nově má být implementován na síti německého správce infrastruktury DB.

vlaku a poměrech trati. Vyhledává konflikty a upozorňuje obsluhu na nutnost jejich řešení. Zohledňuje obsazení staničních kolejí a jednotlivých pojížděných úseků infrastruktury, oběhy hnacích vozidel i souprav, zachování přípojných vazeb na základě požadavků dispečera i jednotlivé typy výluk. Výstupem je přesný a bezkonfliktní plán, který je podkladem pro automatizované stavění cest systémem ILTIS.

2.4 Automatizace řízení vozidla

Z hlediska automatizace v procesu řízení vozidla je významný systém Automatického vedení vlaku¹² (AVV), kterým jsou v ČR vybavována některá vozidla, především na příměstských tratích nasazené jednotky řady 471. Jedná se o systém, který výrazně usnadňuje činnost strojvedoucího a optimalizuje jízdu vlaku s ohledem na dodržení jízdního řádu a minimalizaci spotřeby trakční energie. AVV je schopno výrazně snížit přímé provozní náklady. Jeho nasazení však není v současných podmínkách optimální především z důvodu nedostatečných informací z infrastruktury. Proměnné rychlostní profily, odvozené od návěstního pojmu návěstidla, systém získává na kódovaných tratích (vybavených systémem LVZ) prostřednictvím vlakového zabezpečovače a na nekódovaných tratích obsluhou klávesnice návěstních znaků. I na kódovaných tratích nejsou poskytované informace optimální, protože současný vlakový zabezpečovač je schopen přenést pouze čtyři návěstní pojmy. Navíc informace o návěstním pojmu jsou přenášeny pouze od nejbližšího návěstidla a takto krátká vzdálenost není vhodná pro optimalizaci jízdy vozidla.

U zahraničních dopravců dosud nebyly obdobné systémy nasazeny v takovém rozsahu jako v případě ČR. Určitou míru optimalizace jízdy vozidla lze spatřovat v zasílání textových zpráv strojvedoucímu o aktuální požadované rychlosti v daném úseku trati, které jsou generovány z řídicích systémů pro optimalizaci řízení provozu (především v úrovni operativního řízení).

Vývoj systémů obdobných AVV je veden pod označením ATO¹³. Takové systémy je nutné považovat za automatizační a optimalizační, jejichž smyslem je automatizace vybraných činností strojvedoucího a optimalizace jízdy z hlediska dodržení požadované trajektorie jízdy definované infrastrukturní částí systému optimalizace řízení provozu – ta určuje, v jaký čas a v jakém místě se má vlak nacházet s ohledem na jeho parametry. Tyto systémy, na rozdíl od systémů ATP¹⁴, nezajišťují bezpečnost jízdy.

¹² Produkt firmy AŽD Praha

¹³ Automatic Train Operation – systém optimalizace řízení vozidla

¹⁴ Automatic Train Protection – vlakový zabezpečovač

2.5 Interoperabilita

Obecný význam interoperability spočívá ve schopnosti různých systémů vzájemně spolupracovat. Z pohledu železniční dopravy se jedná o schopnost zajistit bezpečný a plynulý pohyb vlaků v mezinárodním měřítku. Postupně byly sjednocovány vybrané parametry vozidel, nejprve na dvoustranné úrovni, později na vícestranné. Do mezinárodní standardizace výrazně zasáhl vznik Mezinárodní železniční unie (UIC) v roce 1922, který v celosvětovém měřítku zahájil proces sjednocování nejen technických parametrů infrastruktury a vozidel, ale i pravidel řízení a zabezpečení provozu a poskytování služeb.

Proces standardizace v Evropě dále výrazně ovlivnila Evropská komise, která přijala technická opatření interoperability schválením Směrnice Rady 96/48/ES ze dne 23. července 1996 o interoperabilitě transevropského vysokorychlostního železničního systému a směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/16/ES ze dne 19. března 2001 o interoperabilitě transevropského konvenčního železničního systému. Obě směrnice byly sloučeny vydáním Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/57/ES ze dne 17. června 2008 o interoperabilitě železničního systému ve Společenství, která byla následně nahrazena Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2016/797 ze dne 11. května 2016 o interoperabilitě železničního systému v Evropské unii.

Směrnice (EU) 2016/797 [19]: „stanoví podmínky, které je třeba splnit pro dosažení interoperability v železničním systému Unie způsobem, který je v souladu se směrnicí (EU) 2016/798, s cílem vymezit optimální úroveň technické harmonizace, usnadnit, zlepšit a rozvíjet služby železniční dopravy v Unii a se třetími zeměmi a přispět k dokončení jednotného evropského železničního prostoru a postupného dosažení jednotného trhu. Tyto podmínky se týkají navrhování, výroby, výstavby, uvedení do provozu, modernizace, obnovy, provozování a údržby součástí tohoto systému a rovněž odborné způsobilosti, ochrany zdraví a bezpečnosti zaměstnanců, kteří se podílejí na provozu a údržbě tohoto systému.“

Pro účely Směrnice (EU) 2016/797 je železniční systém rozdělen na subsystémy:

- strukturální
 - infrastruktura
 - energie
 - traťové řízení a zabezpečení
 - palubní řízení a zabezpečení
 - kolejová vozidla

- funkční
 - provoz a řízení dopravy
 - údržba
 - využití telematiky v osobní a nákladní dopravě.

Pro každý subsystém jsou vypracovány technické specifikace pro interoperabilitu. Analýza prvků interoperability byla provedena v rámci [35] a [37]. Z hlediska řízení provozu jsou významné především subsystémy řízení a zabezpečení, provoz a řízení dopravy a využití telematiky v osobní a nákladní dopravě.

2.5.1 Subsystém řízení a zabezpečení

Projekt ERTMS (European Rail Traffic Management) definovala Evropská komise v roce 1995 jako strategii pro vývoj Evropského systému řízení železniční dopravy s cílem připravit jeho budoucí implementaci na evropské železniční síti a přenesla ji do směrnice o interoperabilitě a následně do Technické specifikace pro interoperabilitu subsystémů „Řízení a zabezpečení¹⁵“ [23], jak pro vysokorychlostní, tak i konvenční evropský železniční systém. Projekt ERTMS řeší zejména oblasti:

- komunikace – projekt EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network), v rámci kterého byl specifikován systém GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway)
- zabezpečení – projekt ETCS (European Train Control System), který definuje jednotný evropský vlakový zabezpečovač

K zavedení ERTMS se zavazuje každý členský stát Evropské unie vydáním Implementačního plánu ERTMS. Na tratích SŽDC se uvažuje zavádění systému ETCS v aplikační úrovni 2 (dále ETCS L2), přičemž je budován jako nadstavba stávajících infrastrukturních zabezpečovacích zařízení. Pohyb vlaků je tak řízen stále v prostorových oddílech, systém ETCS slouží pouze pro kontrolu pohybu vlaku v rámci oprávnění k jízdě vydaném klasickým zabezpečovacím zařízením. Přičemž při zavedení výhradního provozu pod dohledem systému ETCS (všechna vozidla ve vybrané části infrastruktury jsou vybavena mobilní jednotkou) lze odstranit proměnná návěstidla. Rozsah tratí vybavených systémem ETCS je uveden v [20].

Princip dohledu systému ETCS L2 nad jízdou vlaku spočívá v nepřetržité komunikaci mezi vozidlem a infrastrukturou prostřednictvím radiové sítě. Vozidlo pohybující se pod dohledem systému ETCS

¹⁵ Subsystém Řízení a zabezpečení definovaný v 2008/57/ES byl s platností směrnice (EU) 2016/797 rozdělen na subsystémy traťové řízení a zabezpečení a palubní řízení a zabezpečení.

zasílá do RBC¹⁶ svoji polohu (poslední projetá balíza a ujetá vzdálenost od ní). RBC lokalizuje polohu vlaku v kolejišti a na základě stavu stávajících infrastrukturních zabezpečovacích zařízení (staniční, traťová a přejezdová) vydá oprávnění k jízdě – zašle statický rychlostní profil, sklonový profil a konec oprávnění k jízdě. Palubní část systému ETCS na základě dat z infrastruktury a znalosti parametrů vlaku vypočte dynamický jízdní profil a kontroluje, že vozidlo nepřekročí rychlost stanovenou tímto profilem. Zavedením systému ETCS se výrazně zvýší bezpečnost železničního provozu. Z hlediska řízení provozu v prostředí ČR nemá samotný systém ETCS L2 výrazný vliv – provoz je i nadále řízen prostřednictvím stávajících infrastrukturních zabezpečovacích zařízení. Výhodu přináší nepřetržitá komunikace mezi infrastrukturou a vozidlem, která umožní zlepšit predikci jízdy vlaku na základě sledování přesné polohy a rychlosti jednotlivých vlaků a zároveň přenášet dodatečné informace pro systémy ATO.

Nově se uvažuje o strategii vybavování tratí s nižší intenzitou provozu i systémem ETCS aplikační úrovně 1 (dále ETCS L1). V této úrovni systému ETCS jsou proměnné informace mezi infrastrukturou a vozidlem přenášeny pouze ve vybraných místech infrastruktury prostřednictvím přepínatelných balíz¹⁷, které jsou jednotkou LEU¹⁸ provázány se stávajícími infrastrukturními zabezpečovacími zařízeními. Omezená možnost přenosu dat mezi infrastrukturou a vozidlem omezuje aktualizaci oprávnění k jízdě.

V rámci projektu ERTMS je uvažováno i s ETCS aplikační úrovně 3 (dále ETCS L3), který je založen na principu vybavenosti všech vozidel pohybujících se po infrastruktuře palubní jednotkou ETCS a nepřetržité komunikaci s RBC. Infrastrukturní část systému ETCS nevyžaduje vybavenost infrastruktury stávajícími zabezpečovacími systémy, oprávnění k jízdě vydává na základě znalosti polohy všech vozidel v řízené části infrastruktury. Před implementací této úrovně systému ETCS musí být dořešena některá rizika spojená s absencí detekčních prostředků.

Bližší informace o principech systému ETCS jsou uvedeny v Subset 026 [3] a další technické a funkční požadavky v navazujících subsetech.

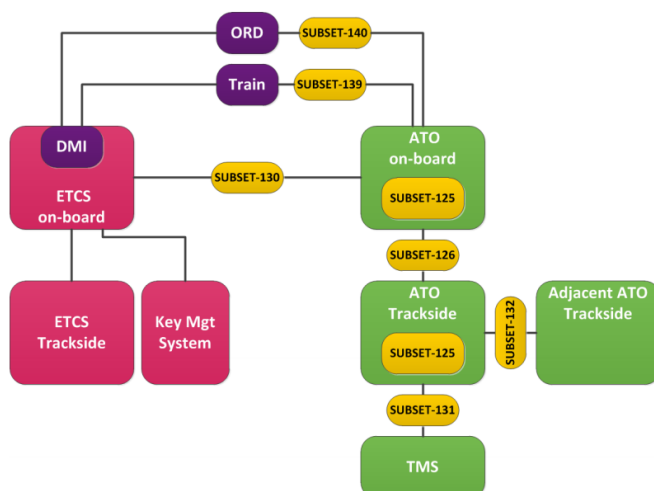
V současné době probíhá proces standardizace [21] přenosu informací mezi infrastrukturní a palubní částí systému ATO (Subset 126) a mezi systémy ATO a ATP na palubě vozidla (Subset 130).

¹⁶ Radio Block Centre – infrastrukturní část systému ETCS, koncentrující data o poloze vlaků a informace od infrastrukturních zabezpečovacích zařízení

¹⁷ Výjimku tvoří tzv. „in-fill“ přenos informací

¹⁸ Lineside Electronic Unit

Jedná se o automatizační nadstavbu systému ETCS, tzv. ATO over ETCS, jehož požadavky jsou definovány v Subset 125.



Obrázek 3: Architektura ATO over ETCS

Zdroj: [22]

2.5.2 Subsystem provoz a řízení dopravy

Technická specifikace pro interoperabilitu týkající se subsystému „provoz a řízení dopravy“ [24] obsahuje společná provozní pravidla a pravidla pro řízení dopravy.

Stanovuje především pravidla provozování sítě a kvalifikace strojvedoucích, obsluhy vlaku a zaměstnanců řízení provozu. Definuje požadavky vztahující se jak na zaměstnance provozovatele dráhy, tak i dopravce, řeší zejména požadavky na dokumentaci a komunikaci.

Stanovuje požadavky na dokumentaci pro strojvedoucí, která musí zohledňovat provoz za normálních, zhoršených a nouzových situací na tratích, kde se bude vlak provozovat, a pro provoz kolejových vozidel používaných na těchto tratích. Všechny nezbytné postupy pro strojvedoucí musí být zahrnuty v dokumentu nebo na počítačovém médiu s názvem „Pravidla pro strojvedoucí“. Strojvedoucí musí obdržet popis tratí včetně traťového vybavení. Všechny informace musí být uvedeny v jediném dokumentu s názvem „Tabulky traťových poměrů“ a musí zahrnovat všeobecné provozní vlastnosti, popis podélných sklonů a podrobné informace o trati. Strojvedoucí musí mít k dispozici jízdní řád, který obsahuje identifikaci vlaku, dny, ve které vlak jezdí, body zastavení (včetně případného popisu činností), další časové body včetně příjezdu, odjezdu a délky pobytu.

Dále specifikace stanovuje dokumentaci pro zaměstnance správce infrastruktury podílející se na řízení a zabezpečení provozu, a komunikaci mezi doprovodem vlaku a zaměstnanci řízení provozu.

Z hlediska vlaků stanovuje požadavky:

- viditelnost vlaku – označení začátku a konce vlaku
- slyšitelnost vlaku
- identifikaci vozidel
- řazení souprav
 - délka vlaku nesmí překročit maximum přípustné pro odesílací a přijímací terminály,
 - hmotnost nesmí překročit přípustnou hmotnost pro daný úsek trati, pevnost spřáhel, tažnou sílu
 - maximální možná rychlost vlaku musí zohledňovat veškerá omezení na příslušném úseku trati, brzdový účinek, hmotnost na nápravu a typ vozidla
 - kinematický obrys nesmí u žádného z vozidel (včetně případného nákladu) ve vlaku překročit maximální přípustný limit pro daný úsek trati
- brzdění vlaku
 - všechna vozidla vlaku musí být napojena na samočinnou průběžnou brzdu
 - první a poslední vozidlo (včetně hnacích vozidel) ve všech vlacích musí mít funkční samočinnou brzdu (v případě, že se vlak náhodou rozdělí na dvě části, musí se obě rozpojené soustavy vozidel automaticky zastavit v důsledku maximálního účinku brzdy)
- viditelnost návěstidel a značení podél trati – strojvedoucí musí být schopen vidět návěstidla a značení podél trati; návěstidla a značení musejí být pro strojvedoucího viditelná v situacích, kdy strojvedoucí musí návěstidla a značení respektovat
- zařízení pro kontrolu bdělosti strojvedoucího – musí zasáhnout tak, že vlak zastaví, pokud strojvedoucí v určitém čase nereaguje
- kontroly a zkoušky před odjezdem – dopravce musí stanovit kontroly a zkoušky s cílem zajistit, aby každý odjezd byl bezpečný (např. dveře, náklad, brzdy)

Přílohy specifikace pak obsahují metodiku komunikace související s bezpečností, jazyk a komunikační úroveň zaměstnanců, minimální požadavky na odbornou způsobilost atd.

Z hlediska samotného řízení provozu nedefinuje konkrétní požadavky na řešení konfliktů v jízdách vlaků a optimalizaci řízení provozu.

3 Cíle disertační práce a předpoklady pro její řešení

Cíle disertační práce vycházejí ze Studie k disertační práci [38] a jsou dále upřesněny na základě provedené analýzy stávajícího způsobu řízení provozu v kapitole 2 této práce. V rámci provedené analýzy byly identifikovány oblasti, jejichž změnou se předpokládá zlepšení parametrů železničního systému.

Návrh řešení disertační práce vychází z předpokladu, že je stanoven bezkonfliktní grafikon vlakové dopravy – v rámci tvorby ročního jízdního řádu je sestaven GVD, který jednoznačně definuje trasu vlaku v prostoru i času, aniž by se jízdy jednotlivých vlaků vzájemně ovlivňovali. Tím je jednoznačně dáno optimum, ke kterému má řízení provozu směřovat. Přidělení ad-hoc trasy bude v souladu se Směrnicí SŽDC č. 70 a zároveň přidělená trasa bude bezkonfliktní z hlediska ostatních aktuálně platných tras. Takto je systém definován v kapitole 2.1.

Nebude převzata stávající struktura řízení provozu s kompetencemi jednotlivých účastníků řízení provozu a komunikačním řetězcem strojvedoucí – dispečer dopravce – provozní dispečer – výpravčí podle kapitoly 2.2.1. Na základě zahraničních zkušeností se zvýší úloha operativního řízení provozu. V návrhu řešení bude představena nová architektura řízení provozu, budou definována rozhraní mezi jednotlivými úrovněmi řízení a stanoveny funkce jednotlivých úrovní řízení.

Při návrhu systémů pro podporu řízení provozu lze vyjít ze stávajících telematických aplikací pokrývajících oblast plánování tras (ať už ve fázi ročního jízdního řádu nebo ad-hoc tras), poskytování informací o parametrech vlaků a sledování jízd vlaků, viz kapitolu 2.2.2.1. V oblasti operativního řízení provozu je nutné rozšířit řídicí systémy o funkce predikce jízd vlaků, detekce konfliktů, případně návrhu optimálního řešení dopravní situace. Návrh řešení definuje požadavky na tyto funkce a začlení je do navržené architektury řízení provozu. Samotnou oblastí pak je stanovení optimalizačních kritérií.

Přestože na síti SŽDC se zatím stále uvažuje o implementaci systému ETCS pouze v aplikační úrovni 2 (případně v aplikační úrovni 1), viz kapitolu 2.5.1, zahraniční vývoj systémů řízení a zabezpečení směřuje k implementaci aplikační úrovně 3. Proto z pohledu vybavenosti infrastruktury je v rámci návrhu řešení uvažováno především s infrastrukturou vybavenou systémem ETCS aplikační úrovně 3, která se vyznačuje flexibilním řízením provozu. Princip spočívá ve vybavení všech vozidel pohybujících se po vyhrazené části infrastruktury mobilní jednotkou ETCS. Oprávnění k jízdě vydává infrastrukturní část systému ETCS na základě znalosti polohy těchto vlaků. Vydání oprávnění k jízdě není vázáno na pevné prostorové oddíly, ale může být vydáno do libovolného místa infrastruktury. Tento princip, uplatněný na konvenční železniční síti, vyžaduje odlišný přístup k řízení a zabezpečení

provozu. V návrhu jsou představeny základní funkce systémů řízení a zabezpečení spočívající na principu flexibilního řízení.

Ve složitějších stanicích, kde je nutno uvažovat s rozsáhlejším posunem a odstavováním vozů, se z důvodu zajištění bezpečnosti provozu, resp. eliminace rizik, předpokládá využití klasického způsobu řízení provozu v prostorových oddílech, kdy jsou použity detekční prostředky. Návrh řešení pak uvažuje s vybaveností infrastruktury zabezpečovacími zařízeními 3. kategorie, definovanými v [9], a vlakovým zabezpečovačem ETCS aplikační úrovně 2.

Předpokládá se, že infrastruktura je vybavena komunikační sítí s dostatečnou kapacitou pro spolehlivý a bezpečný přenos informací mezi vozidlem, vnějšími prvky infrastruktury a systémy řízení a zabezpečení. Tato síť umožňuje centralizované i decentralizované dálkové ovládání zabezpečovacího zařízení a přenos informací pro řízení provozu mezi jednotlivými subjekty v rámci celé sítě.

Dalším předpokladem pro návrh řešení je vybavení všech vozidel systémem ATO, viz kapitolu 2.4. Z hlediska řízení provozu je uzavřena zpětná smyčka řídicího procesu, kdy predikce jízdy vlaku je korigována skutečnou jízdou vlaku a současně aktuální jízda vlaku je korigována vypočítaným modelem. To umožní podstatně přesnější řízení provozu, což vede ke zvýšení kapacity dopravní cesty a zároveň snížení spotřeby trakční energie. Jednotlivé vlaky lze navádět do požadovaných časových trajektorií – tím se omezí počet jejich zastavení z důvodu konfliktu s jinými vlaky.

Celý návrh řešení není v rozporu s požadavky interoperability, uvedenými v kapitole 2.5.

4 Návrh řešení

Navrhované řešení by mělo směřovat především ke zvýšení kapacity dopravní cesty, které lze dosáhnout optimálním řešením konfliktů v jízdách vlaků a udržováním vlaků v požadovaných časových polohách, a zatraktivnění železniční dopravy cestujícím a zákazníkům v nákladní dopravě poskytováním včasných, reálných a kompletních dopravních informací, což jim umožní lepší rozhodování pro uplatnění svých požadavků.

Pro dosažení výše uvedených cílů se navrhuje provést změny ve struktuře a technologických postupech řízení železničního provozu a implementovat IT podporu v jednotlivých úrovních řízení.

V rámci návrhu řešení jsou sledovány dvě linie (v souladu s předpoklady uvedenými v kapitole 3):

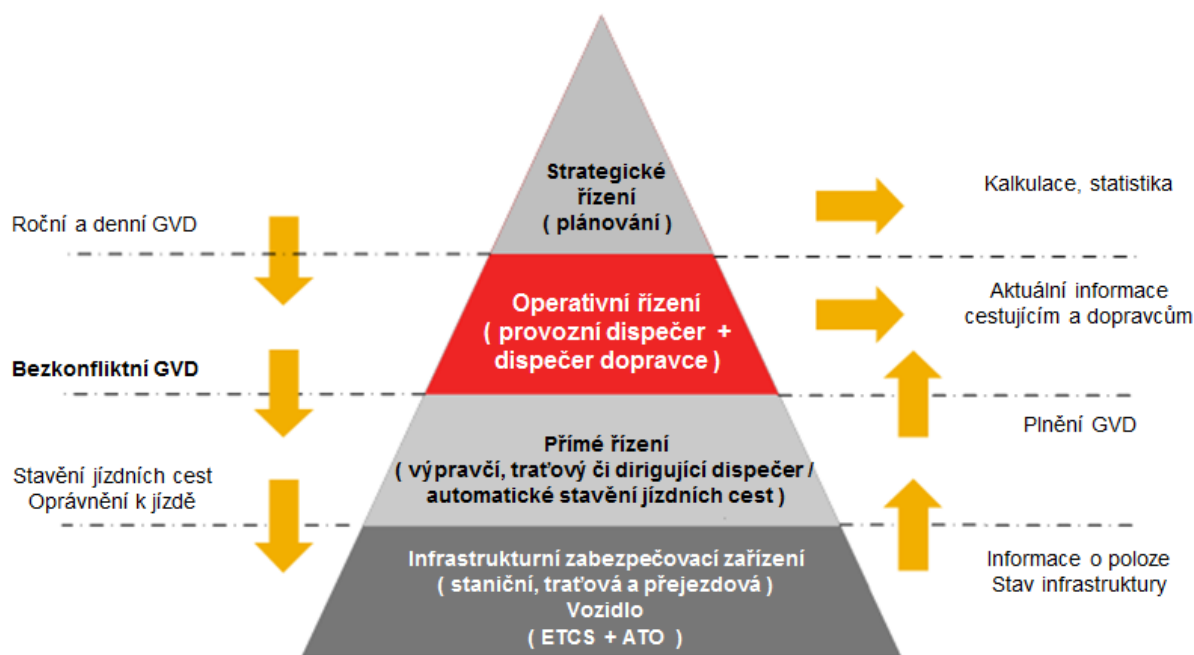
- řízení provozu klasickým způsobem – jízdy vlaků jsou řízeny v prostorových oddílech s využitím stávajících (modernizovaných) zabezpečovacích zařízení
- řízení provozu flexibilním způsobem – oprávnění k jízdě je vydáváno na základě znalosti polohy všech vlaků ve vyhrazené části infrastruktury

4.1 Architektura řízení provozu

4.1.1 Definice úrovní řízení provozu

Na základě poznatků získaných analýzou zahraničních trendů řízení železničního provozu v rámci studie [33] se doporučuje oddělit činnosti plánování tras vlaků, řešení konfliktů v jízdách vlaků způsobených narušením naplánovaného grafikonu vlakové dopravy a zabezpečení jízd vlaků. S tímto cílem je definována nová architektura řízení provozu, vztažená k podmínkám v ČR. V rámci uvedené studie jsou prvně zavedeny pojmy strategické, operativní a přímé řízení v níže uvedeném kontextu.

Za **strategické řízení** se považuje především přidělení trasy vlaku v rámci plánování grafikonu vlakové dopravy. Strategické řízení lze rozdělit na dlouhodobé a krátkodobé strategie. V rámci dlouhodobých strategií lze uvažovat plánování ročních jízdních řádů, plánů výluk, ale také stanovení pravidel pro řízení provozu, např. priority vlaků, podmínek pro přístup na infrastrukturu, stanovení poplatků za využití dopravní cesty atd. V rámci krátkodobého strategického řízení jsou přidělovány ad-hoc trasy, plánovány výluky a zajišťovány další činnosti vztahující se k dennímu Plánu vlakové dopravy.



Obrázek 4: Navrhovaná architektura řízení provozu
Zdroj: autor

Řízení železničního provozu lze považovat za deterministicky určenou úlohu, kdy jízdy vlaků jsou realizovány podle předem naplánovaného grafikonu vlakové dopravy. Nicméně vlivem vnějších vlivů dochází k vychýlení systému. Cílem **operativního řízení** je pak snaha co nejvíce se přiblížit k definované trajektorii chování, tedy předem naplánovanému GVD. Operativní řízení rozhoduje, v úzké spolupráci s dispečery jednotlivých dopravců, o sledu vlaků v případě narušení naplánovaného GVD a vzniku konfliktů mezi jízdami jednotlivých vlaků. Nicméně dispečerů operativního řízení nevykonávají přímé řízení, tedy ovládání prvků v infrastruktuře.

Základnu řízení železničního provozu tvoří **přímé řízení**, což je souhrn činností, pro zabezpečení jízdy vlaků, posunu v obvodu dopravní s koleje rozvětvením, posunu mezi dopravními atd. Cílem této úrovně řízení je přímé ovlivňování prvků infrastruktury pro zabezpečení jízdy vozidel. Tato úroveň je zastoupena výpravčími v jednotlivých dopravních a jejich přímými podřízenými (signalisté, výhybkáři, závoráři, hláskáři, hradlaři atd.) v případě klasického řízení železničního provozu, respektive traťovými dispečery v případě dálkového řízení.

Oddělení činností operativního řízení – tedy monitorování aktuální polohy vlaků s predikcí jejich jízdy, detekce konfliktů v jejich jízdách a návrh optimálního řešení, od přímého řízení – tedy zajištění bezpečné jízdy vlaků, organizace a realizace posunu v dopravních a dalších úkonů prostřednictvím ovládání zabezpečovacího zařízení, umožní dispečerům v těchto úrovních kvalitněji vykonávat jednotlivé činnosti.

Dispečer v úrovni operativního řízení nebude zatěžován vykonáváním rutinních úkonů v podobě stavění jízdních cest či jiné obsluhy zabezpečovacího zařízení. Tím může svoji pozornost zaměřit na monitorování aktuální dopravní situace a řešení konfliktních situací. O změně sledu vlaků může rozhodnout, aniž by musel s realizací svého rozhodnutí čekat, kdy mu poloha vlaků umožní změnit jejich sled obsluhou prvků v infrastruktuře.

Předáváním dispozic od operativního řízení je přímé řízení oproštěno od řešení sledu jízdy vlaků, zajišťuje především bezpečnost železničního provozu v případech, kdy to stav zabezpečovacího zařízení či jiné okolnosti vyžadují (porucha zabezpečovacího zařízení nebo vnějších prvků v kolejišti, zaústění tratě s nižší kategorií zabezpečovacího zařízení, zajištění bezpečnosti pracovníků údržby nebo cestujících v případech úrovnového přístupu na nástupiště). Součástí přímého řízení je i organizace posunu a stavění posunových cest.

4.1.2 Kompetence úrovní řízení provozu

V rámci nově definované architektury řízení provozu jsou upraveny pravomoci a povinnosti dispečerů v rámci jednotlivých úrovní řízení provozu – dispečer strategického řízení, operativního řízení a přímého řízení.

Dispečer strategického řízení provozu zajišťuje tvorbu Plánu vlakové dopravy, resp. krátkodobého GVD, konkrétně činnosti zavádění a odříkání vlaků. Před vydáním Souhlasu s jízdou konkrétního vlaku ověří, zda aktuální parametry vlaku a stav infrastruktury umožní plnění naplánovaných jízdních dob přidělené trasy v dlouhodobém GVD. V případě možnosti krácení jízdních dob naplánovanou trasu zachová a jízdní doby jsou pak prodlužovány jízdou se sníženým výkonem hnacího vozidla. V případě, že naplánované jízdní doby mohou být vzhledem k parametrům vlaku výrazně kráceny a zároveň by z důvodů omezení na straně infrastruktury bylo vhodné tyto doby krátit, může dispečer strategického řízení v koordinaci s dopravcem upravit naplánovanou trasu. Naopak při nemožnosti dodržení naplánovaných jízdních dob musí být přidělená trasa zrušena a naplánována trasa nová, v součinnosti s dopravcem, podle aktuálních parametrů vlaku. Dopravce pak musí definovat pro nově přidělenou trasu všechny technologické úkony na vlaku a přípojné vazby (viz kapitola 4.3.1.2.4).

Zároveň dispečer strategického řízení zodpovídá za naplánování přidělované ad-hoc trasy tak, aby nebyla v konfliktu s jinými vlaky dle aktuální provozní situace.

Dispečer strategického řízení je zodpovědný, že všechny aktivované trasy dlouhodobého GVD a nově přidělené ad-hoc trasy jsou v době vydání Plánu vlakové dopravy bezkonfliktní. Tím je dán jednoznačně podklad pro operativní řízení, resp. je stanoveno optimum, ke kterému má operativní řízení směřovat.

Strategické a operativní řízení úzce spolupracuje v případě neplánovaných výluk a dalších provozních mimořádností, především v případě plánování odklonových tras. Dispečer strategického řízení by měl v co nejvyšší možné míře plánovat odklonové trasy tak, aby byly bezkonfliktní, avšak vzhledem ke krátkému časovému horizontu to není nezbytnou podmínkou.

Dispečer operativního řízení je zodpovědný za průběžné řešení konfliktů v jízdách vlaků od vydání Plánu vlakové dopravy do okamžiku předání přímému řízení. K předání zodpovědnosti za řízení vlaku mezi operativním a přímým řízením dochází průběžně ve stanovenou dobu (např. 10 min) před plánovaným průjezdem vlaku určitými místy infrastruktury (ty jsou definovány prvky, jejichž ovládání je v kompetenci konkrétního dispečera přímého řízení).

Dispečer operativního řízení koordinuje řízení provozu s dispečery dopravců, kteří u něj mohou uplatňovat požadavky na jízdu svých vlaků. V případě vzájemně kolidujících požadavků dvou různých dopravců vždy rozhoduje o řešení dopravní situace dispečer operativního řízení. Obecně dbá na uplatňování stanovených optimalizačních kritérií, viz kapitolu 4.2, a požadavků na řízení sledu vlaků stanovených v předpisech [5] a [7]. V rámci operativního řízení provozu je nezbytné odstranit všechny konflikty v jízdách vlaků. V případě, že jízdní cesta je v konfliktu s kteroukoliv jinou jízdní cestou, nesmí být dále předána úrovni přímého řízení.

Dispečer přímého řízení provozu by již neměl zasahovat do sledu vlaků, není-li to nezbytné z hlediska bezpečnosti provozu. V takovém případě je nezbytné v první řadě odvrátit hrozící nebezpečí, následně situaci konzultovat s operativním řízením provozu. V situacích vzniku nepředpokládaného výrazného zpoždění některého z vlaků dispečer přímého řízení situaci konzultuje s dispečerem operativního řízení. Změnit naplánovanou dopravní situaci bez svolení dispečera operativního řízení může pouze v případě, že neovlivní stanovený sled vlaků.

Zodpovědností přímého řízení je především zajistit bezpečnost železničního provozu. Dispečer zodpovídá za splnění všech podmínek pro bezpečnou jízdu vlaku i v případech, kdy zabezpečovací zařízení není schopno plnit některé své funkce. Zároveň zajišťuje organizaci a řízení posunu, jízdy z/na vyloučené koleje a další činnosti související se zajištěním bezpečnosti při údržbě dráhy.

4.1.3 Návrh aplikace změn na stávající síť SŽDC

Stávající působnost operativního řízení na infrastruktuře SŽDC, zastoupena provozními dispečery, byla přesunuta do úrovně strategického řízení krátkodobého. Provozní dispečer i nadále zajišťuje tvorbu Plánu vlakové dopravy v souladu s požadavky uvedenými v kapitole 4.1.2.

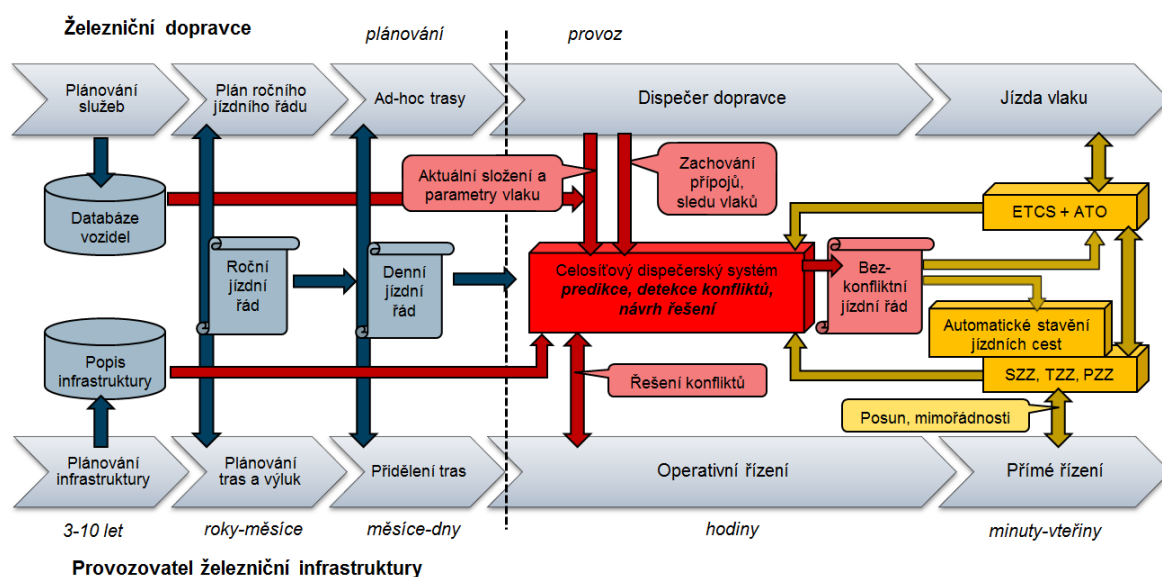
Naopak jsou provoznímu dispečerovi odebrány pravomoci a povinnosti za řízení sledu vlaků v rámci operativního řízení, tedy po vyhlášení Plánu vlakové dopravy. Tyto pravomoci a povinnosti jsou přeneseny operativnímu řízení definovanému podle kapitoly 4.1.1.

Operativní řízení zajišťuje samostatná část dispečerů, která je v rámci Centrálního dispečerského pracoviště na síti SŽDC vyčleněna ze stávajících traťových dispečerů¹⁹.

Dispečer operativního řízení sleduje aktuální provoz ve svěřené oblasti a reaguje na všechny odchylky od Plánu vlakové dopravy, které způsobují konflikt v jízdách vlaků. Je zodpovědný za jejich průběžné odstraňování v koordinaci s dispečerským aparátem dopravců až do okamžiku předání vlaku přímému řízení v souladu s požadavky uvedenými v kapitole 4.1.2.

4.1.4 Návrh struktury informačních systémů

Navrhovaná změna architektury řízení provozu vyžaduje i změnu struktury informačních systémů. Především byl posílen význam operativního řízení provozu. Tato změna vyžaduje vývoj IT aplikací, které koncentrují v úrovni operativního řízení informace o stavu infrastruktury, jízdách vlaků, požadavků dopravců, podporují rozhodovací procesy pro řízení provozu, zajišťují efektivní předávání dispozic přímému řízení a informovanost cestujících či zákazníků v nákladní přepravě.



Obrázek 5: Navrhovaná architektura informačních systémů
Zdroj: autor

¹⁹ Podle SŽDC D1 [5] je traťový dispečer společný název pro řídícího dispečera, úsekového dispečera a výpravčího DOZ

Obrázek 5 zachycuje informační toky v navrhované architektuře řízení provozu. Datové toky v úrovni strategického řízení jsou znázorněny modře, v úrovni operativního řízení červeně a v úrovni přímého řízení žlutě.

Centrální dispečerský systém získává informace o plánovaném provozu v řízené oblasti z aktuálně platného denního jízdního řádu (Plán vlakové dopravy). Do systému vstupují informace o aktuálních parametrech vlaků a požadavcích dopravce o zachování přípojů či sledu vlaků. Pro nezbytnou koordinaci požadavků mezi správcem infrastruktury a dopravcem musí být definováno rozhraní a formát datové výměny. Z úrovně přímého řízení vstupují do systému informace stavu vnějších prvků v infrastruktuře, zabezpečovacího zařízení nebo vozidel a další okolnosti, které mají vliv na stabilitu systému. Aplikace centrálního dispečerského systému tak může poskytovat dispečerovi operativního řízení reálný obraz o stavu řízené oblasti, automatizovaně identifikovat konflikty a předkládat návrh optimálního řešení dispečerovi k vyhodnocení a odsouhlasení. Dispečer operativního řízení tak může efektivně vyhodnotit a řídit železniční provoz.

Dispozice ve formě nekonfliktního řešení provozní situace GVD je provozními aplikacemi předána na úroveň přímého řízení, která je oproštěna od rozhodovacích procesů v řízení sledu vlaků. Činnost výpravčího tak spočívá kromě organizace a řízení posunu především v zajištění bezpečnosti, pokud to stav zabezpečovacího zařízení či jiné okolnosti vyžadují. Součástí přímé úrovně řízení jsou systémy automatizovaného stavění jízdních cest, které zajišťují ovládání prvků infrastruktury na základě bezkonfliktního jízdního řádu předaného centrálním dispečerským systémem.

Pro zvýšení přesnosti řízení provozu je nutné korigovat samotnou jízdu vlaků. Proto optimalizace řízení provozu zahrnuje krom ovládání prvků v infrastruktuře v podobě stavění jízdních cest i zásahy do řízení vozidla. Je proto vhodné vybavit vozidla nejen moderním vlakovým zabezpečovacím zařízením, ale rovněž systémy automatizovaného řízení – systémy ATO. Optimální trajektorie jízdy je pro všechny vlaky řešena v infrastruktuře. Systémy ATO regulují jízdu vozidla tak, aby definovanými dopravními body projelo přesně v čas stanovený centrálním dispečerským systémem. V případě mimořádností předává informace o své neprovozuschopnosti (např. při poruše trakčního motoru) nadřazenému systému, který na jejich základě upřesní predikci výhledové dopravy. Strategie jízdy, aktuální stav infrastruktury a další potřebné informace pro zjednodušení orientace strojvedoucího budou vhodně zobrazeny na displeji vozidla.

Informační systémy dopravců by měly obsahovat kontrolní mechanismy pro ověření zadávaných parametrů vlaků. Centrální dispečerský systém pak ověřuje soulad údajů poskytnutých dopravcem a údajů o parametrech vlaku vstupujících z palubních částí řídících (optimalizačních) a zabezpečovacích systémů, viz [36].

Data centrálního dispečerského systému jsou též využitelná pro přesnější informování cestujících. Informační tabule v železničních stanicích a aplikace pro cestující zobrazují predikované zpoždění v konkrétním dopravním bodě. Data se rovněž významně uplatní v dopravě nákladní, kdy dopravce a jeho zákazník bude mít přesnější informaci o dojezdu vlaku do cílové stanice.

Pro zajištění kompatibility dat pro jednotlivé úrovně řízení provozu i pro vzájemnou komunikaci mezi správcem infrastruktury a dopravci je nezbytné vytvořit jednotný model popisu infrastruktury, který bude k dispozici všem zúčastněným subjektům. Jeho rozhraní bude otevřené, aby každý subjekt mohl vyvíjet vlastní aplikace pro zajištění svých služeb. Doporučený model popisu infrastruktury je uveden v kapitole 4.5.

4.1.5 Kritéria pro stanovení hranic řízených oblastí

Působnost řízení provozu dle navrhované architektury by měla být aplikovaná v celosíťovém rozsahu. Neměly by být vyčleněny žádné tratě, které by mohly mít vazby dopravní či přepravní se zbytkem sítě. Všechny procesy řízení provozu, včetně výpočtu optimální varianty řešení dopravní situace, by měly být řešeny s ohledem na dopady v rámci celé sítě.

Je pochopitelné, že jeden dispečer nemůže řídit nekonečně dlouhý úsek infrastruktury. Délka tohoto úseku se odvíjí od množství technologických úkonů, které musí pro zajištění jízdy vlaku vykonat. Rozdělení dopraven podle vykonávaných činností a zátěže dispečerů je uvedeno v [30].

Podle charakteru topologie sítě a způsobu provozu na této infrastruktuře lze rozdělit oblasti s převažujícím řízením provozu v linii nebo uzlu.

Řízením provozu v linii je myšleno několik především mezilehlých stanic, případně menších odbočných stanic, s minimem technologických úkonů s jednotlivými vlaky. Primární činností dispečera je vhodně řídit sled vlaků na delším úseku tratě tak, aby bylo možné plně využít kapacity dopravní cesty a zároveň možností jednotlivých vlaků. Jedná se především o včasné předjíždění na dvoukolejně trati a vhodné křižování na jednokolejně trati.

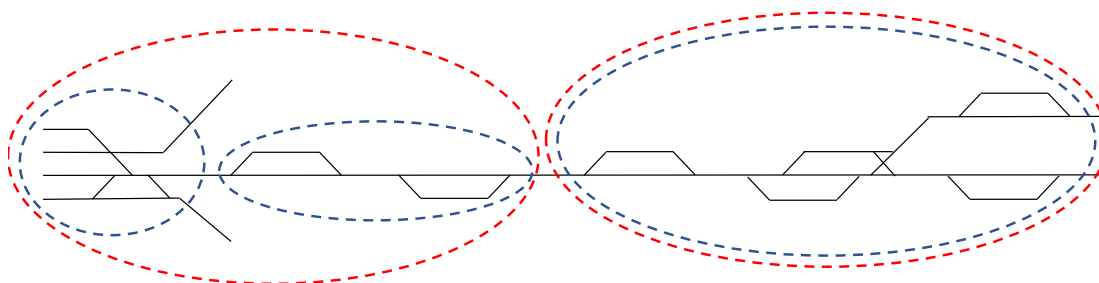
Naproti tomu řízení provozu v uzlu se vyznačuje řízením kratšího úseku tratí do sebe vzájemně zaústějících, s vyšším počtem technologických úkonů (zajištění přípojných vazeb, delší pobyty vlaků v železniční stanici, odstavení souprav či jejich přesun do obvodů stanic určených pro odstavování a čištění, objíždění hnacího vozidla nebo přepřah, spojování či rozpojování souprav).

Řízené oblasti napříč jednotlivými úrovněmi řízení definovanými v kapitole 4.1.1 nemusí být stejně rozsáhlé. Pod jednoho dispečera strategického řízení může spadat jedna či více oblastí dispečerů operativního řízení. Pod jednoho dispečera operativního řízení může spadat jedna či více oblastí dispečerů přímého řízení. Přitom oblast nižší úrovně řízení musí náležet vždy právě jedné vyšší

úrovni řízení provozu – uvnitř jedné oblasti přímého řízení nemůže být hranice oblastí operativního řízení, obdobně uvnitř jedné oblasti operativního řízení nemůže být hranice oblastí strategického řízení.

Hranice mezi jednotlivými oblastmi v rámci jedné úrovně řízení provozu by měla být volena v místech minimálního množství technologických úkonů a toku informací mezi jednotlivými oblastmi (přenášených ať už prostřednictvím aplikací informačních systémů nebo telefonicky či ústně). V ideálním případě má být středem řízené oblasti zvolen významný železniční uzel, na něj navazují jednotlivá ramena vstupujícího do tohoto uzlu. Pokud je to v možnostech dispečera, řídí uzel včetně přilehlých ramen. Hranice oblastí bude umístěna uprostřed linie mezi dvojicí významných uzlů. Pokud množství technologických úkonů převyšuje možnosti dispečera, řídí uzel osamoceně, přilehlá ramena jsou řízena jiným dispečerem, který řídí provoz v přilehlém rameni s ohledem na požadavky dispečera v uzlu (musí zajistit požadovaný sled vlaků vstupujících do uzlu).

Informační oblast musí vždy přesahovat řízenou oblast. Informační systémy musí poskytovat dispečerovi informace o provozu v přilehlé části sousední oblasti, pořadí a času vstupu vlaků do jeho řízené oblasti, a umožňovat vznášet požadavky na sled vlaků vstupujících do jeho oblasti (obzvláště v případech, kdy řízení uzlu a přilehlého ramene není možné vykonávat jedním dispečerem).



Obrázek 6: Příklad hranic řízených oblastí
Zdroj: autor

4.2 Kritéria optimalizace provozu

Kritéria optimalizace provozu by měla, dle navržené architektury řízení provozu, vycházet z pravidel a požadavků definovaných strategickým řízením provozu. Přestože činnosti strategického řízení provozu (související především s plánováním dlouhodobých GVD a dlouhodobých strategií ohledně kapacity dopravní cesty) nejsou zcela předmětem této disertační práce, jeho výstupy jsou bezprostředními vstupy operativního řízení, ať už se to týká Plánu vlakové dopravy, který určuje optimum pro řešení případných konfliktů v rámci operativního řízení, nebo strategií a pravidel pro řízení dopravy (optimalizační kritéria v rámci operativního řízení). Z těchto důvodů je nezbytné zabývat se tímto rozhraním a zároveň řešit některé oblasti strategického řízení, především optimalizačních kritérií, protože v současné době jsou pro nově navrhované systémy operativního řízení nedostačující.

4.2.1 Posouzení možných kritérií

Pro každé řešení optimalizační úlohy je nezbytné znát optimalizační kritérium – způsob hodnocení jednotlivých variant a požadavek na optimální stav (nejlepší vhodné řešení). V železničním provozu se střetávají zájmy několika subjektů – všichni mají společný cíl – aby jezdily vlaky po kolejích. Ale každý z těchto subjektů má jiný úkol a z toho důvodu plyne i jinak definovaný optimální stav. Uvedme příklad: z pohledu správce železniční infrastruktury, který má příjmy z poplatků za dopravní infrastrukturu, je optimem maximální kapacita dopravní cesty. Čím více vlaků projede železniční sítí, tím větší jsou příjmy z poplatků za použití dopravní cesty. Z pohledu dopravce je kapacita nutnou, nikoliv postačující podmínkou. Samozřejmě, bez dostatečné kapacity dopravní cesty nezíská dopravce trasu pro svůj vlak. Na druhou stranu, zájmem dopravce rozhodně není plné využití kapacity dopravní cesty. Spíše požaduje spolehlivost dopravní cesty a přesnost v plnění grafikonu – to jsou parametry, ve kterých železniční dopravci získávají výhodu oproti jiným dopravním módům. Nezanedbatelným požadavkem z hlediska dopravců je i rychlost dopravní cesty a plné využití vlastností svých vozidel. Jestliže první dva požadavky nejsou v přímém rozporu se zájmy provozovatele infrastruktury, v posledním uvedeném případě je to přesně naopak. Čím rozdílnější rychlosti jednotlivých vlaků na stejné trati jsou, tím je menší kapacita dopravní cesty. Se spolehlivostí dopravní cesty a přesností souvisí rezervy v kapacitě – opět protiklad maximálnímu využití kapacity. A v neposlední řadě přichází v úvahu energetické, případně ekologické hledisko. V současné době, kdy dopravce na síti SŽDC platí pouze za použití dopravní cesty, energetické hledisko se příliš nezohledňuje. Ovšem v případech, kdy je dopravcům účtována skutečně spotřebovaná elektrická energie, situace se výrazně změní. Pak už nezůstane bez odezvy zastavení těžkého nákladního vlaku kvůli tomu, že mu křížuje cestu osobní vlak tvořený krátkou elektrickou

jednotkou. Jak tedy definovat optimální řešení dopravní situace, když jednotlivé parametry jsou na sobě vzájemně závislé, v určitých případech se podporují, v jiných si vzájemně odporují?

Za optimalizační kritérium může být zvolena přesnost plnění naplánovaného grafikonu vlakové dopravy, pak je ale nutné definovat váhová kritéria jednotlivých vlaků (zde už zasahujeme do politiky nabídek jednotlivých dopravců), případně i váhová kritéria pro jednotlivé stanice. Podstatně objektivnější může být energetické kritérium, kdy lze poměrně přesně spočítat energetické ztráty. Lze volit i poměr těchto kritérií. V souvislosti s železničními přejezdy lze i zohlednit požadavek na minimalizaci doby uzavření přejezdů atd., viz [39].

V případě osobních vlaků převažuje požadavek na minimalizaci odchylek od naplánovaného jízdního řádu (zpoždění). Přičemž lze přiřadit váhová kritéria jednotlivým druhům vlaků, ale i dopravním bodům, v nichž má vlak zastavit. Časy průjezdu v dopravních bodech, kde vlak nezastavuje, nejsou podstatné. Lze tedy volit strategii jízdy i tak, že v určité části jízdy vlaku mezi dopravními body, kde vlak zastavuje, prodlužuje plánovanou jízdní dobu a v následné části jízdní dobu krátí, ovšem za předpokladu zvýšené spotřeby trakční energie.

Obdobně u nákladních vlaků může být zvýšený požadavek na dodržení naplánovaného příjezdu vlaku do stanice s úkonem na vlaku. Nicméně u některých nákladních vlaků může být větší důraz kladen na minimalizaci spotřeby trakční energie. V souvislosti s podstatně větší hmotností nákladních vlaků mohou být rozdíly ve spotřebě vzhledem ke strategii vedení vlaku dost výrazné. Otázkou tedy je, nakolik je možné nutit dopravce především nákladních vlaků, aby se v určité části trasy pohyboval na hranici nejvyšší dovolené rychlosti, tedy intenzivní zrychlení na hranici trakční charakteristiky (maximálního výkonu vozidla) a následného intenzivního brzdění.

4.2.1.1 Kritérium minimalizace hodnoty zpoždění

Je pochopitelné, že vlaky nutné pomocné a mimořádné v obecném zájmu budou mít i nadále absolutní přesnost. V ostatních případech je vhodné definovat váhová kritéria, zohledňující priority vlaků a jejich zpoždění v definovaných dopravních bodech. Přičemž prioritu nemusí nutně určovat pouze kategorie vlaku (popsaná ve Vyhlášce 173/1995 [11]), ale může se odvíjet od výše poplatku za dopravní cestu, kterou si jako volitelný parametr určí příslušný dopravce při objednání trasy. Pak i vnitrostátní nákladní vlak, jehož dopravce garantuje přepravu just-in-time, může mít v případě mimořádností vyšší prioritu než osobní vlak. Vhodné nastavení konstant váhového kritéria správcem infrastruktury pak ovlivní i využití kapacity dopravní cesty.

Rovněž je vhodné do váhového kritéria zahrnout i prioritu daného dopravního bodu. Dopravce nezajímá zpoždění vlaku v dopravních bodech, kterými projíždí. Pro osobní vlaky je rozhodující zpoždění v dopravních bodech, kde vlak zastavuje pro výstup a nástup cestujících. Přičemž i zde se

dá uvažovat s rozdílnou hodnotou priority. Ve velkých dopravních uzlech s vysokou intenzitou cestujících má zpoždění vlaku rozhodně větší význam než v malých nácestných stanicích, případně v cílové stanici, kam vlak zajíždí spíše z dopravních důvodů. V případě nákladních vlaků jsou rovněž významné pouze definované dopravní body, kde probíhají úkony na vlaku (předání vlaku k nakládce a vykládce, výměna strojvedoucích, rozřazení vozů atd.).

Pro každou variantu řešení dopravní situace se vypočítá celkové zpoždění, které je dáno součtem poměrných zpoždění jednotlivých dotčených vlaků. Poměrné zpoždění vlaku je dáno jako součet vážených zpoždění vlaku dělený počtem započítaných dopravních bodů pro daný vlak. Vážené zpoždění vlaku v daném bodě odpovídá hodnotě zpoždění násobené prioritou vlaku a prioritou dopravního bodu.

$$z_c = \sum_{v \in v_{ro}} p_{z_v}$$

kde:

$$\begin{array}{ll} z_c & \text{celkové zpoždění v řízené oblasti [s]} \\ v_{ro} & \text{vlaky řízené oblasti \{-\}} \\ p_{z_v} & \text{poměrné zpoždění vlaku [s]} \end{array} \quad (1)$$

$$p_{z_v} = k_v * \frac{1}{|d_v|} \sum_{d \in d_v} z_{vd} * k_{vd}$$

kde:

$$\begin{array}{ll} k_v & \text{koeficient priority vlaku [-]} \\ d_v & \text{množina dopravních bodů daného vlaku \{-\}} \\ z_{vd} & \text{zpoždění vlaku v dopravním bodě [s]} \\ k_{vd} & \text{koeficient významnosti dopravního bodu pro daný vlak [-]} \end{array} \quad (2)$$

Toto kritérium může mít dvě modifikace – uvažuje se:

- absolutní hodnota zpoždění – hodnota zpoždění, vstupující do výpočtu váženého zpoždění, odpovídá rozdílu času podle Plánu vlakové dopravy a aktuálně přepočítanému času průjezdu daným místem. Algoritmus bude preferovat výrazně zpožděné vlaky a má tendenci plně směřovat k Plánu vlakové dopravy;

$$z_{vd} = \max(p_{vd} - g_{vd}, 0)$$

kde:

$$p_{vd} \quad \text{predikovaný příjezd vlaku do dopravního bodu [s]} \quad (3)$$

$$g_{vd} \quad \text{stanovený příjezd vlaku do dopravního bodu podle GVD [s]}$$

pozn.: náskok vlaku se při výpočtu nezohledňuje

- relativní hodnota zpoždění – hodnota zpoždění, vstupující do výpočtu váženého zpoždění, vychází z výše uvedené absolutní hodnoty zpoždění, ale je snížena o hodnotu zpoždění na vstupu do řízené oblasti. Algoritmus má tendenci nezvyšovat zpoždění vlaků v rámci řízené oblasti.

$$z_{vd} = \max(p_{vd} - g_{vd} - z_v, 0)$$

kde:

(4)

$$z_v \quad \text{zpoždění vlaku na vstupu do řízené oblasti [s]}$$

Hledání optimálního řešení dopravní situace spočívá v nalezení varianty s minimální hodnotou celkového zpoždění. Přitom je nutno zohlednit i vazby mezi jednotlivými vlaky, ať už se jedná o přestupní vazbu, nebo obrat soupravy či střídání strojvedoucího a vlakové čety, které se projeví šířením zpoždění navazujících vlaků.

4.2.1.2 Kritérium spotřeby trakční energie

Každé změny v plánovaném GVD způsobí odchylku od ideálně naplánované jízdní trajektorie. Od vozidla se očekává, aby v některých úsecích využívalo vyšší výkon a tím se využilo plánované rezervy ke zkrácení jízdní doby. V jiných případech se nutí vozidlo mimořádně zastavit s následnou značnou spotřebou trakční energie při rozjezdu. Výše uvedené kritérium zohledňovalo pouze minimalizaci časové odchylky od naplánovaného GVD. To lze v mnoha případech považovat za dominantní kritérium, neboť je nutné zachovat stabilitu GVD, infrastruktura je místy na hranici své kapacity, stále větší důraz se klade na přesnost dopravy. Avšak v souvislosti se zaváděním elektroměrů na

jednotlivá vozidla, od kterého se bude odvíjet platba za spotřebovanou energii, se bude zvyšovat tlak dopravců na minimalizaci počtu rozjezdů – tedy na zohlednění kritéria spotřeby trakční energie.

Je logické, že dopravci nebudou chtít platit za energii, kterou spotřebovali při rozjezdu po mimořádném zastavení, které nezavinili. K této problematice lze přistoupit dvěma způsoby – zohlednění jako dalšího kritéria při hledání optimálního řešení dopravní situace nebo kompenzovat zastavení vlaku při kalkulaci poplatku za použití dopravní cesty. Zpětně to může vést k situaci, kdy správce infrastruktury bude hledat viníka vzniklé mimořádné situace a požadovat náhradu těchto kompenzací. Nicméně to už je problematika přesahující téma této práce.

Výpočet spotřeby trakční energie lze provést na základě znalosti parametrů vlaku a infrastruktury. Do kritéria pro optimalizaci vstoupí rozdíl mezi vypočítanou spotřebou energie přeplánované trasy a vypočítanou spotřebou energie původně naplánované trasy v části infrastruktury, kde se tyto trasy odchylují. V tomto případě může vyjít hodnota rozdílu i záporně.

$$W_v = \int_{s_1}^{s_2} F_p ds - \int_{s_1}^{s_2} F_g ds$$

kde:

W_v *zvýšená spotřeba trakční energie v úseku s_1 až s_2 [J]* (5)

F_p *tažná síla v predikované trase [N]*

F_g *tažná síla v plánované trase [N]*

pozn.: výpočet tažné síly je uveden v kapitole 4.3.1.2.1

Pokud bychom uvažovali pouze kritérium minimalizace spotřeby trakční energie, hledání optimálního řešení dopravní situace spočívá v nalezení varianty s minimální hodnotou spotřebované energie všech dotčených vlaků. Přitom je nutno zohlednit i vazby mezi jednotlivými vlaky, ať už se jedná o přestupní vazbu, nebo obrat soupravy či střídání strojvedoucího a vlakové čety, které se projeví šířením zpoždění navazujících vlaků.

4.2.1.3 Kritérium minimalizace šíření zpoždění

V některých případech může být uplatňováno kritérium minimalizace šíření zpoždění. Tento způsob je znám například v letecké dopravě, kdy letadlo má vyhrazený určitý slot (časový interval) a pokud ho nestihne využít, musí vyčkávat a jsou upřednostněna jiná letadla, která jsou schopna využít jim přidělený slot. Obdobně lze uvažovat i v železniční dopravě – pokud vlak není schopen realizovat svoji jízdu v rámci přidělené trasy a svojí jízdou by ovlivňoval jízdy jiných vlaků jedoucích ve svých přidělených trasách, bude zastaven. Tím nedojde k narušení jízdy jiných vlaků a zachová se stabilita naplánovaného GVD. Pokračování zastaveného vlaku bude umožněno, až když jeho jízdou nebude

narušena jízda jiných vlaků jedoucích ve svých přidělených trasách. V případech, kdy více vlaků není schopno realizovat svoji jízdu v rámci přidělené trasy, bude jim umožněna jízda podle pořadí, ve kterém dorazily do místa jejich konfliktu.

Tento způsob lze využít například v příměstských aglomeracích s vysokou intenzitou provozu, kde zpoždění jednoho vlaku vyvolá rozsáhlé šíření zpoždění, které nelze v dlouhém časovém intervalu snížit.

4.2.2 Uvažované kritérium optimalizace provozu

Vzhledem k tomu, že naplánovaný GVD, resp. aktualizovaný Plán vlakové dopravy, vyjadřuje „ideální“ stav, kdy se všechny zúčastněné subjekty shodly na časových polohách vlaků, aniž by se jejich jízdy vzájemně ovlivňovaly, v návrhu řešení se uvažuje jako dominantní kritérium minimalizace hodnoty zpoždění. Z uvedených kritérií bude mít algoritmus největší tendenci směřovat k takto definovanému ideálnímu stavu.

Současně lze částečně aplikovat principy kritéria minimalizace šíření zpoždění – pokud nedodržení plánované trasy vlaku způsobí konflikty s jízdou více vlaků než stanovený počet, sníží se hodnota priority vlaku vstupující do algoritmu minimalizace hodnoty zpoždění.

Nastavení váhových kritérií by mělo vycházet z ekonomického modelu, který zpracuje správce infrastruktury. S nastavením těchto váhových kritérií by měla souviset i změna účtování poplatků za využití dopravní cesty, která současně umožní správci infrastruktury lépe regulovat vytíženost tratí jak z hlediska přesunutí některé zátěže na jiné tratě, tak rozptýlení vlaků v čase.

Protože řešení konfliktů bude řešeno s dostatečným časovým předstihem v rámci operativního řízení provozu a požadavek na průjezd definovaným místem infrastruktury ve stanovený čas bude přenesen na palubu vozidla, systém ATO může optimalizovat jízdu svého vozidla z hlediska spotřeby trakční energie v rámci možností těchto požadavků. Systém ATO bude využívat optimální režim jízdy tak, aby definovanými místy v infrastruktuře, v nichž by mohl potenciálně vzniknout konflikt, projel ve stanovený čas. Tím je minimalizována spotřeba trakční energie s ohledem na prioritní požadavek dodržení Plánu vlakové dopravy.

Dále lze uvažovat s tím, že po předání vlaku přímému řízení, jehož systémy jsou provázány s konkrétním zabezpečovacím zařízením, může být v rámci definovaného sledu vlaku a možností vlaku modifikován požadovaný čas průjezdu definovaným místem s ohledem na lokální optimalizační kritéria související s tímto typem zabezpečovacího zařízení.

4.3 Úroveň operativního řízení provozu

Z hlediska optimalizace řízení provozu zastává nejvýznamnější postavení operativní řízení provozu. Operativní řízení provozu vychází z vydaného Plánu vlakové dopravy, který podle navržené architektury definuje strategické řízení provozu. Zároveň byly v kapitole 4.2 analyzovány a navrženy optimalizační kritéria.

Operativní řízení, na základě činností definovaných v kapitole 4.1.2, zajišťuje ve svěřené oblasti řešení neplánovaných odchylek od naplánovaného GVD. Nezbytné funkce operativního řízení jsou:

- predikce jízdy vlaků na základě znalosti parametrů infrastruktury a jejich aktuálních stavů, parametrů vozidel (trakční charakteristiky, zátěž), vazeb mezi vlaky (obraty souprav a hnacích vozidel, přípojných vazby) a aktuální provozní situace
- detekce konfliktů v jízdách vlaků na základě použitých technologií řízení a zabezpečení železničního provozu
- návrh optimálního řešení dopravní situace a předání dispozic přímému řízení provozu

Výše uvedené funkce jsou detailně analyzovány v následujících podkapitolách.

4.3.1 Výpočet predikce jízdy vlaků

Relativně přesná predikce jízdy vlaků, tedy předpokládaná poloha vlaku v prostoru v závislosti na čase, je nezbytným předpokladem pro následnou detekci konfliktů. Přesnost této predikce je dána velikostí časového výhledu a množstvím prvků způsobujících neurčitost (např. rozjezd a brzdění vlaku, pobyt pro výstup a nástup cestujících, povětrnostní vlivy atd.).

4.3.1.1 Výchozí stav

Výpočet dynamického jízdního profilu, resp. jízdni doby vlaku, je proveden již v rámci plánování trasy vlaku v naplánovaném GVD. Nicméně k zajištění stability tohoto naplánovaného GVD jsou k jízdniím dobám a pobytům připočteny přírázky podle Kodex UIC 451-1, viz [26]. Ty poskytují rezervu, kdy jsou v reálném provozu z důvodu neurčitých vnějších vlivů vypočítané časy prodlužovány. Tyto přírázky lze za příznivých okolností využít ke krácení naplánovaných jízdniích dob či pobytů, především za účelem snížení zpoždění.

Stávající systémy operativního řízení již nepřepočítávají jízdnií doby podle aktuálních parametrů vlaku a stavu infrastruktury. Pouze aktuální hodnotu zpoždění přičítají k naplánovaným dobám v GVD – rovnoběžně posouvají trajektorii v nákrešném grafikonu vlakové dopravy. Tím dochází k rozptylu mezi skutečnou jízdou vlaku a vypočítaným modelem jízdy. Tuto odchylku lze jen

částečně kompenzovat koeficientem, kterým se přepočítávají jízdní doby. Tento koeficient lze určit na základě dosavadní jízdy vlaku, avšak většinou není schopen zachytit příčiny odchylky od uvažovaného modelu jízdy.

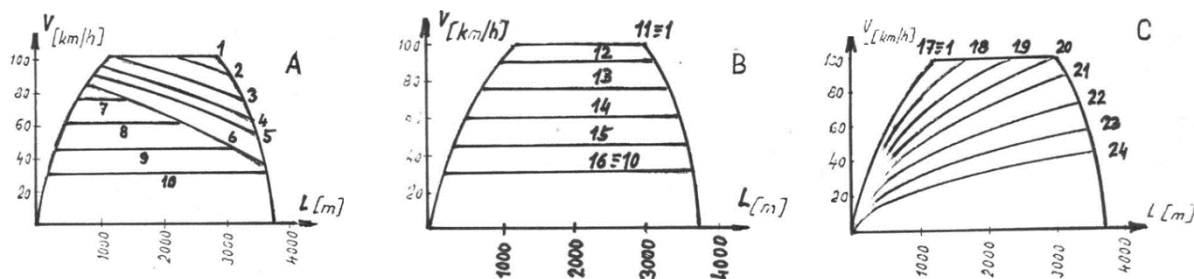
4.3.1.2 Teoretický základ

Reálný dynamický jízdní profil (trajektorie pohybu) se skládá z fází:

- rozjezd – vyvíjení tažné síly za účelem zrychlení vlaku
- ustálená jízda – vyvíjení tažné síly za účelem udržení stanovené rychlosti
- výběh – není vyvíjena tažná ani brzdná síla, rychlost vlaku závisí na odporových silách
- brzdění – vyvíjení brzdící síly za účelem zpomalení vlaku

Jednotlivé fáze jsou voleny tak, aby byly dodrženy požadované časy průjezdu definovanými místy infrastruktury. V současné době záleží na taktice a zkušenosti strojvedoucího, jaký poměr těchto fází volí a nakolik přesně je schopen dosáhnout požadovaných jízdních dob. Pro prodloužení jízdní doby lze volit následující taktiky [2]:

- využití fáze výběhu vozidla
- omezení rychlosti ustálené jízdy
- snížení rozjezdového zrychlení



Obrázek 7: Způsob prodloužení jízdní doby
Zdroj: [2]

Má-li být přesně predikována jízda vlaku, je nutné znát volenou taktiku jízdy. V případě manuálního řízení vozidla strojvedoucím se mohou tyto taktiky výrazně lišit. Zvýšení přesnosti predikce lze dosáhnout nasazením systémů ATO, u nichž lze uvažovat s ustálenou taktikou (může se však lišit u jednotlivých výrobců).

Znalost taktiky jízdy lze nahradit, resp. omezit její vliv tím, že se výrazně zvýší četnost bodů, ve kterých je definován čas průjezdu. Tím se ovšem sníží optimální jízda vozidla z hlediska spotřeby trakční energie.

4.3.1.2.1 Fáze rozjezdu

Pro pohyb vozidla lze obecně říci, že ve směru vozidla působí síly [1]:

- tažné (působí souhlasně s vektorem rychlosti pohybu vozidla)
- odporové (působí proti směru vektoru rychlosti pohybu vozidla)
- brzdné (působí proti směru vektoru rychlosti pohybu vozidla)

Neuvažujeme-li brzdnou sílu, lze popsat pohyb vozidel rovnicí:

$$F_O - G \cdot o_V - G \cdot o_T = G \cdot \frac{(1 + \rho)}{g} \cdot \frac{dv}{dt}$$

kde:

F_O	<i>tažná síla na obvodu kol [N]</i>	
G	<i>tíha hnacího vozidla a tažených vozidel [N]</i>	
o_V	<i>součinitel vozidlového odporu [-]</i>	(6)
o_T	<i>součinitel odporu trati [-]</i>	
ρ	<i>součinitel rotujících částí [-]</i>	
v	<i>rychlost [m.s⁻¹]</i>	
t	<i>čas [s]</i>	

Z uvedené rovnice lze konstatovat, že zrychlení vozidla závisí na trakčních charakteristikách vozidla a odporech proti pohybu vozidla **vozidlových, traťových a zrychlení**.

Hodnoty vozidlových odporů, skládajících se z odporu valení kola po kolejnici, odporu čepového tření v ložiscích a odporu prostředí, závisí na mnoha činitelích. Koeficienty součinitele vozidlových odporů jsou pro účely výpočtu jízdních dob stanoveny empiricky a závisí na rychlosti vozidla. Souhrnně jsou vyjadřovány polynomem:

$$o_V = a + b \cdot V + c \cdot V^2$$

kde:

V	<i>okamžitá rychlost [km.h⁻¹]</i>	(7)
-----	--	-----

Taťové odpory lze dělit na odpory sklonu, oblouku a tunelu. Taťové odpory jsou dané stavebním uspořádáním trať a závislé na délce a hmotnosti vlaku. Koeficienty součinitelů pro jednotlivé traťové odpory jsou stanoveny empiricky v závislosti na parametrech trať v daném úseku.

$$o_T = o_{skl} + o_{obl} + o_{tun}$$

kde:

$$o_{skl} \quad \text{součinitel odporu sklonu [-]} \quad (8)$$

$$o_{obl} \quad \text{součinitel odporu oblouku [-]}$$

$$o_{tun} \quad \text{součinitel odporu tunelu [-]}$$

$$o_{skl} = \frac{G * \sin \alpha}{G} \cong \frac{s_{skl}}{1000}$$

kde:

$$G \quad \text{tíha vozidla [N]}$$

$$s_{skl} \quad \text{sklon trať [%]}$$

(9)

$$o_{obl} = \frac{0,6}{R}$$

kde:

$$R \quad \text{poloměr oblouku}$$

(10)

U jednokolejného tunelu se uvažuje $o_{tun} = 0,002$, u dvoukolejného tunelu $o_{tun} = 0,001$.

Odpor zrychlení představuje síly, které působí proti směru pohybu vozidla při změně rychlosti. Skládá se ze složky odporu zrychlení posuvných hmot a složky odporu zrychlení rotujících hmot. Pro hnací vozidla se uvažuje $\rho \cong 0,2$, pro nehnací vozidla $\rho \cong 0,05$.

Tažná síla na obvodu kol působí v místě styku kola a kolejnice. Je to indikovaná tahná síla prvotního zdroje mechanické energie, snížená o ztráty na tomto prvotním zdroji a přenosu výkonu. Tahná síla hnacího vozidla není v celém rozsahu rychlosti konstantní. Závislost tahné síly na rychlosti vozidla je označena jako trakční charakteristika. Průběh trakční charakteristiky je omezen:

- adhezí – maximální silou, kterou je možné přenést na styku kolo-kolejnice, je závislá na tíze vozidla a součiniteli adheze
- maximální proud
- výkonem zdroje mechanické energie hnacího vozidla
- maximální rychlostí vozidla

Součinitel adheze není konstantní, ale mění se především v závislosti na rychlosti vozidla a kvalitě povrchu stykových ploch. Pro výpočet hodnoty součinitele adheze se používají experimentálně stanovené vztahy, závislé na rychlosti, např. podle Kothera.

$$\mu_a = \left(\frac{9000}{V + 42} + 116 \right) * 10^{-3} \quad (11)$$

kde:

V okamžitá rychlost [km.h^{-1}]

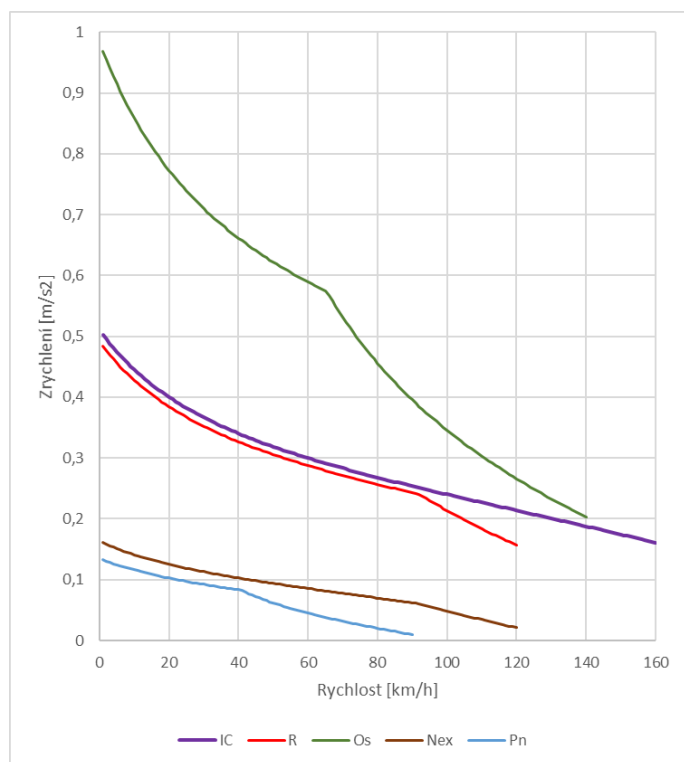
Na obrázku 8 jsou znázorněny hodnoty zrychlení pro vybraná vozidla, odpovídající typickému provozu:

- vlak kategorie IC:
*HV ČD 380, $P_{\max}=6400 \text{ kW}$, $V_{\max}=200 \text{ km/h}$, $m_{\text{HV}}=88,2 \text{ t}$, $l=16,8 \text{ m}$
 tažená vozidla: 6x Bmz, á $m=55 \text{ t}$, $l=26,4 \text{ m}$*
- vlak kategorie R
*HV ČD 163, $P_{\max}=3480 \text{ kW}$, $V_{\max}=120 \text{ km/h}$, $m_{\text{HV}}=84 \text{ t}$, $l=18 \text{ m}$
 tažená vozidla: 6x Bmz, á $m=55 \text{ t}$, $l=26,4 \text{ m}$*
- vlak kategorie Os
EJ ČD 471, $P_{\max}=2000 \text{ kW}$, $V_{\max}=140 \text{ km/h}$, $m_{\text{HV}}=62,5 \text{ t}$, $m_{\text{TV}}=92,5 \text{ t}$, $l=79 \text{ m}$
- vlak kategorie Nex
*HV ČD 1x163, $P_{\max}=3480 \text{ kW}$, $V_{\max}=120 \text{ km/h}$, $m_{\text{HV}}=84 \text{ t}$, 18 m
 tažená vozidla²⁰: 20x Sgnss 55, á $m_{\text{TV}}=20+70 \text{ t}$, $l=19,6 \text{ m}$*
- vlak kategorie Pn
*HV 181, $P_{\max}=2790 \text{ kW}$, $v_{\max}=90 \text{ km/h}$, $m_{\text{HV}}=124,2 \text{ t}$, $l=18,8 \text{ m}$
 tažená vozidla²¹: 40x Falls 11, á $m_{\text{TV}}=26,8+45 \text{ t}$, $l=13,5 \text{ m}$*

Obecně lze říci, že výpočet fáze rozjezdu vozidla pro stanovení jízdních dob zahrnuje množství empiricky stanovených koeficientů a zjednodušení. Přesto je výpočet analytickou metodou náročný. Pro orientační výpočet se uvažuje s průměrnou hodnotou konstantního zrychlení, v případě nutnosti podrobného výpočtu se upřednostňuje diskrétní metoda výpočtu.

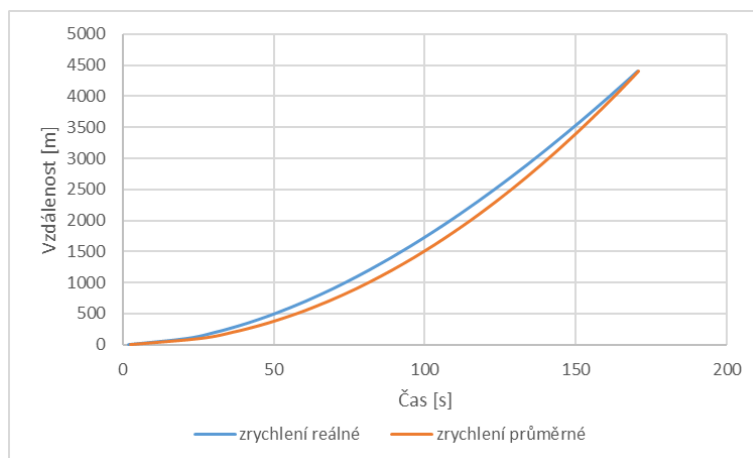
²⁰ Hmotnost vozu + hmotnost nákladu – loženo na 50%

²¹ Hmotnost vozu + hmotnost nákladu – loženo na 50%



Obrázek 8: Hodnoty zrychlení pro vybrané vlaky
Zdroj: autor

Obrázek 9 znázorňuje na výše uvedeném příkladu vlaku kategorie IC rozdíl trajektorie jízdy vlaku při uvažování reálného zrychlení podle trakční charakteristiky a průměrného zrychlení $0,3 \text{ m/s}^2$. Maximální odchylka polohy je 220 m, maximální odchylka času 7,6 s. Přitom ujetá vzdálenost vlaku s uvažováním zrychlení podle trakční charakteristiky je pro každý časový okamžik vyšší než při uvažování průměrného zrychlení.



Obrázek 9: Porovnání reálného a průměrného zrychlení
Zdroj: autor

4.3.1.2.2 Fáze brzdění

Pro fázi brzdění je problematika náročnější. Průběh brzdění je dán zaprvé dobou náběhu brzd (čas potřebný k vyvinutí brzdného účinku) a zadruhé odrychlením, které je závislé na okamžité rychlosti.

Doba náběhu brzd je dána principem ovládání průběžné brzdy železničních vozidel, kdy brzdy na jednotlivých vozech reagují na změnu tlaku v hlavním průběžném potrubí, která se šíří konečnou rychlostí. Průběh změny tlaku v hlavním průběžném potrubí je obtížně popsatelný, proto se pouze aproximuje lineární funkcí. Účinek jednotlivých brzd je dále uměle snižován, aby nedocházelo k rázům, kdy začátek vlaku již brzdí, zatímco konec nikoliv.

Do samotné brzdící síly pak pro každý konkrétní typ brzdy vstupuje mnoho parametrů, které jsou výrazně závislé na okamžité rychlosti vozidla.

Při plánování tras vlaků se využívá průměrného odrychlení, přičemž je známo, že skutečný průběh odrychlení se v průběhu fáze brzdění mění. Velikost průměrného odrychlení je určena na základě hodnoty brzdících procent a režimu brzdění.

Bude-li uvažován výpočet minimální jízdní doby, lze jako omezující profil rychlosti stanovit brzdnou křivku použitého vlakového zabezpečovače. Vstupním předpokladem pro řešení optimalizace jízdy vlaků podle kapitoly 3 je vybavenost všech vozidel systémem ETCS. Stanovení profilu rychlosti podle brzdné křivky vlakového zabezpečovače přináší dva aspekty:

- Uvažuje se využití maximálního možného brzdného účinku vlaku – takový způsob jízdy působí nepříjemně z pohledu komfortu cestujících a zapříčiňuje zvýšené opotřebení vozidel (riziko plochých kol) i infrastruktury.
- Vzhledem k požadavkům na vlakový zabezpečovač je brzdná křivka stanovena způsobem, že ani za souhry všech uvažovaných nejnepríznivějších okolností vlak nemůže projet místo, kde končí jeho oprávnění k jízdě. Za běžných okolností je vlak brzdnou křivkou vlakového zabezpečovače nucen v počáteční fázi intenzivně brzdit. Aby mohl za běžných podmínek zastavit až těsně před místem konce oprávnění k jízdě, je nucen se v poslední fázi brzdění pohybovat až nepřiměřeně nízkou rychlostí. Brzdná křivka vlakového zabezpečovače nerespektuje běžný způsob brzdění vlaku. Pokud to infrastruktura umožňuje, stanovuje se místo běžného zastavení v dostatečné vzdálenosti před koncem oprávnění k jízdě²².

²² Zmírnit parametry brzdné křivky lze i posunutím místa ohrožení do dostatečné vzdálenosti za koncem oprávnění k jízdě. Podrobné informace o nastavení koeficientů brzdných křivek systému ETCS jsou k dispozici v [3], pro prostředí ČR v [27].

V případě ucelených jednotek může systém ETCS využívat brzdňý model, jehož parametry jsou nastaveny v mobilní části systému. V ostatních případech se využívá tzv. „konverzního modelu“, kde doba náběhu brzd je stanovena rovnicí (12) a hodnoty odrychlení v určitých intervalech rychlostí jsou stanoveny rovnicemi (13) a (15).

$$T = a + b * (L/100) + c * (L/100)^2$$

kde:

$$T \quad \text{doba náběhu brzd [s]} \quad (12)$$

a, b, c koeficienty [-] závislé na druhu vlaku a režimu brzdění

L délka vlaku [m]

$$AD_0 = 0,0075 * \lambda_0^{0,076}$$

kde:

$$AD_0 \quad \text{odrychlení [m/s}^2\text{] pro rychlosti do } V_{lim} \quad (13)$$

λ_0 brzdící procento [%]

$$V_{lim} = 16,85 * \lambda_0^{0,428}$$

kde:

$$V_{lim} \quad \text{rychlostní limit [km/h] pro platnost odrychlení } AD_0 \quad (14)$$

λ_0 brzdící procento [%]

$$AD_n = a_{3n} * \lambda_0^3 + a_{2n} * \lambda_0^2 + a_{1n} * \lambda_0 + a_{0n}$$

kde:

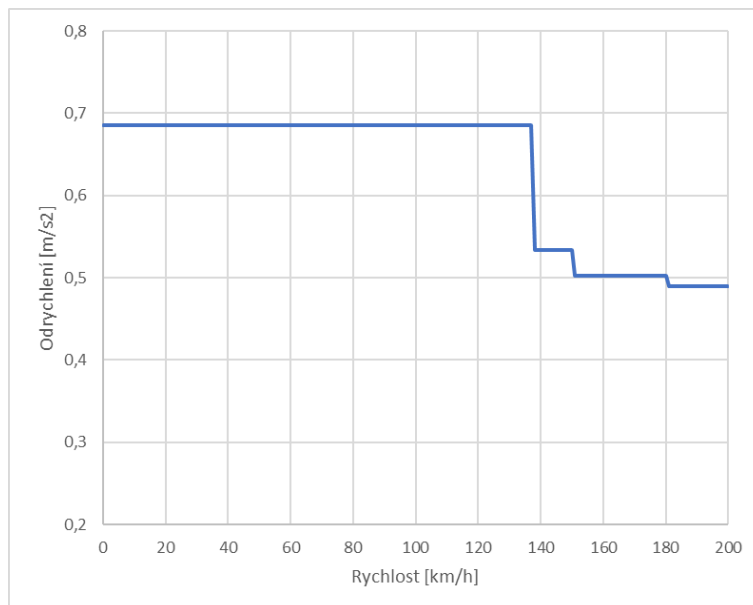
$$AD_n \quad \text{odrychlení [m/s}^2\text{] pro intervaly rychlostí}^{23} \quad (15)$$

$a_{3n}, a_{2n}, a_{1n}, a_{0n}$ koeficienty [-] pro intervaly rychlostí

λ_0 brzdící procento [%]

²³ $n=1$ pro $V < 100$ km/h, $n=2$ pro $100 < V < 120$ km/h, $n=3$ pro $120 < V < 150$ km/h, $n=4$ pro $150 < V < 180$ km/h a $n=5$ pro $V > 180$ km/h

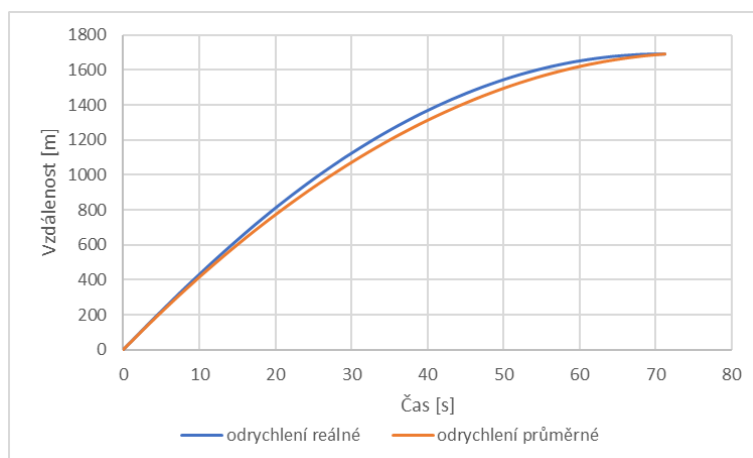
Hodnoty náběhu brzdy a odrychlení lze upravovat korekčními koeficienty, které definuje správce infrastruktury na základě svých požadavků pro zajištění bezpečnosti.



Obrázek 10: Příklad hodnot odrychlení

Osobní vlak, brzdící v režimu P, s brzdícími procenty 135 %. Při délce 200 m je hodnota doby náběhu nouzové brzdy 3,3 s. Brzdná dráha z rychlosti 160 km/h odpovídá hodnotě 1694 m. Zdroj: autor

Obrázek 11 znázorňuje na výše uvedeném příkladu vlaku rozdíl trajektorie jízdy vlaku při uvažování reálného odrychlení podle vlakového zabezpečovače ETCS a průměrného odrychlení $0,58 \text{ m/s}^2$. Maximální odchylka polohy je 56 m, maximální odchylka času 3,8 s. Přitom ujetá vzdálenost vlaku s uvažováním odrychlení podle vlakového zabezpečovače je pro každý časový okamžik vyšší než při uvažování průměrného odrychlení.



Obrázek 11: Porovnání reálného a průměrného odrychlení

Zdroj: autor

4.3.1.2.3 Pobyty vlaku

Dalším výrazným faktorem, který ovlivňuje predikci jízdy vlaku, jsou pobyty vlaků v jednotlivých stanicích. Pobyty mohou být naplánovány z dopravních důvodů (např. z důvodu křižování či předjíždění vlaků) nebo z přepravních důvodů – výstup a nástup cestujících, technologické úkony na vlaku (např. přepřah, změna složení soupravy, technická prohlídka atd.). Pobyt z dopravních důvodů není z hlediska predikce jízdy vlaku významný – může být krácen či prodloužen dle potřeby operativního řízení, není zatížen neurčitostí. Naopak pobyty z přepravních důvodů mohou vnášet do predikce jízdy vlaku významnou neurčitost, obzvláště pokud je doba pobytu naplánována s minimální přírážkou k době předpokládaného technologického úkonu. Významným příkladem je výstup a nástup cestujících, který se může výrazně prodloužit např. při výstupu či nástupu ucelené skupiny cestujících, osob se sníženou schopností pohybu a orientace, významně zvýšeného počtu cestujících při konání hromadných akcí atd. Neurčitost může být částečně eliminována následujícími způsoby:

- dlouhodobá statistika doby pobytu v jednotlivých dopravních, sledování závislostí na vnějších okolnostech
- zanesení dodatečných vstupů do informačních systémů – např. stisknutí tlačítka zastavení na znamení, uzavření dveří po ukončeném výstupu a nástupu cestujících, předem ohlášený výstup či nástup osob se sníženou schopností pohybu a orientace, zvýšený počet cestujících nebo zvýšená nakládka a vykládka spoluzavazadel

4.3.1.2.4 Vazby mezi vlaky

Při predikci jízdy vlaku je nutné zohlednit vazby mezi vlaky. Mezi dvojicí vlaků mohou vznikat vazby z důvodu:

- přestupu cestujících – „přípojně vazby“
- přechod hnacího vozidla, celé nebo části soupravy z prvního vlaku na druhý
- přechod strojvedoucího nebo vlakové čety
- dispozice sledu

Pro přípojně vazby z hlediska přestupu cestujících jsou definovány základní čekací doby, případně čekací doby pro konkrétní dvojici vlaků. Je-li první vlak zpožděn o dobu menší nebo rovnu čekací době, je vazba zachována a tím omezena jízda druhého vlaku – trasa druhého vlaku bude přepočítána s příslušným zpožděním. Zrušení vazby lze provést pouze vydáním dispozice – manuálním zásahem. Naopak při větším zpoždění prvního vlaku než čekací doba, je vazba automaticky rozvázána. Rozvázání vazby by mělo být výrazně znázorněno obsluhujícím zaměstnancem. Pro zachování vazby je nutný manuální zásah.

Pro vazbu typu přechod vozidel nebo vlakové čety zůstává vždy vazba pevná. Nelze ji odstranit bez dalšího opatření – např. pro rozvázání vazby mezi vlaky z důvodu přechodu vozidla je nutné druhému vlaku přiřadit jiné hnací vozidlo.

Vazba typu dispozice sledu vzniká zásahy operativního řízení provozu, kdy je stanoven požadovaný sled vlaků. Tím je možné zafixovat např. křižování vlaků v určité stanici nebo pořadí vlaků vstupujících do uzlu, přestože se může vlivem neurčitosti predikce jízdy ještě měnit jejich časová poloha.

V současné době nejsou v informačních systémech realizovány datové struktury o vazbách mezi vlaky pro výměnu informací mezi dopravcem a řízením provozu na straně správce infrastruktury. Často chybí i koordinátor pro řešení vazeb mezi vlaky různých dopravců. Přitom vhodné řešení přípojných vazeb určuje kvalitu poskytovaných služeb. Je tedy nezbytné vytvořit rozhraní, které umožňuje jednotlivým subjektům v rámci přidělených pravomocí rozhodovat o zachování přípojných vazeb a požadavky přenést řízení provozu zastupující správce infrastruktury.

4.3.1.3 Uvažované předpoklady

Všechny výše uvedené faktory ovlivňují přesnost predikce jízdy vlaku. Čím kratší je časový interval do potencionálního konfliktu, tím je vyžadována větší přesnost.

Pro všechny fáze jízdy vlaku pak platí, že výpočet jízdnicích dob může být vyhovující pouze v případě, že informační systémy disponují dostatečně přesným popisem infrastruktury a aktuálními daty o parametrech vlaků.

Při dlouhodobém plánování GVD nejsou známy konkrétní parametry vlaku, ale pouze limitující parametry. Tím je výpočet jízdnicích dob nepřesný. Je nezbytné, aby byl každý dopravce nucen poskytnout správci infrastruktury přesné a aktuální informace pro konkrétní jízdu vlaku, především: typ hnacího vozidla (včetně jeho trakční charakteristiky), hmotnost, délka, brzdící procenta a režim brzdění vlaku.

Systém predikce jízdy vlaku pak musí přepočítat jízdnicí doby pro aktuálně platné parametry vlaku. Přitom ve všech fázích výpočtu jízdnicích dob (dlouhodobé plánování GVD, plánování denního GVD – Plán vlakové dopravy, ale i výpočet predikce jízdy vlaku v rámci operativního řízení) by měl být použit stejný algoritmus.

Předpokládá se, že algoritmus může při výpočtu jízdnicích dob uvažovat s konstantními hodnotami zrychlení a odrychlení, které však odpovídají průměrným hodnotám při uvažování aktuálních parametrů vlaku.

Mezi jednotlivými vlaky se vytvoří matice vazeb, která definuje, zda mezi dvojicí vlaků má být při predikci jejich jízdy zajištěna vazba či nikoliv. Editace této matice pak bude umožněna na základě požadavků definovaných v kapitole 4.3.1.2.4.

Pro řešení predikce jízdy vlaku je nezbytný dostatečný popis infrastruktury, vzájemně propojitelný jak z pohledu konstrukce jízdního řádu (zohledňující polohu jednotlivých nástupních hran, parametry trati mající vliv na jízdní odpory – sklonový profil, oblouky, tunely atd.), tak z pohledu zabezpečovacího zařízení (zohledňující prostorové oddíly a další závislosti zajišťující bezpečnou jízdu vozidel).

4.3.1.4 Míra podrobnosti výpočtu predikce jízdy vlaku

Trasa vlaku musí být jednoznačně určena v prostoru i v čase. Při plánování trasy, ať už v dlouhodobém GVD nebo přidělení ad-hoc trasy, je vypočítán dynamický profil jízdy vlaku s uvažováním plánovaných (limitních) parametrů vlaku. K těmto dobám je nezbytné přiřadit přírážky k jízdním dobám a pobytům podle Kodexu 451-1, viz [26]. Jsou stanoveny časy odjezdu a příjezdu v konkrétních místech, dále jsou stanoveny časy průjezdu vybranými body infrastruktury, které zároveň jednoznačně definují trasu v prostoru (posloupnost pojížděných úseků infrastruktury). Těmito body jsou návěstidla (případně některé variantní body mezi těmito návěstidly) v případě řízení provozu v prostorových oddílech, nebo výhybky v případě řízení provozu flexibilním způsobem. Takto naplánovaná trasa je v systémech řízení provozu uchovávána a předávána v celém svém životním cyklu. Tento popis trasy v prostoru a času je dostatečný v makroúrovni pro předávání vlaků mezi jednotlivými úrovněmi řízení provozu, mezi jednotlivými oblastmi v rámci jedné úrovně, i mezi dispečery správce infrastruktury a dispečery dopravce či jinými subjekty.

Pro konkrétní funkce v rámci jednotlivých úrovní řízení provozu je nutné uvažovat s podrobnějším popisem trasy. Tento popis trasy na mikroúrovni je možné zrekonstruovat na základě znalosti popisu trasy v makroúrovni, algoritmu pro výpočet této trasy v makroúrovni a popisu infrastruktury, který zahrnuje popis prvků v rozlišovací úrovni mikro i makro a zároveň umožňuje provázanost těchto rozlišovacích úrovní (příklad takového popisu infrastruktury je uveden v kapitole 4.5).

Algoritmy v jednotlivých úrovních řízení provozu mohou kombinovat makro i mikro popis trasy s ohledem na potřebnou přesnost výpočtu polohy vlaku v čase. Požadovaná přesnost výpočtu se může dynamicky měnit i s velikostí výhledu predikce.

4.3.1.5 *Přepočet predikce jízdy vlaku*

Přepočet dynamického profilu je nutný vždy, když se změní uvažované parametry vlaku (např. po obdržení informace „složení vlaku“) nebo se změní trasa vlaku v prostoru.

Dynamický profil není nutné přepočítávat, pokud se časy skutečných průjezdů vlaku definovanými body výrazně neodchylují od naplánovaných časů. V případě výraznějších odchylek je nutné určit, zda k němu dochází z důvodů na straně infrastruktury nebo vozidla.

Pokud se odchylka vyskytuje u více vlaků ve vybraném místě infrastruktury, upozorní systém predikce dispečera a zároveň ve výhledové (predikované) části GVD v daném místě prodlužuje jízdní dobu ostatních vlaků. Systém získává data o skutečné rychlosti vlaku prostřednictvím systému ETCS a rozlišuje, zda u sledovaných vlaků dochází k prodlužování jízdních dob ve fázi rozjezdu, ustálené rychlosti nebo brzdění. Příčiny takového prodlužování jízdních dob může být například snížená adheze, snížené napětí v troleji atd.

Je-li zaznamenána odchylka pouze u jednoho vlaku, která se projevila pouze v části infrastruktury a dále se nezvyšuje, připočítá se časový offset ve zbývající části trasy tohoto vlaku (dle dalších pravidel pro krácení jízdních dob a pobytů). Pokud se odchylka mezi naplánovanými a skutečnými časy průjezdu v jednotlivých bodech trasy neustále zvyšuje, upozorní systém predikce dispečera a v další části plánované trasy prodlouží jízdní doby tohoto vlaku, přičemž rozlišuje, zda k prodlužování jízdních dob dochází ve fázi rozjezdu, ustálené jízdy nebo brzdění. Dispečer současně ověří u dopravce (strojvedoucího) parametry vlaku a provozuschopnost hnacího vozidla.

Má-li být prodloužen pobyt v místě zastavení, časový offset se připočítá ve zbývající části trasy tohoto vlaku (dynamický profil není nutné přepočítávat). Naopak, pokud je vydána dispozice neplánovaného zastavení vlaku, musí být dynamický profil přepočítán. Při dispozici prodloužení jízdní doby v určitém úseku trasy se přepočítá část dynamického profilu v tomto úseku, ve zbývající části trasy je připočítán časový offset.

Změna trasy v čase může být provedena v libovolné části výhledového GVD, přičemž změna je omezena aktuální polohou vlaku (bod infrastruktury s poslední informací o skutečném průjezdu). Počátek odchylky trasy při jejím přeplánování může být vztažen k bodu:

- aktuální polohy vlaku,
- předchozí dispozice, stanovené mezi místem aktuální polohy vlaku a místem požadované změny,

- místa zastavení se zachováním času odjezdu, které poslední předchází místu požadované změny (v případě potřeby krácení jízdní doby vlak nemůže odjet před časem zveřejněným v jízdním řádu, v případě potřeby prodloužení jízdní doby zůstane zachován čas příjezdu a odjezdu vlaku v posledním místě zastavení, jízdní doba je prodloužena od tohoto místa zastavení do místa požadované změny)
- libovolnému bodu, stanovenému mezi místem aktuální polohy vlaku a místem požadované změny.

Od tohoto bodu omezení je pak vypočítána minimální jízdní doba (s využitím všech rezerv v podobě přírážek jízdních dob a pobytů). Změnu trasy v čase lze provést:

- krácením jízdní doby (v úseku uvedeném výše je využita až minimální jízdní doba)
- prodloužením jízdní doby (v úseku uvedeném výše jsou voleny nižší hodnoty zrychlení, ustálené jízdy a odrychlení, přičemž musí být zachovány alespoň nejnižší provozně akceptovatelné hodnoty)
- zastavením vlaku či prodloužením jeho pobytu

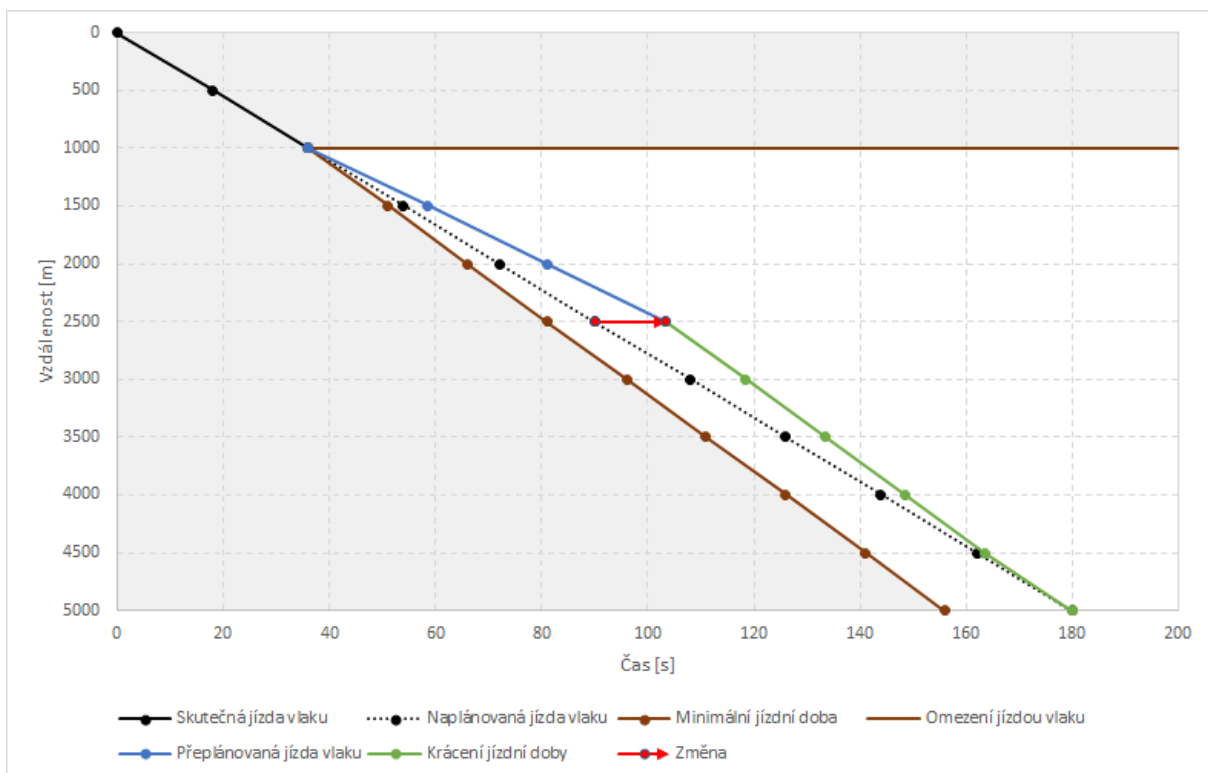
V případě, že změna trasy vyvolá zpoždění vlaku, následná odchylka od naplánované trasy bude snižována krácením jízdních dob (s ohledem na parametry vlaku), přičemž konec odchylky trasy může být vztažen k bodu (vždy s uvažováním omezení minimální jízdní doby):

- nejbližšího možného návratu na plánovanou trasu
- následné dispozice
- místa zastavení se zachováním času příjezdu
- libovolnému bodu, stanovenému za místem požadované změny

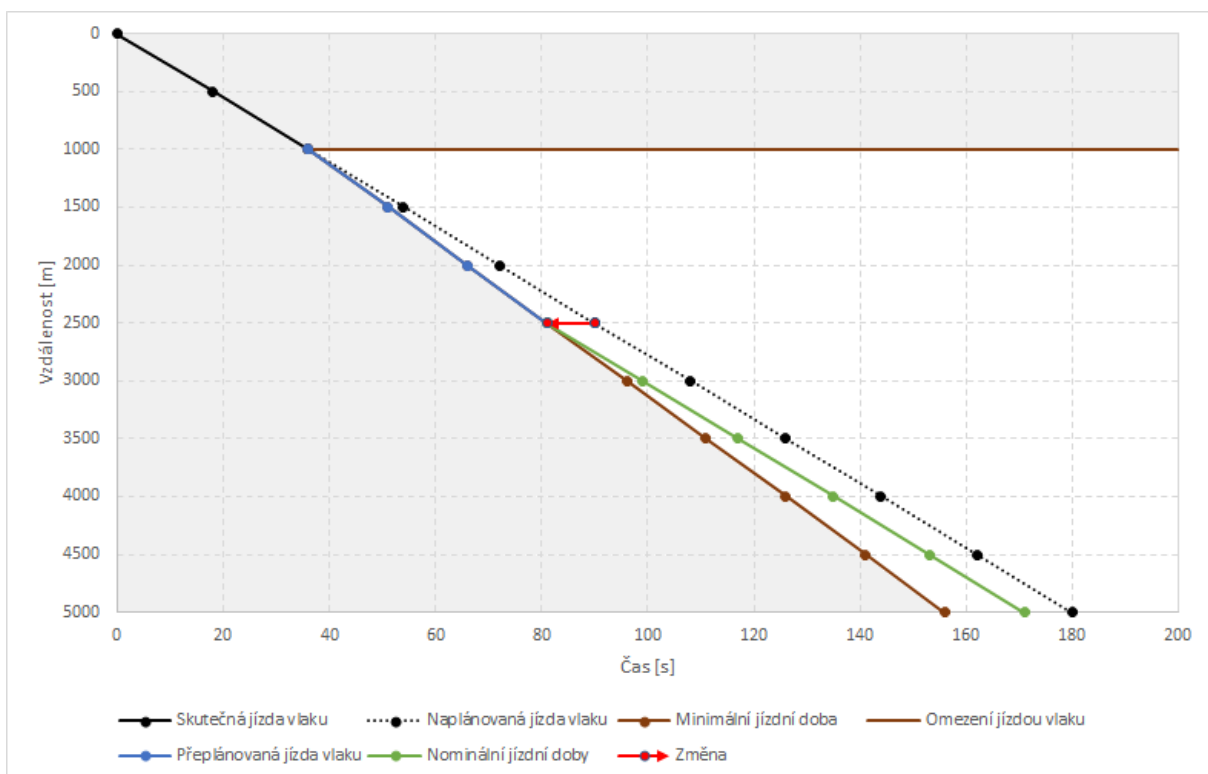
V případě, že změna trasy vyvolá náskok vlaku, následná odchylka od naplánované trasy bude snižována prodloužením jízdní doby, přičemž konec odchylky trasy může být vztažen k bodu:

- následné dispozice
- místa zastavení se zachováním času příjezdu
- libovolného bodu, stanovenému na plánované trase

Pokud není takový bod určen, bude vlak pokračovat nominální jízdní dobou – náskok zůstane zachován.



Obrázek 12: Změna trasy prodloužením jízdní doby
Konec odchytky v místě nejbližšího možného návratu. Zdroj: autor



Obrázek 13: Změna trasy krácením jízdní doby
Zdroj: autor

Pro změněnou trasu jsou přepočítány časy průjezdů vybranými body infrastruktury. Přes rozhraní definované pro ATO jsou tyto časy přeneseny na vozidlo. Mobilní část systému ATO vysílá zpět informace o skutečné poloze a časy předpokládaného času průjezdu vybranými body vlastním výpočtem dynamiky jízdy vozidla na základě aktuálních adhezních podmínek a trakčních vlastností hnacího vozidla – tím je možné verifikovat, případně upravit predikci jízdy vlaku.

4.3.2 Detekce konfliktů

4.3.2.1 Obecné důvody omezení jízdy vlaku

Detekce konfliktů je aplikovaná na všech úrovních řízení provozu. V úrovni strategického řízení se požaduje vytvoření bezkonfliktního Plánu vlakové dopravy, který je předán operativnímu řízení provozu. V úrovni operativního řízení je požadavek na neustálé vyhodnocování bezkonfliktnosti naplánovaných tras a v případě nutnosti jejich přeplánování vydáním dispozic – úpravou naplánovaných tras. Přímému řízení mohou být vlaky předány pouze v případě, že jsou odstraněny všechny konflikty daného vlaku v příslušné oblasti řízení. V úrovni přímého řízení se vyhodnocuje nekonfliktnost jízdnicích cest před vysláním požadavku na jejich realizaci.

Při plánování trasy a detekci konfliktů je nutné zohlednit následující podmínky:

- statické – neměnné v průběhu vypočítané trasy:
 - nástupiště (v případě zastavujících osobních vlaků) nebo konkrétní manipulační místo pro potřeby provedení technologického úkonu na vlaku
 - trakční napájecí soustava
 - dovolené traťové třídy zatížení, průjezdný průřez, rozchod atd.
 - požadovaná brzdící procenta (v případě odklonových tras se mohou lišit požadovaná brzdící procenta a konkrétní vlak je musí splňovat)
- dynamické – měnící se v závislosti na poloze jiných vlaků
 - vyhrazení části infrastruktury jízdou jiného vlaku
 - následné elektrické mezidobí, snížení výkonu hnacího vozidla z důvodu poklesu napětí v troleji
 - omezení přístupu cestujících na nástupiště k jinému vlaku – v případech úrovněového přístupu na nástupiště musí být zamezeno ohrožení cestujících, kdy nesmí být povolena jízda vlaku na bližší kolej od staniční budovy, pokud u vzdálenější koleje, k jejímuž nástupišti je zřízen úrovněový přístup právě přes tuto kolej, stojí osobní vlak s výstupem a nástupem cestujících
 - přípojná vazba k jinému vlaku

- dynamické – měnící se v závislosti na stavu infrastruktury
 - porucha výhybky
 - porucha přejezdového zabezpečovacího zařízení
 - porucha prostředku pro detekci vlaku (kolejový obvod, počítač náprav)
 - nesjízdnost určitého úseku trasy (výluka)
 - napěťová výluka

pozn.: k omezení může dojít v obou směrech, ale i v jednom směru – např. porucha traťového zabezpečovacího zařízení, trakční výluka (v druhém směru může být umožněna jízda samospádem)

Statické okrajové podmínky je nutné ověřit pouze v okamžiku plánování nebo změny trasy v prostoru. Dynamické okrajové podmínky, které se mění v závislosti na stavu infrastruktury, je nutné ověřit vždy v okamžiku, kdy nastane některá z výše uvedených událostí. Výrazně náročnější úlohou je detekce konfliktů vznikajících dynamicky v závislosti na poloze jiných vlaků.

4.3.2.2 *Detekce konfliktů způsobených jízdou jiných vlaků*

V návrhu řešení je uvažováno s infrastrukturou, využívající především flexibilní způsob řízení provozu, jehož předpoklady jsou uvedeny v kapitole 3. Způsob detekce konfliktů na infrastruktuře s flexibilním řízením provozu je pak uveden v kapitole 4.3.2.2.2. Ve složitějších stanicích, kde se pro snížení rizik spojených s posunem a odstavování vozů uvažuje s využitím detekčních prostředků, se předpokládá řízení provozu klasickým způsobem v prostorových oddílech. Způsob detekce konfliktů na infrastruktuře s řízením provozu v prostorových oddílech je uveden v kapitole 4.3.2.2.1.

4.3.2.2.1 *Řízení provozu v prostorových oddílech*

Detekce konfliktů v jízdách vlaků je značně závislá na způsobu zabezpečení jízd vlaků. Je nezbytné upozornit, že každý provozovatel infrastruktury v závislosti na jejím vybavení uvažuje s rozdílnou množinou rizik a jejich následků. Z toho důvodu definuje odlišné funkční požadavky na zabezpečovací zařízení a další postupy pro zajištění bezpečnosti železničního provozu. To může výrazně ovlivňovat podmínky současné jízdy vlaků daným místem. Závisí jak lokálně na vybavenosti infrastruktury, tak na vybavenosti konkrétních vlaků zabezpečovacím zařízením. Nelze tedy uvažovat s pouhým obsazováním jednotlivých úseků příslušnými vlaky, ale je nutné zohlednit i zapevnění pojížděných (případně i dalších) úseků před jízdou vlaků v dostatečném předstihu, případně i se zapevněním těchto úseků po definovanou dobu po jízdě vlaků. Přičemž zapevnění těchto úseků může být podmíněno časově i prostorově. Specifickým případem může být konflikt v jízdách vlaků z důvodu ohrožení cestujících v případě úrovněového přístupu na nástupiště – pak záleží i na druhu vlaků.

V klasickém způsobu řízení, kdy se vlaky pohybují v pevných prostorových oddílech, musí být takový úsek infrastruktury pro jízdu vlaku vyhrazen. Obecně lze říci, že každý úsek infrastruktury je vyhrazen pro vybraný vlak od okamžiku, kdy je postavena vlaková cesta od návěstidla kryjící tento úsek infrastruktury, do okamžiku, kdy celý vlak projede tímto úsekem (je zrušena vlaková cesta). Ve skutečnosti jsou tyto doby závislé na použitém zabezpečovacím zařízení v daném místě infrastruktury. Nutné je rovněž uvažovat s tím, že jízdní cesta musí být postavena v dostatečném časovém předstihu, aby nedošlo k ovlivnění jízdy vlaku projíždějícího kolem tohoto návěstidla.

Do času vyhrazení daného úseku infrastruktury je tedy nutné zahrnout dobu:

- nezbytnou pro přípravu jízdní cesty – přestavení a zapevnění výhybek pojížděných a tvořících přímoú boční ochranu, uzavření přejezdů a další technologické doby konkrétního zabezpečovacího zařízení,
- jízdy vlaku, která by odpovídala fázi brzdění před návěstidlem zakazujícím jízdu vlaku – obecně se uvažuje s dobou jízdy od místa viditelnosti předvěsti hlavního návěstidla nebo místa zásahu vlakového zabezpečovače k místu hlavního návěstidla²⁴,
Výše uvedené doby mohou být přesně spočítány a povel k postavení vlakové cesty vyslán s určitou přírážkou. Pro zjednodušení realizace vysílání požadavků pro postavení vlakové cesty může být uvažován dostatečný časový interval, který bude zohledňovat jízdy nejrychlejších vlaků.
- jízdy vlaku mezi návěstidlem kryjícím daný úsek infrastruktury a začátkem tohoto úseku,
- jízdy vlaku daným úsekem infrastruktury, která začíná obsazením úseku čelem vlaku a končí uvolněním úseku koncem vlaku,
- jízdy vlaku mezi koncem daného úseku a místem pro zrušení jeho závěru.

Ve většině případů lze uvažovat s postupným rušením závěru jízdní cesty, kdy se závěr úseku zruší neprodleně po uvolnění úseku koncem vlaku (s ohledem na reakční dobu zařízení).

V případech, kdy je infrastruktura z hlediska řízení provozu rozdělena na pevné prostorové oddíly, za významné body se považují hranice těchto prostorových oddílů – těmi jsou většinou hranice detekčních prostředků (izolované styky kolejových obvodů nebo umístění počítačů náprav). V jednom prostorovém oddílu musí být vyloučeny protisměrné i stejným směrem jedoucí jízdy dvou a více vlaků. Detekce konfliktů tak spočívá v určení času vyhrazení jednotlivých prostorových oddílů

²⁴ V podmínkách SŽDC se uvažuje s jízdní dobou od místa viditelnosti předvěsti hlavního návěstidla (v úsecích infrastruktury bez liniového vlakového zabezpečovače) nebo od místa přenosu žlutého kódu liniového vlakového zabezpečovače, k místu hlavního návěstidla. Konkrétní podmínky stanoví Směrnice č. 104 [25].

jednotlivými vlaky. Pokud se překrývá čas vyhrazení některého prostorového oddílu pro dva či více vlaků, je mezi nimi vyhodnocen konflikt.

Budeme-li uvažovat využití principů stávajících zabezpečovacích zařízení 3. kategorie, definovaných v [9], kdy oprávnění k jízdě je vydáno postavením vlakové cesty skládající se z více prostorových oddílů (v tomto kontextu jsou myšleny kolejové úseky), je nutné za začátek doby vyhrazení každého z těchto prostorových oddílů uvažovat čas, kdy vlak musí začít snižovat rychlost jízdy před návěstidlem (může být i virtuální) kryjící tento prostorový oddíl.

Uvažujeme-li zabezpečení jízdy vozidel systémem ETCS aplikační úrovně 2, algoritmus detekce konfliktů pro každý vlak pohybující se po infrastruktuře určí čas průjezdu vlaku kolem jednotlivých návěstidel z již dříve vypočítaného dynamického profilu. Od tohoto času odečte dobu, která odpovídá brzdě dráze vlaku snižující svoji rychlost před tímto návěstidlem. Tato doba je závislá na rychlosti a parametrech brzdění vlaku. Čas průjezdu kolem návěstidla, snížený o potenciální dobu brzdění a dobu přípravy jízdni cesty, je pak považován za začátek vyhrazení všech prostorových oddílů (kolejových úseků) za tímto návěstidlem.

V případě, kdy uvažujeme zabezpečení jízdy vozidel systémem ETCS aplikační úrovně 1, algoritmus detekce konfliktů pro každý vlak pohybující se po infrastruktuře určí čas průjezdu vlaku kolem předvěsti (resp. umístění přepínatelné balízy) jednotlivých návěstidel z již dříve vypočítaného dynamického profilu. Čas průjezdu kolem předvěsti hlavního návěstidla, snížený o dobu přípravy jízdni cesty, je pak považován za začátek vyhrazení všech prostorových oddílů (kolejových úseků) za tímto hlavním návěstidlem.

Za konec vyhrazení je uvažován čas, kdy konec vlaku uvolní konkrétní prostorový oddíl – projede přední hranici prostorového oddílu.

Každému prostorovému oddílu jsou přiřazeny časy začátku a konce jeho vyhrazení pro konkrétní vlaky. Pokud se časově překrývají požadavky na vyhrazení dvou či více vlaků, je detekován konflikt mezi těmito vlaky.

Návrh takové detekce konfliktu uvažuje základní principy používané pro zabezpečení jízdy vlaků v prostředí ČR. Úmyslně zanedbává specifické podmínky pro postavení či rušení jízdni cesty, definované v [9], případně obdobných dokumentů zahraničních správců infrastruktury. Jejich zohlednění by výrazně ztěžovalo návrh algoritmu a způsobilo výraznou závislost na konkrétním typu zabezpečovacího zařízení a specifických požadavcích vyplývajících z místních poměrů. Přitom z hlediska detekce konfliktů v úrovni operativního řízení, kdy je preferován makroskopický pohled na celou řízenou oblast či dokonce celou síť, by takové zohlednění specifických podmínek nemělo

žádný výrazný vliv²⁵. Uvažování těchto specifických podmínek by přicházelo v úvahu až v úrovni přímého řízení, ve které je zajištěna vazba na konkrétní zabezpečovací zařízení.

Pokud by v budoucnu byly definovány nové požadavky řízení provozu vlaků v prostorových oddílech, vyplývající z vybavenosti všech vlaků pohybujících se po vybrané infrastruktuře, např. úplné odstranění návěstidel (i virtuálních), je možné uvedený algoritmus přizpůsobit výše uvedenému návrhu. Čas začátku vyhrazení prostorového oddílu bude určen časem jeho obsazením (čelo vlaku projede zadní hranici prostorového oddílu), snížený o potencionální dobu brzdění.

4.3.2.2.2 Řízení provozu flexibilním způsobem

V případech, kdy není infrastruktura rozdělena na pevné prostorové oddíly z hlediska řízení provozu, zůstávají v infrastruktuře jediné pevné body v podobě výhybek. Pouze výhybky umožňují změnu trasy v prostoru, proto je nutné vyloučit protisměrné jízdy vlaků v úseku ohraničeném výhybkami, pokud by se mělo překrývat v čase a v prostoru jejich oprávnění k jízdě. Nemusí tak být vyloučeny jízdy vlaků, pokud vlaky v jednom směru svoji jízdu v určité části úseku ukončí (např. na staniční koleji) a pro další jízdu změní směr.

V případě flexibilního řízení provozu je možná jízda dvou i více vlaků ve stejném směru v tomtéž úseku – oprávnění k jízdě následného vlaku končí v místě bezpečného konce předchozího vlaku. Bezpečnost z hlediska přidělení oprávnění k jízdě není předmětem této práce, je však nutné detekovat konflikt, pokud se jízdy těchto vlaků vzájemně ovlivňují. Přitom je nutné obecně uvažovat s rozdílnými rychlostmi vlaků, hodnotami zrychlení a odrychlení, i případnými místy zastavení v takovém úseku.

Při detekci konfliktů se uvažuje s axiomem, že vlak je v každé fázi jeho jízdy schopen zastavit v dostatečně bezpečné vzdálenosti před koncem předchozího vlaku, který může i „skokově“ změnit svoji rychlost – např. z důvodu vykolejení, srážky či jiné mimořádné události. Pak musí být vzdálenost dvou za sebou jedoucích vlaků větší než brzdná dráha druhého vlaku z okamžité rychlosti při uvažování aktuálních parametrů vlaku a infrastruktury. Pokud je znám dynamický profil prvního vlaku, není nutné znát jeho další parametry.

²⁵ Pro určité případy mohou být zapevněny i prvky, které nejsou bezprostředně projížděny. K jejich uvolnění dojde až po průjezdu vlaku určitým místem jeho trasy, přičemž v některých případech až po stanoveném časovém zpoždění, které může být až v řádu desítek sekund. Pokud je však trasa korektně naplánována, nezůstane žádný z takto zapevněných prvků trvale zapevněn. Uvedené časové zpoždění by nemělo mít vliv na rozhodnutí o sledu vlaků.

S ohledem na stávající kodex dobré praxe se neuvažují případy tzv. „virtual-coupling“ [28]. Myšlenka tohoto provozu je založena na vzájemné kooperaci vozidel. Předpokládá se, že rychlost prvního vlaku se nemůže „skokově změnit“. Brzdná dráha prvního vlaku tak může být využita i vlakem druhým.

Pro vyloučení zjevných výsledků detekce konfliktů a tím snížení nutného výpočetního výkonu je algoritmus rozdělen do několika kroků.

V prvním kroku je určena společně pojížděná část infrastruktury jednotlivých vlaků. Vlaky, které nemají společnou množinu prvků v podobě pojížděných úseků (průnik množin je roven nule) jsou vyřazeny pro další kroky hledání konfliktů.

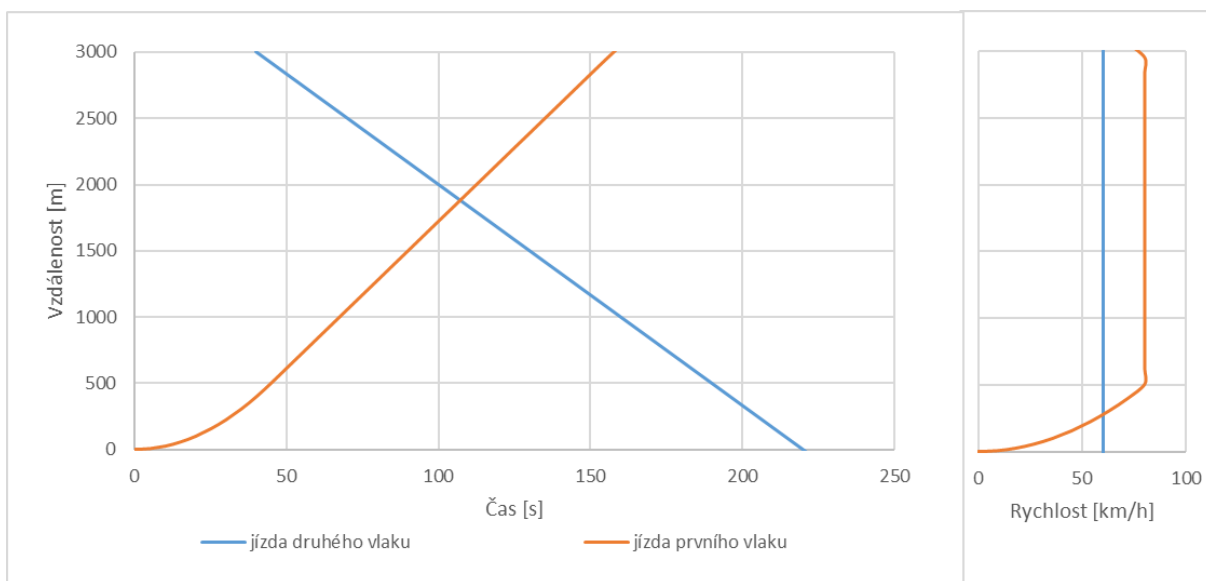
Do druhého kroku tedy postupují pouze vlaky, které mají společnou množinu pojížděných úseků, ohraničených dvojicí výměn. Z již dříve vypočítaného dynamického profilu jsou známy časy průjezdů těmito hraničními výhybkami. V druhém kroku lze vyřadit všechny zbývající vlaky, u nichž se časově nepřekrývá doba vyhrazení společného úseku – každému společnému úseku je přiřazen čas začátku vyhrazení odpovídající času průjezdu čela vlaku první výhybkou a čas konce vyhrazení odpovídající času průjezdu konce vlaku druhou výhybkou. Pokud vlak v úseku končí svoji jízdu²⁶, určí se čas konce vyhrazení buď časem opuštění úseku navazujícím vlakem (se kterým má vazbu v podobě přechodu hnacího vozidla i soupravy) nebo koncem manipulace (např. přestavení vozidel na jinou kolej). Pokud se časy vyhrazení některého ze společných úseků překrývají, postupují dotčené vlaky do třetího kroku posouzení.

Ve třetím kroku se posuzují jízdy vlaků, kdy se překrývá čas vyhrazení úseku dle předchozího kroku, zjednodušenou metodou:

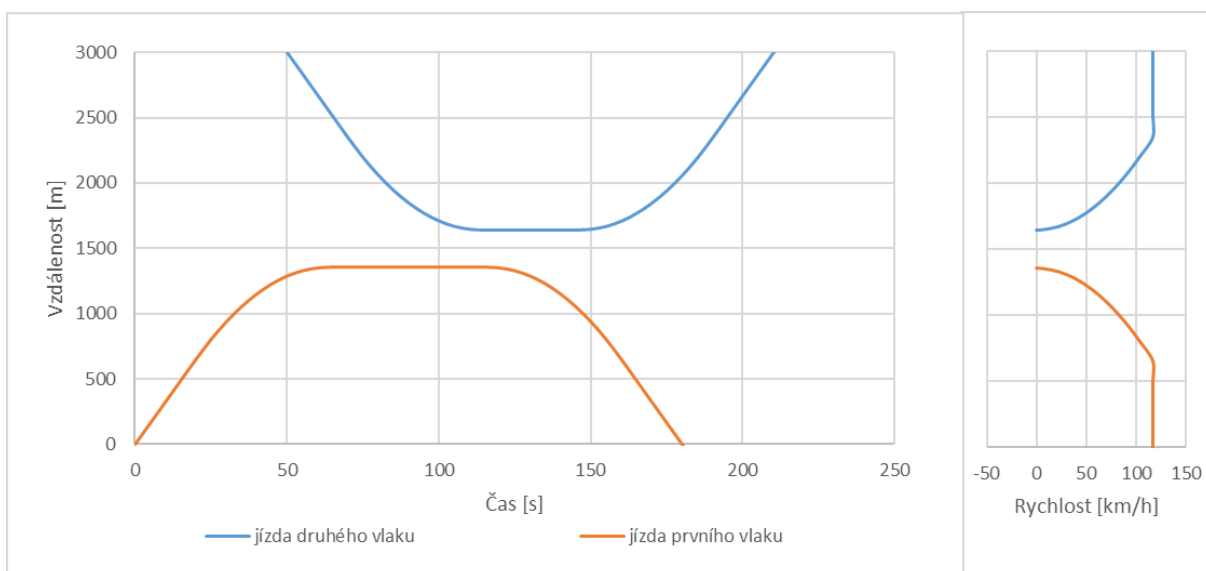
- případy protisměrných jízd vlaků
 - je detekován konflikt mezi vlaky, které projíždějí (ve smyslu nemění směr) společným úsekem, ohraničeným dvojicí výměn, a překrývá se čas vyhrazení tohoto úseku (viz Obrázek 14) – vlaky se již nemají kde vyhnout, není již třeba postupovat do dalšího kroku detekce konfliktů;
 - z dalšího posuzování konfliktu jsou vyřazeny všechny vlaky, které ve společném úseku končí, resp. mění svůj směr (např. staniční kolej), a zároveň se překrývá jejich oprávnění k jízdě v prostoru (viz Obrázek 15);

²⁶ změna směru jízdy vlaku je pro účely detekce konfliktů považována za ukončení jízdy vlaku v daném úseku a její následné zahájení v opačném směru

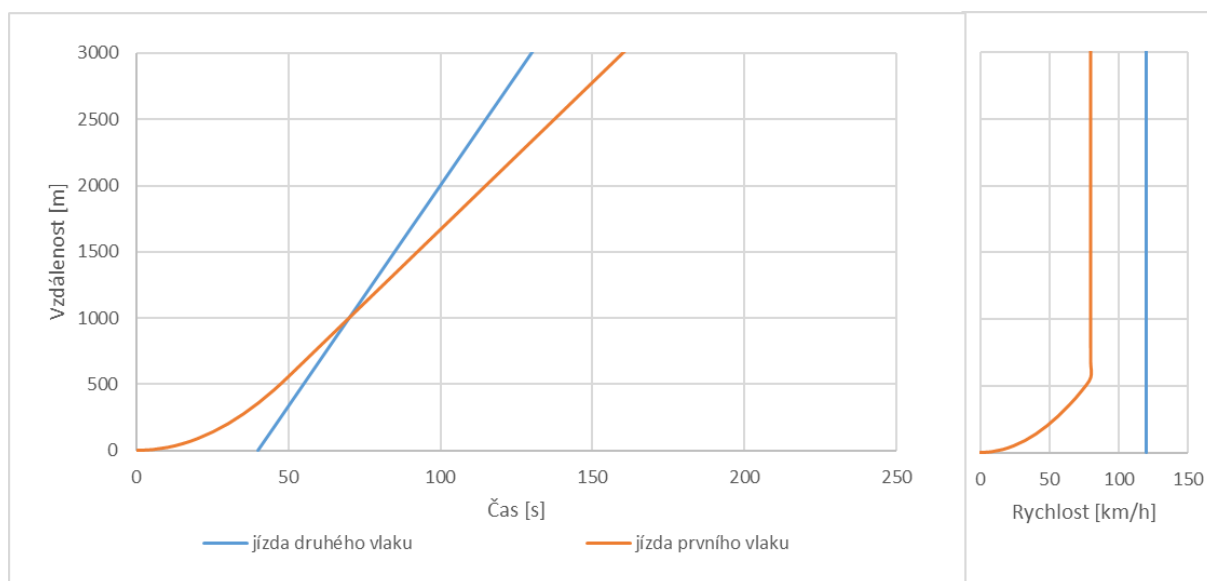
- případy stejným směrem jedoucích vlaků
 - je detekován konflikt mezi dvojicí vlaků, kdy začátek doby vyhrazení úseku jedním vlakem je menší než začátek doby vyhrazení úseku druhým vlakem a zároveň konec doby vyhrazení úseku jedním vlakem je větší než konec doby vyhrazení úseku druhým vlakem (viz Obrázek 16) – vlaky se v úseku předjíždějí, není již třeba postupovat do dalšího kroku detekce konfliktů;



Obrázek 14: Příklad konfliktu protisměrně jedoucích vlaků
Zdroj: autor



Obrázek 15: Příklad protisměrně jedoucích vlaků vzájemně se neovlivňujících
Zdroj: autor



Obrázek 16: Příklad konfliktu stejným směrem jedoucích vlaků

Ustálená rychlost prvního vlaku 80 km/h (výchozí rychlost 0 km/h, zrychlení 0,45 m/s²), druhého vlaku 120 km/h. Zdroj: autor

Všechny ostatní vlaky postupují do čtvrtého kroku posouzení.

Ve čtvrtém kroku se posuzuje vždy dvojce vlaků se společnou množinou pojížděných úseků, v nichž se překrývá doba vyhrazení. Vzhledem k množině kombinací, kdy vlaky mohou vstoupit do takto společného úseku proti sobě nebo za sebou, projet úsekem bez zastavení nebo i vícekrát zastavit v libovolném místě, projet celým úsekem v jednom směru nebo v určitém bodě tohoto úseku zastavit a změnit směr, přičemž je nutné uvažovat s rozdílnými rychlostmi jednotlivých vlaků a parametry zrychlení či odrychlení, je nezbytné uvažovat konkrétní dynamické profily těchto vlaků.

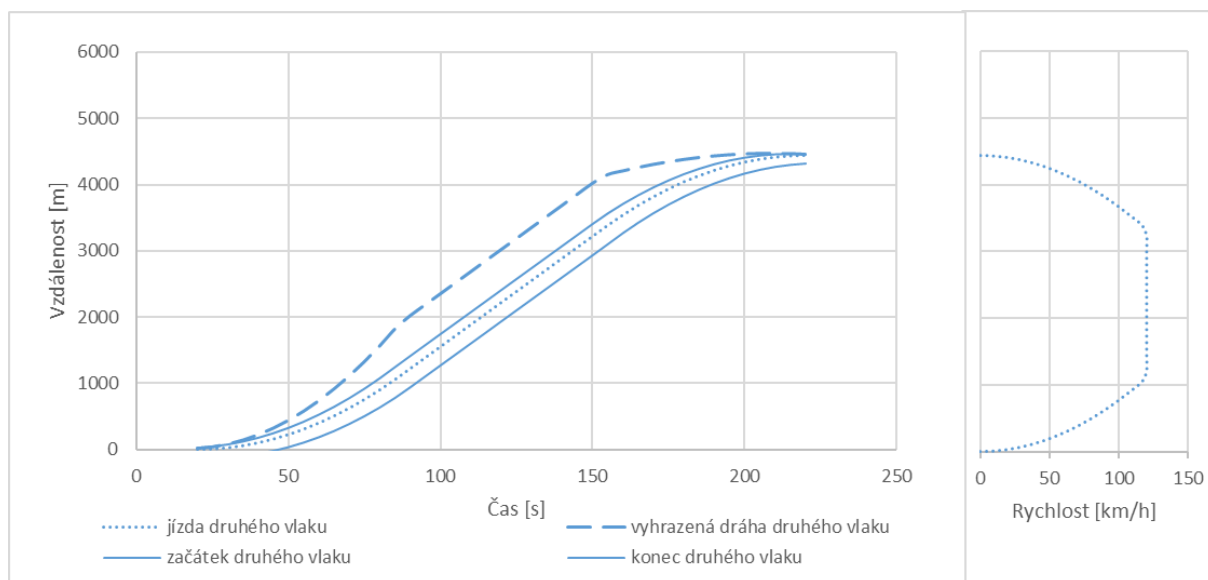
V celém úseku společné trasy, který se skládá z jednotlivých úseků infrastruktury ohraničených výhybkami, se vypočítá přesný dynamický profil – závislost rychlosti na dráze, přičemž se uvažují aktuální parametry vlaku a infrastruktury. Má-li být výpočet přesný, musí se uvažovat změna hodnoty zrychlení v závislosti na rychlosti.

Pokud se jízda dvou za sebou jedoucích vlaků nemá ovlivňovat, musí být od sebe natolik vzdáleny, že brzdná dráha druhého vlaku nezasahuje do prostoru jízdy prvního vlaku. Přitom brzdná dráha druhého vlaku se zvyšuje s jeho rychlostí – při nízkých rychlostech druhého vlaku mohou být k sobě vlaky blíže než při vyšších rychlostech.

Více než v případě klasického řízení provozu v prostorových oddílech se u flexibilního řízení provozu projevuje nepřesnost v určení polohy vozidla v infrastruktuře (bezpečný začátek a konec vlaku) a zpoždění přenosu informací mezi jednotlivými částmi řídicích a zabezpečovacích systémů.

Nepřesnost určení polohy závisí především na hustotě rozmístění balíz a přesnosti použitého odometru na vozidle. Hodnota nepřesnosti určení polohy může dosahovat až desítky metrů, o kterou je nutno posunout bezpečný začátek, resp. konec, vlaku. To má vliv na bezpečný odstup dvou vlaků. Zpoždění přenosu informací může být v řádu sekund, tomu odpovídá ujetá vzdálenost v závislosti na rychlosti vlaku. Oba tyto aspekty je nutné zahrnout do výpočtu bezpečného začátku a konce vlaku a vyhrazené dráhy vlaku.

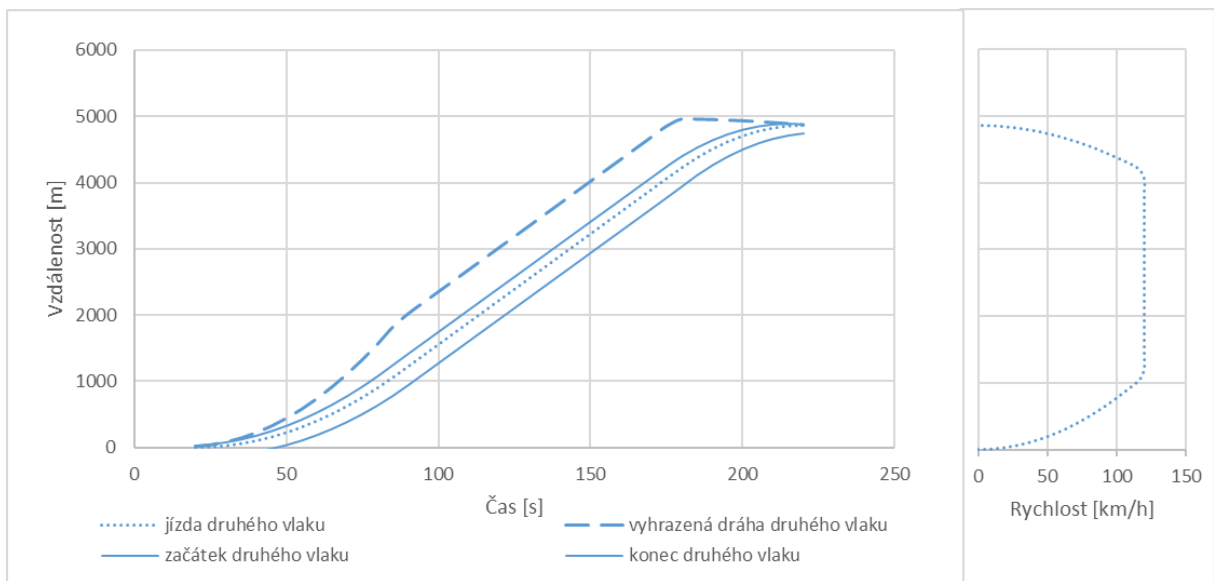
Obrázek 17 znázorňuje průběh rychlosti vlaku, polohu vlaku v čase a tomu odpovídající prostor vyhrazení v čase. Z obrázku je patrné, jak se s rostoucí rychlostí zvětšuje dráha nezbytná pro zastavení vlaku, tedy vyhrazený prostor v čase, který nesmí být obsazen jiným vlakem. Pro zjednodušení se uvažuje s průměrnou hodnotou zrychlení a odrychlení plánované jízdy vlaku. V běžných případech bude v plánovaném dynamickém profilu průměrné odrychlení při zastavování vlaku nižší než uvažovaná hodnota odrychlení vlakového zabezpečovače.



Obrázek 17: Vyhrazený prostor v čase

Výchozí a cílová rychlost 0 km/h, ustálená rychlost 120 km/h, průměrné zrychlení a odrychlení 0,5 m/s², uvažované odrychlení vlakového zabezpečovače 0,9 m/s². Zdroj: autor

V případech, kdy se uvažuje v plánovaném dynamickém profilu odrychlení blíží se uvažované hodnotě odrychlení vlakového zabezpečovače, vyhrazený prostor se ve fázi brzdění zvětšuje a je ohraničený vodorovně v místě zastavení, viz Obrázek 18. To může mít vliv na dojezd předchozího zastavujícího vlaku. K tomuto se model bude blížit v případech, kdy vlivem zpoždění je snaha krátit jízdní doby a dynamický profil je plánován na hranici možností použitého vlakového zabezpečovače. Má-li být výpočet přesný, musí se uvažovat změna hodnoty odrychlení v závislosti na rychlosti podle brzděného modelu použitého vlakového zabezpečovače – systému ETCS.

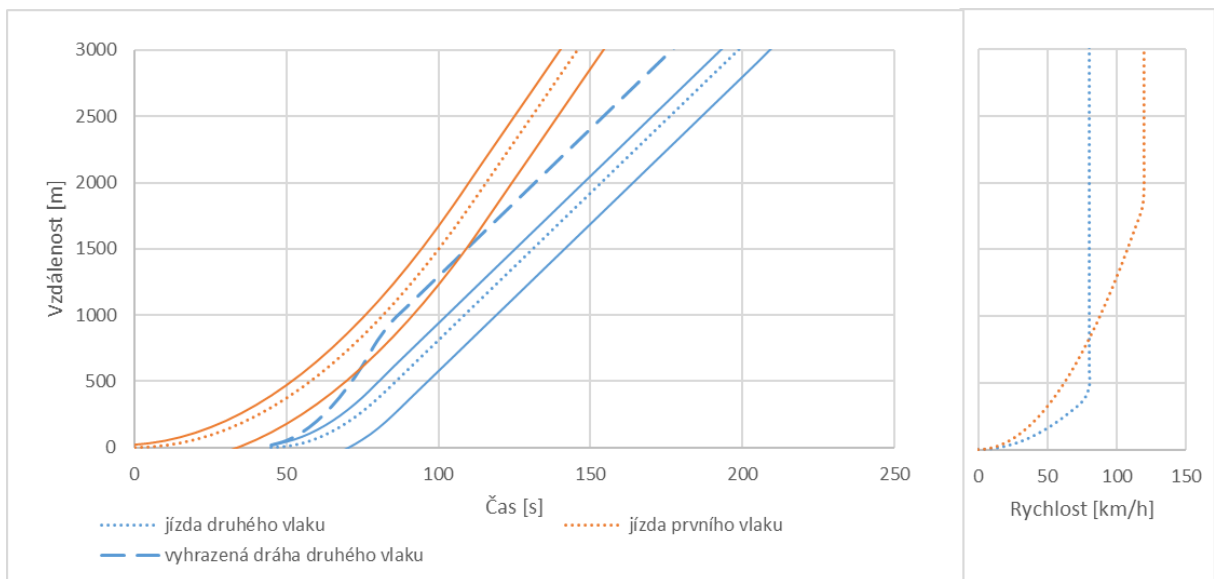


Obrázek 18: Vyhrazený prostor v čase

Výchozí a cílová rychlost 0 km/h, ustálená rychlost 120 km/h, průměrné zrychlení $0,5 \text{ m/s}^2$ a odrychlení $0,8 \text{ m/s}^2$, uvažované odrychlení vlakového zabezpečovače $0,9 \text{ m/s}^2$. Zdroj: autor

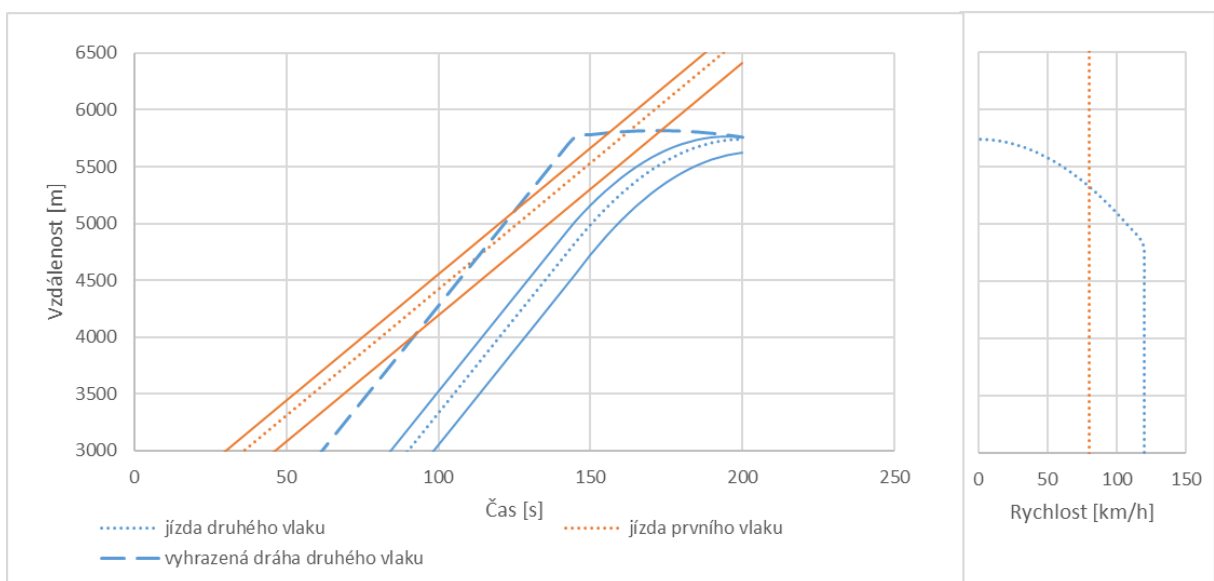
Ke konfliktům může docházet v každé fázi jízdy vlaku. Příklady jsou uvedeny níže:

- konflikt ve fázi rozjezdu (Obrázek 19) – vyšší hodnota zrychlení druhého vlaku (např. rozjezd osobního vlaku s vysokou hodnotou zrychlení za relativně těžším rychlíkem s nižší hodnotou zrychlení),
- konflikt ve fázi brzdění (Obrázek 20) – dojezd pomalejšího vlaku (např. dojezd osobního vlaku zastavujícího na zastávce pomalejší nákladní vlak),
- konflikt ve fázi brzdění (Obrázek 21) – zastavující vlaky s rozdílnou hodnotou odrychlení,
- konflikt dvou protijedoucích vlaků.



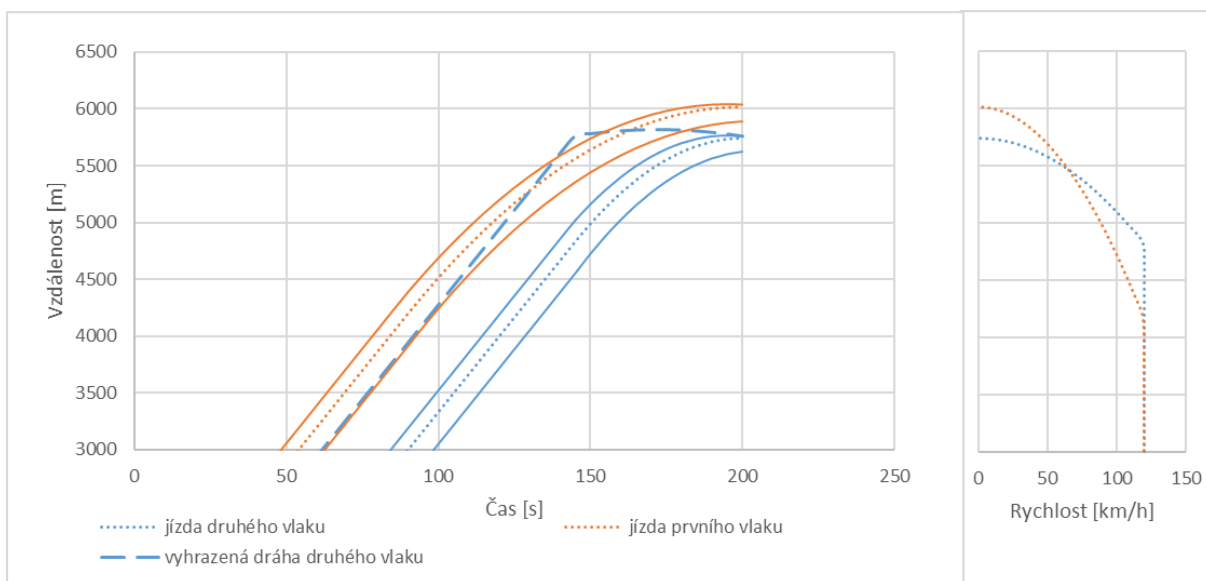
Obrázek 19: Příklad konfliktu ve fázi rozjezdu vlaku

Výchozí rychlost obou vlaků 0 km/h, průměrné zrychlení prvního vlaku $0,3 \text{ m/s}^2$, druhého vlaku $0,6 \text{ m/s}^2$, ustálená rychlost prvního vlaku 120 km/h, druhého vlaku 80 km/h. Zdroj: autor



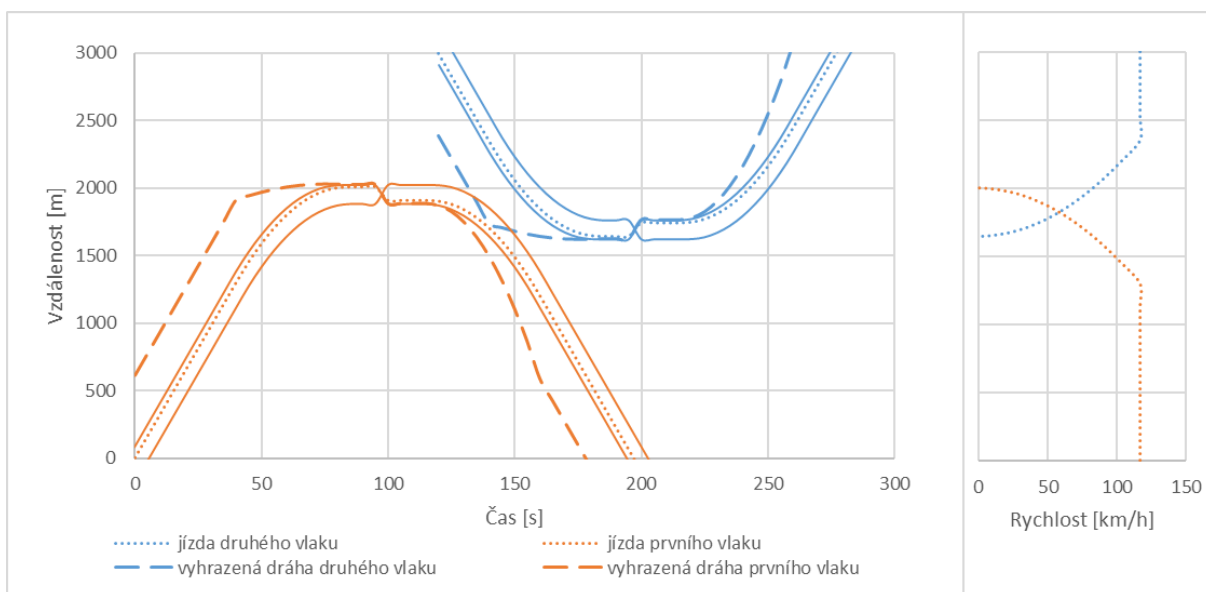
Obrázek 20: Příklad konfliktu ve fázi brzdění vlaku

Dojezd pomalejšího vlaku. Ustálená rychlost prvního vlaku 80 km/h, druhého vlaku 120 km/h, průměrné odrychlení druhého vlaku $0,6 \text{ m/s}^2$, cílová rychlost druhého vlaku 0 km/h. Zdroj: autor



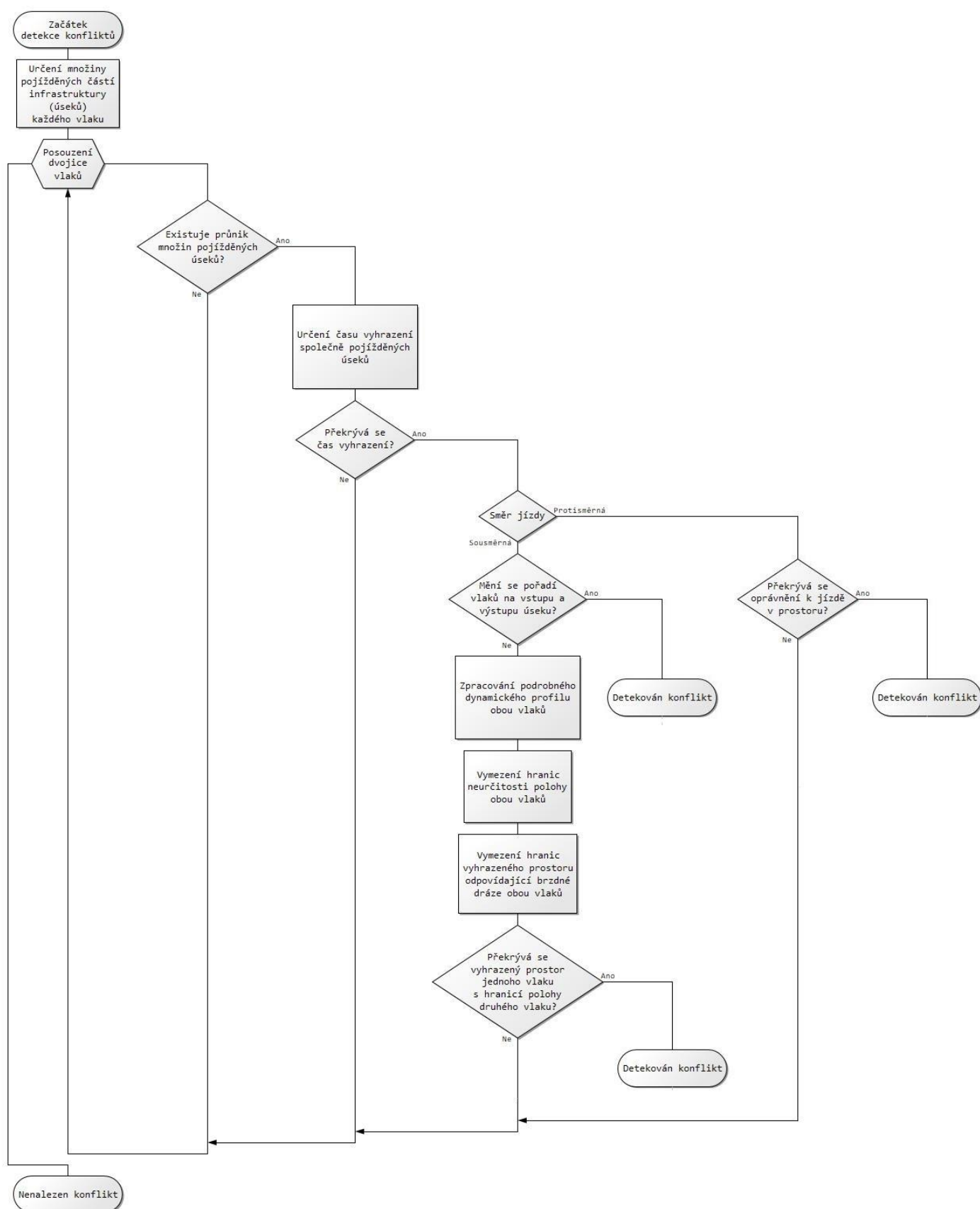
Obrázek 21: Příklad konfliktu ve fázi brzdění vlaku

Zastavující vlaky s rozdílnou hodnotou odrychlení. Ustálená rychlost obou vlaků 120 km/h, průměrné odrychlení prvního vlaku 0,3 m/s², druhého vlaku 0,6 m/s², cílová rychlost obou vlaků 0 km/h. Zdroj: autor



Obrázek 22: Konflikt dvou protijedoucích vlaků

Zdroj: autor



Obrázek 23: Vývojový diagram algoritmu pro detekci konfliktů
Zdroj: autor

4.3.2.2.3 Odstranění konfliktů v jízdách vlaků

Pro odstranění konfliktu je nutné trasu alespoň jednoho vlaku změnit, přitom lze využít změnu v čase (zpoždění či náskok) nebo v prostoru (jízda po jiné koleji). V obou těchto případech je nutné přepočítat trasu, zohlednit všechny okrajové podmínky a znovu posoudit případné konflikty.

Z provozního hlediska je nutné rozlišovat změnu trasy v prostoru provedenou:

- zachováním naplánované „makro“ trasy – zůstává zachován sled dopraven a mezistaničních úseků, ale mění se využití staničních či traťových kolejí
- úplnou změnou trasy (jízda po odklonové trase)

První výše uvedenou variantu lze většinou realizovat bez dalších nutných administrativních opatření, pokud jsou splněny všechny okrajové podmínky. Např. změna staniční koleje je velmi častý důvod změny trasy v prostoru, která je většinou zapříčiněna aktuální dopravní situací (jízdy jiných vlaků), poruchou v infrastruktuře nebo požadavkem dopravce.

Naopak pro úplnou změnu trasy je nutné zavést administrativní opatření, ověřit např. seznámení strojvedoucího s poměry na trati, zpravit zaměstnance řídící provoz apod. V tomto případě musí být stávající naplánovaná trasa zrušena a vlak předán strategickému řízení, které přidělí trasu novou po odklonové trase.

Z hlediska změny trasy v čase lze uvažovat s prodloužením jízdní doby (zpožděním) vybraného vlaku, v některých případech i s jízdou s náskokem – toho lze dosáhnout krácením jízdních dob (využitím přírážek v naplánovaném GVD) nebo krácením pobytů. Obecně lze říci, že pobyty mohou být kráceny u nákladních vlaků, pokud byly již provedeny všechny technologické úkony. U osobních vlaků mohou být kráceny pobyty, pokud je vlak zpožděn – tedy již uplynul naplánovaný a zveřejněný čas odjezdu (výjimku umožňuje značka obrácené T „vlak může odjet ihned po ukončení výstupu cestujících“ v jízdním řádu).

4.3.3 Principy algoritmů pro optimalizaci řízení provozu

V následujících podkapitolách jsou uvedeny úvahy a základní principy algoritmů pro řešení konfliktů v jízdách vlaků. V této disertační práci není navržen konkrétní algoritmus, ten by měl být předmětem dalšího výzkumu, avšak měl by zohledňovat úvahy zde uvedené.

4.3.3.1 *Využití technologií pro řízení provozu*

Před samotným návrhem řídicích a zabezpečovacích systémů je nutné zamyslet se nad způsobem jeho použití a rozhraním člověk stroj. Snaha úplně odstranit člověka z procesů řízení a zabezpečení pravděpodobně ještě dlouho nebude naplněna. Zde je vhodné brát v úvahu základní axiomy:

- 1) Člověk je tvor chybující, ale kreativní
- 2) Opakovatelnost versus kreativnost
- 3) Sledování versus ovládání systému
- 4) Cíl musí být stejný (rozdílná kritéria optimalizace)
- 5) Váhat do poslední chvíle nebo raději zvolit včas řešení, ať už je sebehorší

Ad 1) Člověk dlouhodobě není schopen vykonávat rutinní činnosti, aniž by se dopouštěl chyb. Proto musí být definován proces tak, aby v kritických okamžicích byl kontrolován – ať už technologickým postupem nebo automatizovaným systémem. Zde je zcela opodstatněná snaha nahradit člověka zcela, a to konkrétně zabezpečovacím zařízením, pokud se bavíme o zajištění bezpečnosti železniční dopravy. Z pohledu řízení provozu je pak vhodné, aby rutinní činnosti v podobě stavění vlakových cest byly nahrazeny automatizovaným systémem.

Avšak druhou vlastností člověka je jeho kreativnost, zatímco automatizační systém je schopen vykonávat pouze předem definovaný algoritmus. Schopnost systému vypořádat se s určitou dopravní situací je závislý na jeho návrhu. Ovšem těžko si představit, že během návrhu systému jsou jeho autoři schopni předem definovat všechny situace, které mohou nastat. A zároveň je dobré si uvědomit, že čím složitější systém se snaží autoři navrhout, tím více je náchylný ke špatnému rozpoznání situace a jejímu správnému řešení. O to složitější pak je, aby se obsluha tohoto systému zorientovala, v jakém stavu se systém nachází.

V současné době se vyvíjí algoritmy umělé inteligence, u nichž se předpokládá, že jsou schopny řešit komplexní úlohy, zahrnující velkou množinu vstupních informací. S využitím sofistikovaných algoritmů a vysokého výpočetního výkonu mohou dosahovat výsledků na předem definované úloze, kterých člověk není schopen dosáhnout.

Základem návrhu systému optimalizace železničního provozu by pak mělo být využití kladných vlastností automatizačních systémů a jeho obsluhy – tedy nechat automatizační systém vykonávat rutinní činnosti, především „jednoduché“ algoritmy a výpočty (např. jízdní doby, ...), případně jednoznačně definované rozhodovací úlohy za daných okrajových podmínek. Naopak člověka ponechat ve vrcholné rozhodovací úrovni, který volí strategii řešení při složitějších dopravních situacích.

Ad 2) Výhodou automatizačních systémů je, nebereme-li v úvahu různé algoritmy umělé inteligence, že vždy dosáhneme stejného výsledku v závislosti na algoritmu – a to ať už pozitivního nebo negativního, ale opakovatelného. Vytvoříme-li jakýkoliv sofistikovaný algoritmus, který má volit řešení určité dopravní situace, dosáhneme výsledku v porovnání s člověkem, že určitá část lidí by zvolila lepší variantu a část horší. Kvalitu tohoto algoritmu lze porovnat pouze poměrem těchto skupin lidí. Vezměme si příklad z šachové hry – přestože pravidla i cíl hry jsou jednoznačně definovaná, trvalo mnoho let, než se podařilo vytvořit algoritmus, který porazil nejlepšího šachového hráče. A teď porovnejme, jak jsou definována „pravidla a cíle“ optimalizace řízení železničního provozu. Co je vlastně optimalizační kritérium...

Nicméně nespornou výhodou automatizačního systému je jeho opakovatelnost. A nyní je nutné definovat, co je v případě řízení železničního provozu výhodnější – spoléhat na aktuální psychický a fyzický stav konkrétního dispečera řídícího provoz nebo nechat průměrný automatizační systém rozhodovat vždy stejně na základě předem definovaných pravidel? Lze předpokládat, že odstraněním náhodnosti, a naopak zvýšením předvídatelnosti chování lze celkově dosáhnout lepších a stabilnějších výsledků.

Ad 3) Jak bylo již zmíněno, ať je systém sebedokonalejší, vždy nastane situace, kterou autoři neočekávali nebo ji nebyli schopni řešit. V tu chvíli je nezbytný zásah obsluhujícího zaměstnance. Ovšem dostáváme se do problému, jak člověku sdělit, co má vlastně dělat.

Je známo, že sledování sofistikovaného automatizačního systému může být náročnější než samotná obsluha jednoduchého systému.

Máme-li vysoce automatizovaný systém, musíme brát v úvahu, že jeho obsluha ztrácí koncentraci pouhým sledováním jeho činnosti, ztrácí své schopnosti a návyky v manuální obsluze. Při náhlém výpadku nebo nutnosti zásahu musí obsluha nejprve identifikovat aktuální stav systému, zorientovat se v aktuální dopravní situaci a aktivovat své návyky pro manuální obsluhu. To může způsobit vznik zpoždění či snížení bezpečnosti. Snížení těchto následků dosáhneme přesně definovanými postupy, na které je obsluha pravidelně školená a procvičována. Je nezbytné se ve velké míře zaměřit na rozhraní člověk-stroj, aby systém poskytoval srozumitelné, přesné, komplexní, ale zároveň přiměřené informace.

Ad 4) Vzhledem k tomu, že optimalizační systém na základě výše uvedených okolností nemá pracovat zcela autonomně, je nutné, aby byla jednoznačně definována „pravidla hry“. Není možné, aby systém optimalizace uvažoval s jinými okrajovými podmínkami nebo optimalizačním kritériem než jeho obsluhující zaměstnanec. V opačném případě člověk nevěří stroji a stroj nerozpozná instrukce člověka.

Ad 5) Ať už rozhoduje člověk nebo optimalizační systém, existují dva principy z hlediska včasnosti rozhodnutí: vypočítávat optimální variantu do poslední možné chvíle, nebo v určitý čas vydat rozhodnutí (ať už by se později ukázalo jako horší) a snažit se ovlivňovat řízený systém tak, aby se co nejvíce přizpůsobil.

V praxi se ukazuje, že varianta čekat do poslední chvíle, jak se dopravní situace vyvine, abychom na poslední chvíli sdělili cestujícím, na které nástupiště vlak přijede, dopravci, jaké bude pořadí vlaků, strojvedoucímu, má-li brzdit, protože ho zastavíme u vjezdového návěstidla, nebo naopak jet na hranici možností, protože potřebujeme co nejrychleji uvolnit zhlaví, není vyhovující.

Výrazně lepších výsledků lze dosáhnout, pokud se včas zveřejní zvolená strategie – určí se pořadí vlaků, jejich konkrétní trasa v prostoru a čase. Vzhledem k tomu, že dnešní technologie umožňují přenést tyto informace všem zúčastněným subjektům, mají možnost se tomu přizpůsobit a sami optimalizovat svoji činnost – strojvedoucí (případně automatizační systém vozidla) přizpůsobí jízdu vozidla, cestující se stihnou včas přesunout atd.

4.3.3.2 Řešení konfliktů v jízdách vlaků

Bude-li uvažováno automatizované vyhledávání optimálního řešení dopravní situace, je nutné definovat základní principy tvorby jednotlivých scénářů dopravní situace, ze kterých je následně na základě optimalizačních kritérií uvedených v kapitole 4.2.2 vybrán optimální scénář.

Hledání scénářů pro odstranění konfliktů lze rozdělit do dvou rovin – změna trasy vlaku v prostoru nebo v čase.

Při hledání scénáře v rovině časové je nutné rozlišit, zda se detekovaný konflikt týká vlaků jedoucích stejným směrem nebo opačným směrem. V případě protisměrných jízd vlaků vznikají dva scénáře: opoždění 1. vlaku a upřednostnění 2. vlaku nebo opoždění 2. vlaku a upřednostnění 1. vlaku, přičemž k opoždění vlaku (křížování) dojde před začátkem společně pojížděné části infrastruktury. V případě sousměrných jízd vlaků se nabízejí dva základní scénáře: opoždění 1. vlaku před začátkem společně pojížděné části infrastruktury a upřednostnění 2. vlaku (předjetí), nebo opoždění 2. vlaku.

Vzhledem k tomu, že společně pojížděná část infrastruktury může být dlouhá přes několik dopraven, je nutné tvorbu těchto scénářů kombinovat s hledáním scénářů v rovině prostorové.

Při hledání scénáře v rovině prostorové je nutné nalézt variantní cesty. Od místa vzniku konfliktu se postupuje proti směru jízdy vlaku (v případě nutnosti až k místu aktuální polohy vlaku) a v místě každé výhybky pojížděné proti hrotu se prověřuje možnost variantní cesty. Variantní cesta je akceptovatelná, pokud umožňuje návrat na původně naplánovanou trasu v prostoru. Přitom se využívá algoritmu prohledávání do hloubky. Návrat na původní trasu může být v ideálním případě za místem konfliktu (vlak se jízdou po jiné staniční či traťové koleji vyhne místu konfliktu a není nutné hledat řešení v rovině časové vedoucí ke zpoždění některého z vlaků). Pokud se variantní cesta navrátí ještě před místem konfliktu, rozdělí se původně jedna delší část společně pojížděné infrastruktury na dvě menší. To umožní předjetí či křižování vlaků dříve než při uvažování původní delší části společně pojížděné infrastruktury. Pro každou variantní cestu je nutné vypočítat dynamický profil jízdy vlaku.

Pro každý detekovaný konflikt vzniká jeden či více scénářů řešení. Pro každý nový scénář, vzniklý v rovině časové, prostorové nebo jejich kombinací, je nutné posoudit konflikty podle kapitoly 4.3.2. Se vznikem každého dalšího nového konfliktu se hledání řešení dopravní situace větví. Všechny bezkonfliktní scénáře jsou posouzeny a ohodnoceny podle definovaných optimalizačních kritérií. Jedná se o NP těžkou úlohu a má-li být výpočetně zvládnutelná, musí se předem hledání některých scénářů omezit nebo z posuzování vyřadit (např. množství variantních cest). Nastavení kritérií pro hledání scénářů může způsobit, že optimální řešení je vyřazeno a je nalezeno pouze méně vhodné řešení, nebo není řešení nalezeno vůbec.

4.3.3.3 Možnosti využití umělé inteligence

Podle postupu uvedeného v kapitole 4.3.3.2 jsou scénáře řešení dopravní situace generovány deterministicky. Pro každý detekovaný konflikt vznikne jeden až několik scénářů, přičemž každý z těchto scénářů může obsahovat i několik dalších konfliktů. Množství scénářů kombinatoricky roste a může nastat situace, kdy už není možné výpočet optimální varianty řešení dostupným výpočetním výkonem zvládnout. Možným řešením takto rozsáhlých výpočtů může být využití algoritmů umělé inteligence.

Účelem algoritmu umělé inteligence má být nalezení vhodného scénáře, odpovídající řešení dopravní situaci. Přitom scénáře nejsou generovány hrubou silou, ale naopak s určitou mírou „inteligence“. Požadavkem je, aby se tento scénář nejvíce blížil definovanému kritériu optimalizace.

Z dostupných algoritmů umělé inteligence [31] se jeví jako nejvhodnější použití genetického programování. Jako jeden z mála algoritmů umělé inteligence nevyžaduje proces učení. Lze mu

jednoznačně definovat optimalizační funkci, která musí odpovídat platné legislativě. Genetické programování je založeno na principu dědičnosti, řadí se mezi tzv. evoluční algoritmy, viz [40]. Základními operacemi je křížení a mutace. Obecně lze říci, že se v rámci jedné generace kříží s největší pravděpodobností „silní“ jedinci, tedy jedinci, kteří jsou nejlépe hodnoceni podle daného kritéria. Pravidel křížení existuje několik a určují míru pravděpodobnosti křížení konkrétních jedinců, případně některá křížení přímo vylučuje. U nově vzniklých potomků dochází k mutaci – to přináší do algoritmu náhodnost. V rámci nově vzniklé generace jsou jedinci ohodnoceni podle daného kritéria a opakuje se proces křížení a následné mutace. Dle principů evoluce by každá další generace měla být „lepší“ než ta předchozí.

Princip genetického algoritmu, z něhož genetické programování vychází, je znám a názorně popsán v několika publikacích na příkladu vektoru bitů. Problém v jeho nasazení spočívá v definování jedince pro konkrétní aplikace, určení podmínek selekce a křížení.

Stejně jako většina algoritmů umělé inteligence, i genetický algoritmus může vyhledat pouze suboptimální řešení.

4.3.3.4 Scénáře řešení mimořádných situací

Při řešení mimořádných situací je nezbytná spoluúčast dispečerů všech úrovní řízení provozu a současně dispečerů dotčených dopravců. Jejich vzájemná komunikace ovlivňuje dobu rozhodování při řešení dopravní situace.

Pro uvažované mimořádné situace (např. nesjízdný úsek) je vhodné vytvořit provozní scénáře, které jednoznačně definují technologické postupy (např. zavedení náhradní autobusové dopravy, úprava oběhů hnacích vozidel a souprav). To umožní podstatně rychlejší řešení těchto situací, kdy každý zúčastněný zaměstnanec zná své činnosti a tím se omezí i jejich komunikace při řešení situace.

Seznam scénářů by měl být vypracován v koordinaci s dopravci. Tyto scénáře jsou dostupné a závazné pro všechny subjekty podílející se na řízení provozu a zajištění technologických postupů při mimořádné situaci, a to jak na straně správce infrastruktury, tak na straně dopravce.

4.3.4 Požadavky na rozhraní aplikace

Informační systémy pro podporu operativního řízení provozu musí dispečerovi poskytovat ucelený přehled o řízené oblasti, především:

- plánovaný provoz v řízené oblasti – Plán vlakové dopravy
- aktuální poloha vlaků a plnění GVD
- aktuální požadavky dopravců na řízení sledu jejich vlaků a zachování přípojů (odchylujících se od naplánovaných požadavků)
- aktuální parametry vlaků blížících se nebo pohybujících se v řízené oblasti
- aktuální stav infrastruktury včetně všech jejích omezení
- **výhled provozu v řízené oblasti**, založen na přesné predikci jízdy vlaků a automatizované detekci konfliktů

Dispečerovi by měly být výše uvedené informace zobrazeny tak, aby byly přehledné a usnadnily mu v co největší možné míře jeho rozhodování. Pro zobrazení těchto informací se doporučuje využít:

- nákresný grafikon vlakové dopravy – zobrazení polohy vlaku v závislosti na čase (svislá souřadnice reprezentuje dopravní a traťové úseky – vzdálenost, vodorovná souřadnice reprezentuje čas²⁷)
- plán obsazení kolejí (pro jednotlivé koleje dopraven je znázorněn časový úsek obsazení koleje určitým vlakem či vozidly)
- reliéf kolejiště (pro vybraný vlak, případně více vlaků, je znázorněna jeho trasa v reliéfu kolejiště s časovými kótami)

Pro dispečera s převažujícím charakterem řízení provozu v linii je nezbytný především přehled o jízdách vlaků v prostoru a čase. Ideálním podkladem je nákresný grafikon vlakové dopravy. Změna trasy v čase se provede vybráním místa na trase vlaku a posunem v časové rovině podle požadavků uvedených v kapitole 4.3.1.4.

Pro dispečera s převažujícím charakterem řízení provozu v uzlu je nezbytný především přehled o obsazení jednotlivých kolejí v uzlových stanicích a časech vstupu vlaků do jeho řízené oblasti. Ideálním podkladem je plán obsazení kolejí. Dispečer musí mít možnost změnit pořadí vlaků vstupujících do uzlu a tyto požadavky musí být přeneseny do předchozí sousední oblasti řízení, aby tato oblast mohla požadovaný sled vlaků zajistit. Plán obsazení kolejí umožňuje měnit časovou

²⁷ Nákresné grafikony některých zahraničních správců infrastruktury či dopravců mají prohozený význam souřadnic

polohu přijíždějících a odjíždějících vlaků a použitou kolej v konkrétní dopravně – kombinuje výhody nákrešného GVD a reliéfu kolejiště.

Informační oblast by měla přesahovat řízenou oblast – tedy dispečer by měl mít v dostatečném časovém předstihu informace o vstupu vlaků do jeho řízené oblasti. Proto změny v časové poloze vlaků a jejich sledu v sousedním obvodu řízení provozu musí být automaticky přeneseny do informačních systémů a zobrazeny tomuto dispečerovi. Zároveň musí informační systémy umožňovat přenášet požadavky na změnu sledu vlaků vstupujících do jeho řízené oblasti.

Z hlediska operativního řízení provozu je reliéf kolejiště doplňujícím zdrojem informací. Není primárně určen pro zobrazení aktuální polohy všech vlaků v řízené oblasti a stavu jednotlivých prvků v infrastruktuře. Význam reliéfu kolejiště v úrovni operativního řízení spočívá v zadávání trasy v prostoru. Zobrazuje trasu vybraného vlaku v prostoru, včetně časových kót, a umožňuje modifikaci této trasy. V reliéfu kolejiště jsou rovněž zobrazena omezení v infrastruktuře, která mají vliv na aktuální jízdu vlaků a přeplánování tras. Reliéf kolejiště by měl umožnit i zobrazení budoucího (plánovaného) stavu infrastruktury – polohu vlaků a jejich trasy.

Pro zobrazení vazeb mezi vlaky se použije matice, kde osy bude tvořit seznam vlaků v řízené oblasti. Pro každý vlak budou znázorněny vazby s ostatními vlaky v jednotlivých polích této matice. Graficky budou rozlišeny vazby dle typů uvedených v kapitole 4.3.1.2.4.

4.3.4.1 Navrhované změny v zobrazování prvků nákrešného GVD provozních aplikací

Pro účely návrhu rozhraní mezi obsluhou a systémy pro řízení a zabezpečení železničního provozu byla dlouhodobě sledována obsluha studentů zabezpečovacích zařízení a informačních systému v Dopravním sále Fakulty dopravní v rámci praktických cvičení při výuce předmětu Řízení železniční dopravy (předmět v 5. semestru bakalářského studia studijního programu Technika a technologie v dopravě a spojích, obor Inteligentní dopravní systémy), tento předmět navazuje na dříve akreditované předměty Železniční zabezpečovací systémy a Technologie řízení železniční dopravy.

Byla sledována nejen obsluha jednotlivých zabezpečovacích zařízení, ale současně orientace v řízení železničního provozu a vedení dopravní dokumentace. Přitom byl simulován provoz podle navrženého grafikonu vlakové dopravy. Pro jednotlivé skupiny byly měněny pomůcky – od Seznamu vlaků pro staniční a traťové zaměstnance nebo tištěného listu nákrešného grafikonu vlakové dopravy a vedení dokumentace tištěným Dopravním deníkem až po elektronický grafikon vlakové dopravy zpracovaný podle Směrnice SŽDC č. 109 [32], který současně automaticky vede dopravní dokumentaci.

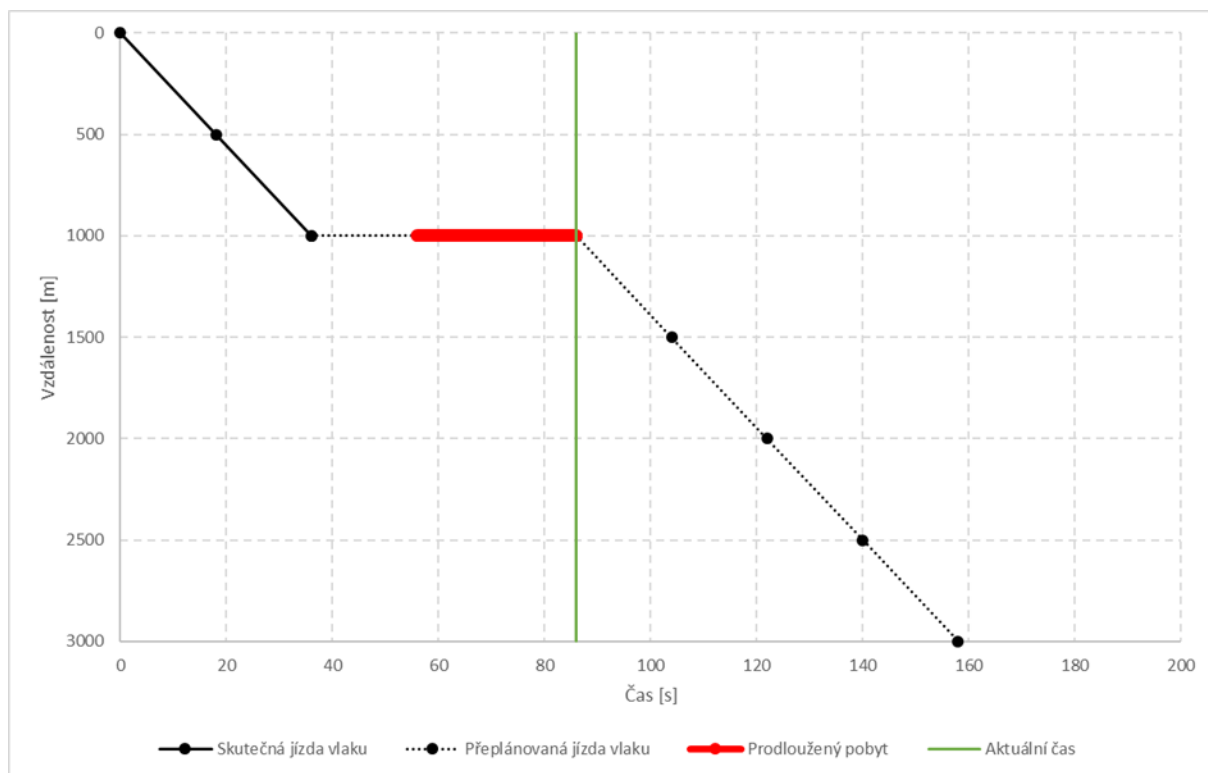
Sledovaná skupina neprošla výcvikem ani zácvikem srovnatelným s dispečery reálného řízení provozu. Nelze tak porovnat objektivní parametry (např. zvýšení zpoždění v řízené oblasti) mezi sledovanou skupinou a dispečery s dlouholetou praxí řízení provozu. Přesto bylo možné sledovat přirozené vjemy a reakce při řízení provozu, nezátížené osvojenými dovednostmi a návyky získanými dlouhodobější obsluhou stávajících systémů.

Obecně lze říci, že v případě statických grafikonů vlakové dopravy sledování studenti více využívali srovnávací orientace, kdy podle poskytnutých pomůcek srovnávali předem naplánované pořadí vlaků s aktuálním provozem. Měli tendenci za každých okolností dodržet naplánované pořadí vlaků v grafikonu vlakové dopravy. Výrazně hůře vyhodnocovali aktuální polohu vlaků a možnosti změny sledu vlaků v případech odchylky od naplánovaného GVD. Naopak stávající zobrazování prvků v listu GVD v provozních aplikacích, kdy se „rovnoběžně“ posouvají trasy v časové ose na základě odchylky naplánovaného času a informace o skutečném času odjezdu nebo průjezdu vlaku, mají studenti tendenci výrazně měnit sled vlaků bez ohledu na jejich aktuální zpoždění či další vazby. Dá se říci, že je upřednostňováno lokální optimum, často i na úkor globálního optima, které je stanoveno naplánovaným GVD. Informace o aktuálním zpoždění se při stávajícím zobrazování prvků v provozních aplikacích ztrácí.

Na základě výše uvedených poznatků se doporučuje trvale poskytovat zřetelnou informaci o aktuálním zpoždění vlaků v nákresem GVD, např. zobrazením doby zpoždění vedle čísel vlaků. Zároveň je vhodné zachovat možnost zobrazení původní plánované časové polohy vybraného vlaku (podle odstavce 11.7 směrnice [32]) s tím, že může být vybráno i více vlaků za účelem zobrazení jejich původně plánovaného sledu.

Časové kóty přestávají být významné, pokud předávání vlaků neprobíhá slovní formou (např. telekomunikačním zařízením). Z hlediska řízení provozu je důležitý relativní časový odstup vlaků pro zachování jejich bezkonfliktní jízdy. Další důležitou informací je odchylka od naplánovaného GVD. Absolutní časová hodnota není důležitá z hlediska řízení sledu vlaků, pokud není potřeba předat vlak sousední oblasti řízení provozu.

Dále se doporučuje měnit predikci jízdy vlaku okamžitě, kdy vlak není schopen naplánovanou trasu v čase realizovat. Není-li v čase naplánovaného odjezdu nebo průjezdu zaznamenán skutečný pohyb vlaku (např. prodlouží se pobyt vlaku ve stanici), musí být průběžně posouvána časová poloha vlaku ve výhledové části GVD. Zároveň se zvýrazní čas mezi plánovaným a aktuálním časem, ve kterém je začátek predikované jízdy.



Obrázek 24: Opožděný odjezd vlaku

Zdroj: autor

4.4 Úroveň přímého řízení provozu

V úrovni přímého řízení provozu je zajišťována bezpečnost železničního provozu. Přímému řízení je předán bezkonfliktní GVD, resp. vlaky z bezkonfliktního GVD jsou předávány průběžně ve stanovenou dobu (např. 10 min) před plánovaným průjezdem vlaku rozhodnými místy infrastruktury²⁸.

Sled vlaků by v rámci přímého řízení již neměl být měněn ani v případě, kdy dojde k nepředpokládanému zpoždění (případně náskoku) kteréhokoliv vlaku.

Dočasný konflikt na úrovni přímého řízení může být ve výjimečných případech způsoben i z důvodu, že nadřazený optimalizační systém neuvažoval všechny specifické podmínky pro realizaci dané cesty kontrolované konkrétním zabezpečovacím zařízením. Optimalizační systém v úrovni

²⁸ Návěstidla (případně virtuální návěstidla) v případě řízení provozu v prostorových oddílech, výhybky v případě řízení provozu flexibilním způsobem, místa zastavení vlaku nebo jiná místa, ve kterých musí být zajištěna bezpečnost železniční dopravy dispečerem přímého řízení

operativního řízení je nezávislý na konkrétním zabezpečovacím zařízení, uvažuje obecné principy zajištění bezpečnosti daného prostředí.

Zároveň by neočekávané zpoždění některého vlaku nemělo způsobit omezení jízdy jiného vlaku, který není prostorově v konfliktu se zpožděným vlakem – např. na dvoukolejné trati, kdy se trasy vlaků vzájemně nevylučují.

Přímé řízení provozu zajišťuje stavění jízdních cest, resp. ovládání prvků infrastruktury pro zajištění jízdy vozidel. Předpokládá se, že v případě jízdy vlaků jsou činnosti přímého řízení plně automatizovány a účast dispečera přímého řízení je nezbytná pouze v situacích, kdy zabezpečovací zařízení není schopno zajistit všechny podmínky pro bezpečnou jízdu vozidla. V případě nutnosti manuálního zásahu dispečer přímého řízení provozu respektuje sled vlaků daný operativním řízením.

V situacích vzniku nepředpokládaného výrazného zpoždění některého z vlaků dispečer přímého řízení situaci konzultuje s dispečerem operativního řízení. Změnit naplánovanou dopravní situaci bez svolení dispečera operativního řízení může pouze v případě, že neovlivní stanovený sled vlaků. Příkladem může být změna pořadí průjezdu vlaků přes zhlaví stanice dvou vjíždějících vlaků z různých směrů.

V případě neočekávané poruchy některého z prvků infrastruktury dispečer přímého řízení zajistí jízdu vlaku po jiné části infrastruktury (např. změna staniční koleje), pokud neovlivní stanovený sled vlaků.

V případech, kdy nelze realizovat naplánovanou dopravní situaci (náhlá neprovozuschopnost některého vlaku nebo nesjízdnost části infrastruktury, která znemožní jízdu některého vlaku) dispečer přímého řízení zastaví vykonávání automatizovaného stavění jízdních cest a předá všechny dotčené vlaky zpět operativnímu řízení, který v koordinaci s dopravcem zajistí potřebné vazby mezi dotčenými vlaky. Dispečer přímého řízení může umožnit pouze jízdu vlaků, které s dotčeným vlakem nemají žádnou vazbu (nejen přestupní vazba cestujících, ale i vazba z hlediska sledu vlaků).

Dispečer přímého řízení zajišťuje organizaci a realizaci posunu. Musí zajistit, aby včas byl ukončen rušící posun a nedošlo k ovlivnění naplánovaných jízd vlaků. Všechny mimořádnosti, které by dočasně způsobily neprůjezdnost určitou částí infrastruktury, musí nahlásit dispečerovi operativního řízení.

Přímé řízení provozu je zodpovědné, že není umožněna jízda vlaku, aniž by byl zpraven dle požadavků na zajištění bezpečnosti.

V případech nutného zásahu do naplánované dopravní situace (např. změna koleje) musí dispečer přímého řízení zajistit informování cestujících a zajistit jejich bezpečnost.

Automatizační nadstavba v úrovni přímého řízení provozu zajišťuje vazbu mezi nadřazenými systémy optimalizace řízení provozu operativního řízení a zadávací úrovní zabezpečovacího zařízení.

4.4.1 Řízení provozu v prostorových oddílech

V klasickém způsobu řízení provozu je uvažováno s vybavením infrastruktury zabezpečovacím zařízením splňujícím požadavky 3. kategorie podle [9] a [10].

Pro klasický způsob řízení provozu jsou významnými body infrastruktury návěstidla – všechny vlaky se pohybují v prostorových oddílech, které jsou ohraničeny návěstidly. Jízda vlaku je řízena těmito návěstidly a oprávnění k jízdě se přiděluje od návěstidla k návěstidlu. Proto v tomto módu řízení provozu jsou pro každý vlak vypočítány časy průjezdů kolem všech návěstidel v jeho trase. Tyto časové údaje pak tvoří požadavky pro stavění jízdních cest.

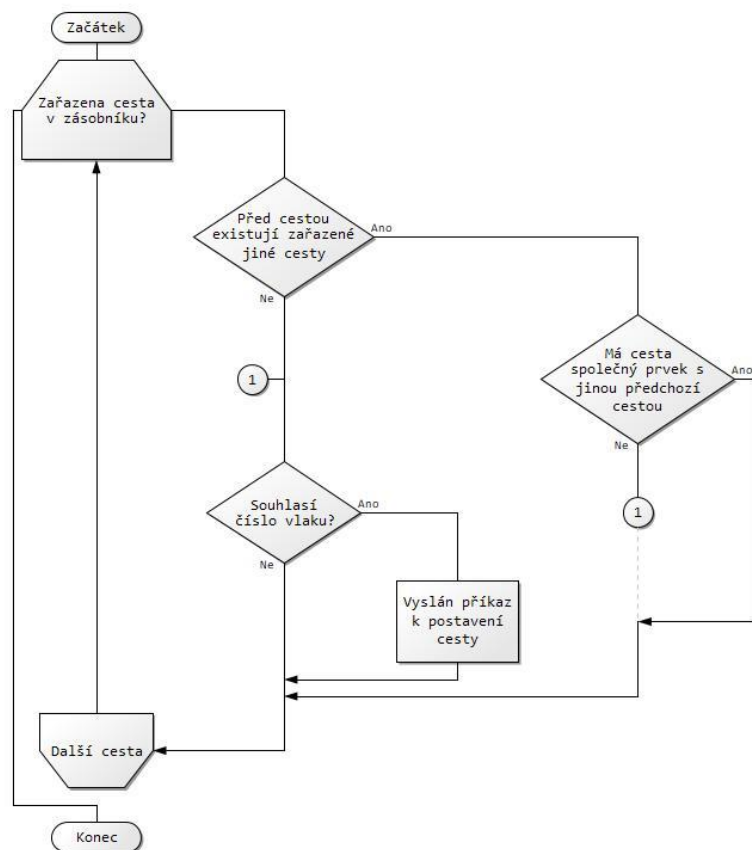
Pokud v době předání vlaku přímému řízení byly odstraněny všechny konflikty, jsou požadavky pro stavění jízdních cest zařazeny do zásobníku automatizační nadstavby zabezpečovacího zařízení.

Zadávací úroveň zabezpečovacího zařízení graficky znázorňuje požadavky na stavění jízdních cest a následně (pokud dispečer přímého řízení ve stanovený čas nezasáhne) automaticky vyšle požadavek prováděcí úrovni zabezpečovacího zařízení, která danou jízdní cestu realizuje, pokud všechny podmínky pro její bezpečné postavení je schopno zabezpečovací zařízení zajistit. V opačném případě může být požadována spoluúčast obsluhujícího zaměstnance – v zadávací úrovni je zobrazena nemožnost realizace jízdní cesty.

Automatizační nadstavba zabezpečovacího zařízení neobsahuje bezpečnostně relevantní funkce. Splnění podmínek pro bezpečnou jízdu vlaku zajišťuje samotná prováděcí úroveň zabezpečovacího zařízení.

Požadavky na postavení cesty jsou realizovány v pořadí, ve kterém byly do zásobníku cest zařazeny (seřazeny dle času). Tím je zajištěno, že nedojde ke změně sledu vlaků, jenž byl naplánován v době předání mezi operativním a přímým řízením. Nekonfliktnost těchto dispozic musí být zajištěna na straně operativního řízení. Přitom je umožněno „předbíhání“, pokud cesta zařazená do zásobníku později, není v konfliktu (nemá žádný společný prvek) s kteroukoliv cestou, zařazenou do zásobníku dříve. „Předbíhání“ je zajištěno, že v případě nenadálého zpoždění některého z vlaků nedojde k ovlivnění jiných vlaků ve zbylé části infrastruktury, aniž by byl narušen definovaný sled vlaků.

Před vysláním požadavku na postavení cesty prováděcí úroveň zabezpečovacího zařízení je kontrolováno, že nejbližším vlakem před návěstidlem je právě vlak, pro který má být jízdní cesta postavena.



Obrázek 25: Zásobník jízdních cest
Zdroj: autor

Pokud přímé řízení provozu v dané části infrastruktury není vybaveno zabezpečovacím zařízením 3. kategorie s automatizační nadstavbou, nebo některé podmínky není schopno zabezpečovací zařízení zajistit, obsluhující zaměstnanec realizuje dispozice předané operativním řízením provozu manuálně.

4.4.2 Řízení provozu flexibilním způsobem

Při řízení provozu podle principů ETCS L3 nejsou v infrastruktuře žádná návěstidla. Vlaky se pohybují na základě oprávnění k jízdě, které může být vydáno do libovolného místa infrastruktury. Prodloužení oprávnění k jízdě je flexibilní, v infrastruktuře je jediným omezujícím prvkem výhybka, která musí být přestavena a zabezpečena v příslušném směru. Významnými body infrastruktury se tak stávají samostatné výhybky. Proto jsou vypočítány časy průjezdů vlaku přes jednotlivé výhybky. Tyto časové údaje pak tvoří požadavky na jejich přestavení do příslušné polohy podle trasy vlaku a jejich zabezpečení pro konkrétní vlak.

RBC, zajišťující vydávání oprávnění k jízdě, je integrované se stavědlem, které zajišťuje získávání informací o stavu infrastruktury a ovládaní prvků v infrastruktuře. Souhrnně lze tyto části nazývat jako infrastrukturní část zabezpečovacího systému, jehož architektura je rozdělena do úrovně zadávací, prováděcí a výkonné. Bezpečnostně relevantní funkce prováděcí úrovně a obsluha periferií výkonnou úrovní nejsou předmětem této práce. Návrh řešení se zabývá automatizační nadstavbou, která tvoří rozhraní mezi systémy operativního řízení provozu a zadávací úrovní zabezpečovacího systému, a rozhraním dispečera přímého řízení zadávací úrovně zabezpečovacího systému. Vstupy do zadávací úrovně jsou předávány buď automatizovaně (ze systémů operativního řízení) nebo prostřednictvím povelů dispečera přímého řízení, který rovněž může editovat povelů přicházející z úrovně operativního řízení. Výstupy zadávací úrovně zabezpečovacího systému tvoří požadavky pro prováděcí úroveň zabezpečovacího systému.

Z úrovně operativního řízení provozu jsou předávány zadávací úrovni zabezpečovacího systému (v úrovni přímého řízení) požadavky na stavění výhybek. Tyto požadavky jsou vyslány v době předání vlaku v určitém místě infrastruktury z kompetencí operativního řízení do kompetencí přímého řízení. K tomu dochází s dostatečným předstihem, v řádu jednotek minut před plánovaným časem průjezdu konkrétním místem infrastruktury (např. výhybkou), aby dispečer přímého řízení měl možnost do dispozic v případě potřeby zasáhnout a zároveň nebyla omezena jízda vlaku pozdním vykonáním požadavků. Každá trasa vlaku při flexibilním řízení je tvořena posloupností výhybek s časovou značkou plánovaného průjezdu.

Požadavky na stavění výhybek jsou koncentrovány v zadávací úrovni zabezpečovacího systému a zobrazeny dispečerovi.

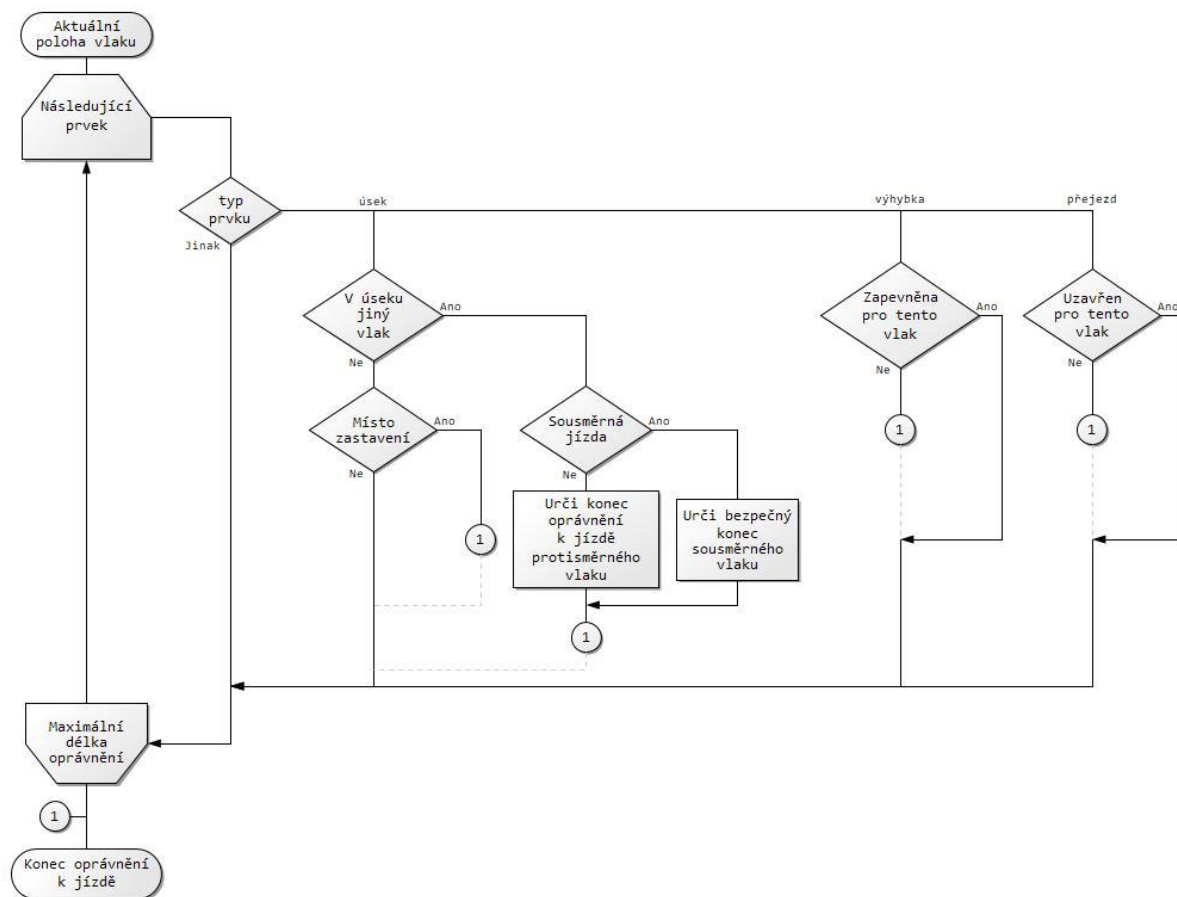
Každá výhybka obsahuje vlastní zásobník typu FIFO („first in first out). Pořadí povelů v zásobníku se již nemění. Výhybky se přestaví podle prvního povelu v zásobníku okamžitě po jeho zařazení, její zapevnění se provede až s určitým zpožděním. Výhybka nebude přestavena ani zapevněna, pokud dispečer přímého řízení předtím výhybku příkazem zablokoval.

Prováděcí úroveň zabezpečovacího systému pak prohledává síť od aktuální polohy vlaku, přičemž pokud narazí na výhybku, ověří, zda je zapevněna pro tento konkrétní vlak a pokud ano, pokračuje v prohledávání sítě ve směru přestavené výhybky. Konec oprávnění k jízdě umístí:

- před výhybkou, která není zapevněna (nebo je zapevněna pro jiný vlak),
- před otevřeným přejezdem,
- před koncem předchozího vlaku, případně před čelem protijedoucího vlaku,
- v místě zastavení (viz dále).

Místo zastavení (bod v libovolném místě infrastruktury) je rovněž vygenerované systémem optimalizace řízení provozu v úrovni operativního řízení podle naplánovaného grafikonu vlakové dopravy. Místo zastavení se defaultně umísťuje na konec vybraného úseku, kde má vlak podle naplánovaného GVD zastavit. Jeho umístění v rámci tohoto úseku však může být změněno zadáním konkrétní délkové hodnoty od začátku úseku. Pro zjednodušení zadávání místa zastavení jsou v reliéfu kolejí znázorněny nástupiště (včetně jejich sektorů), případně nákladiště nebo jiná manipulační místa, která mají tuto délkovou hodnotu přiřazenu.

Přejezd je obsluhován dle obdobného principu jako výhybky – systém v úrovni operativního řízení provozu vyše požadavky na uzavření přejezdu pro konkrétní vlak s časovou značkou odpovídající průjezdu místem, kde by vlak musel začít snižovat svoji rychlost před otevřeným přejezdem. Přejezd pak s ohledem na předzváněcí dobu a další technologické doby zahájí svoji činnost, aby byl nejpozději ve stanoveném čase uzavřen.



Obrázek 26: Prodloužení oprávnění k jízdě
Zdroj: autor

4.4.3 Požadavky na rozhraní aplikace

Primární rozhraní zadávací úrovně zabezpečovacího systému tvoří reliéf kolejíště, který zobrazuje aktuální stav infrastruktury i samotného zabezpečovacího zařízení. Požadavky na zobrazení prvků stávajících zabezpečovacích systémů v prostředí SŽDC jsou definovány v [29]. Stávající požadavky musí být rozšířeny z hlediska automatizační nadstavby. V textovém výpisu musí být uvedeny všechny jízdní cesty zařazené do zásobníku a jejich stav:

- cesta zařazena do zásobníku a čeká se na její realizaci (prostor pro zásah dispečera přímého řízení),
- cesta má být realizována, ale z důvodu konfliktu s plánovanou cestou jiného vlaku ji není možno realizovat (v zásobníku této cestě předchází jiná konfliktní cesta),
- cesta má být realizována, ale zabezpečovací zařízení není schopno cestu realizovat,
- cesta postavena,
- cesta vybavena (zobrazeno jen dočasně).

Graficky musí být v reliéfu kolejíště znázorněny cesty zařazené do zásobníku cest, které mají být automatizovaně postaveny.

Dispečer přímého řízení může do automatizovaného stavění jízdních cest zasáhnout prostřednictvím editace zásahu do zásobníku. Výběrem vlaku v textovém výpisu může pozastavit realizaci jízdní cesty nebo cestu ze zásobníku úplně odstranit (vykonávání všech dalších cest v zásobníku, které byly v konfliktu s odstraněnou jízdní cestou, je pozastaveno, dokud dispečer neurčí jinak).

V případě flexibilního způsobu řízení provozu nejsou v infrastruktuře pevné prostorové oddíly. Oprávnění k jízdě může být vydáno do libovolného místa infrastruktury. Aktuální poloha vlaku v reliéfu kolejíště je zobrazena červeně, přičemž počátek úsečky odpovídá relativní poloze čela vlaku a délka úsečky je poměrem délky vlaku a délky úseku mezi vztažnými body infrastruktury. Aktuálně vydané oprávnění k jízdě je zobrazeno zeleně. V případě manuálního stavění jízdních cest se vybere vlak, kterému má být prodlouženo (zkráceno) oprávnění k jízdě a následně se zvolí místo konce nového oprávnění k jízdě. Místo konce oprávnění k jízdě se určí označením úseku mezi dvojicí výhybek, přičemž místo konce oprávnění se v běžných případech umístí před námezníkem přední výhybky. V případě potřeby je možné místo konce oprávnění určit v libovolném místě tohoto úseku zadáním absolutní vzdálenosti od začátku tohoto úseku (zadní výhybky). V reliéfu kolejíště se znázorní nástupiště, včetně jejich sektorů, aby konec místa oprávnění k jízdě u osobních vlaků mohl

být vztažen k místu zastavení u daného nástupiště. Manuální požadavek na prodloužení oprávnění k jízdě se projeví zařazením požadavků do zásobníku konkrétních výhybek (případně přejezdů). Algoritmus prodlužování oprávnění k jízdě je uveden v kapitole 4.4.2.

Vzhledem k absenci detekčních prostředků není možné řídit posun ústředně. Pro posun je vždy vyhrazena část infrastruktury, jejíž hranice jsou vyznačeny v reliéfu kolejiště. Aktivací takto vyhrazeného posunovacího obvodu se předají příslušné výhybky k místnímu přestavování. Do aktivovaného posunovacího obvodu nelze stavět jízdní cesty. Požadavky na deaktivaci posunovacího obvodu budou stanoveny na základě principů zajištění bezpečnosti, které nejsou předmětem této práce.

Z hlediska automatizační nadstavby lze u každé výhybky zobrazit zásobník požadavků na přestavení a zabezpečení výhybky, a tento zásobník editovat. V reliéfu kolejiště se zobrazuje i plánované prodloužení oprávnění k jízdě na základě požadavků v zásobníku.

Pro informování dispečera přímého řízení o plánovaném provozu a vydaných dispozicích v řízené oblasti je pracoviště vybaveno aplikacemi, které zobrazují bezkonfliktní GVD (průběžně upravovaný operativním řízením), ve formě nákrešného GVD, plánu obsazení kolejí a reliéfu kolejiště. Avšak údaje v těchto aplikacích nemohou editovat. Aplikace na pracovišti dispečera přímého řízení musí být přizpůsobeny pro automatizované vedení dopravní dokumentace a manuální vedení povinně dokumentovatelných úkonů.

4.5 Popis infrastruktury

Nezbytným předpokladem pro návrh systému optimalizace řízení provozu železniční dopravy je dostatečně podrobný a přesný popis infrastruktury, který obsáhne všechny jeho požadavky, a to na straně infrastruktury i na straně vozidla. Musí být schopný provázanosti mezi datovým popisem jízdního řádu a popisem parametrů vlaku (hnacích vozidel, souprav i jednotlivých vozů).

Při návrhu se z hlediska popisu infrastruktury předpokládá využití formátu RailML 3, vycházející z principů RailTopoModel. Ten umožňuje popsat topologii kolejiště pomocí prvků (*netElement* – elementární část infrastruktury v podobě úseků charakterizovaných svojí délkou) a definicí vazeb mezi nimi. Tyto úseky mohou být sdružovány do vyšších celků, což umožňuje vytvoření nižších rozlišovacích úrovní nezbytných pro definování sítě z hlediska dopraven a traťových úseků.

Nejprve je nutné zachytit topologii kolejiště. K tomu jsou využity atributy *netElement*, kterým jsou přiřazeny jednoznačné identifikátory, délky těchto úseků a identifikátory vazeb na další úseky typu *netElement*.

Následně jsou jednotlivé úseky popsané pomocí *netElement* provázány prostřednictvím vazeb popsaných atributem *netRelation*.

Jednotlivé ucelené části infrastruktury lze sjednotit v rámci nižší rozlišovací úrovně do dalšího atributu *netElement*, přičemž v atributu *elementCollectionUnordered* jsou definovány jednotlivé úseky z vyšší rozlišovací úrovně.

Je-li popsána topologie kolejiště, začnou se přiřazovat jednotlivým částem kolejiště jeho funkční vlastnosti. Vztaženo k jednotlivým úsekům typu *netElement* jsou infrastruktury přiřazeny funkční prvky.

Každé části infrastruktury může být přiřazeno více funkčních prvků, i vzájemně se překrývajících. Jedná se např. směrové a sklonové poměry, nástupní hrany, návěstidla, mosty, rychlostní profily, dopravní, koleje, výhybky atd. Na všechny síťové entity je pohlíženo stejným způsobem a lze je (v souladu s principy RailTopoModelu) také jednotným a jednoznačným způsobem lokalizovat (přitom lze využít více souřadných systémů – vzdálenost od začátku konkrétního úseku, liniové staničení vztažené k těmto úsekům).

Jednotlivé funkční prvky lze sdružovat do vyšších celků, což opět umožňuje vytvoření nižších rozlišovacích úrovní. Např. jednotlivé nástupní hrany se sdružují k nástupišťům a tato nástupiště se sdružují v rámci jednoho dopravního bodu.

Tyto funkční prvky, svázané s infrastrukturou, lze svázat i s dalšími modely popsané jazykem RailML – např. prvek nástupiště lze provázat s modelem jízdního řádu, který pak definuje časy příjezdu nebo odjezdu. Obdobně rychlostní profily nebo jiné omezení infrastruktury lze provázat s modelem vozidel, který definuje parametry jednotlivých vlaků. Pro potřeby řídicích a zabezpečovacích systémů lze využít provázanost s modelem zabezpečení, který definuje funkční závislosti jednotlivých prvků infrastruktury v závislosti na použitém zabezpečovacím systému.

Z hlediska systému optimalizace řízení provozu je důležité popsat topologii infrastruktury, která je nezbytná pro jakékoliv prohledávání sítě a tím hledání tras vlaků v prostoru. Dále je nutné uvést všechny funkční prvky, které mají vliv na výpočet dynamického jízdního profilu (především rychlostní profily a sklonové poměry), nebo souvisí s omezením jízdy vlaku (trakce, třídy zatížení atd.). Pro vazbu s jízdním řádem (grafikonem vlakové dopravy) je nezbytné definovat polohu nástupišť. Pro vazbu se zabezpečovacím zařízením (ať už z hlediska detekce konfliktů nebo vydávání

oprávnění k jízdě) je nezbytné definovat polohu výhybek, v klasickém způsobu řízení i polohu návěstidel a detekčních prostředků.

Jednotlivé úseky je nutné sdružit v rámci nižší rozlišovací úrovně na staniční koleje jednotlivých dopraven, výhybkové a bezvýhybkové úseky, traťové koleje v jednotlivých mezistaničních úsecích. Jednotlivá nástupiště musí být sdružena do jednoho dopravního bodu, který je svázán s jízdním řádem. To umožní vytvoření logických vazeb a hledání zástupných prvků stejných parametrů (např. využití jiného nástupiště příslušné dopravní, sdružení času odjezdu z dopravní při rozjezdu vlaku z některé její koleje).

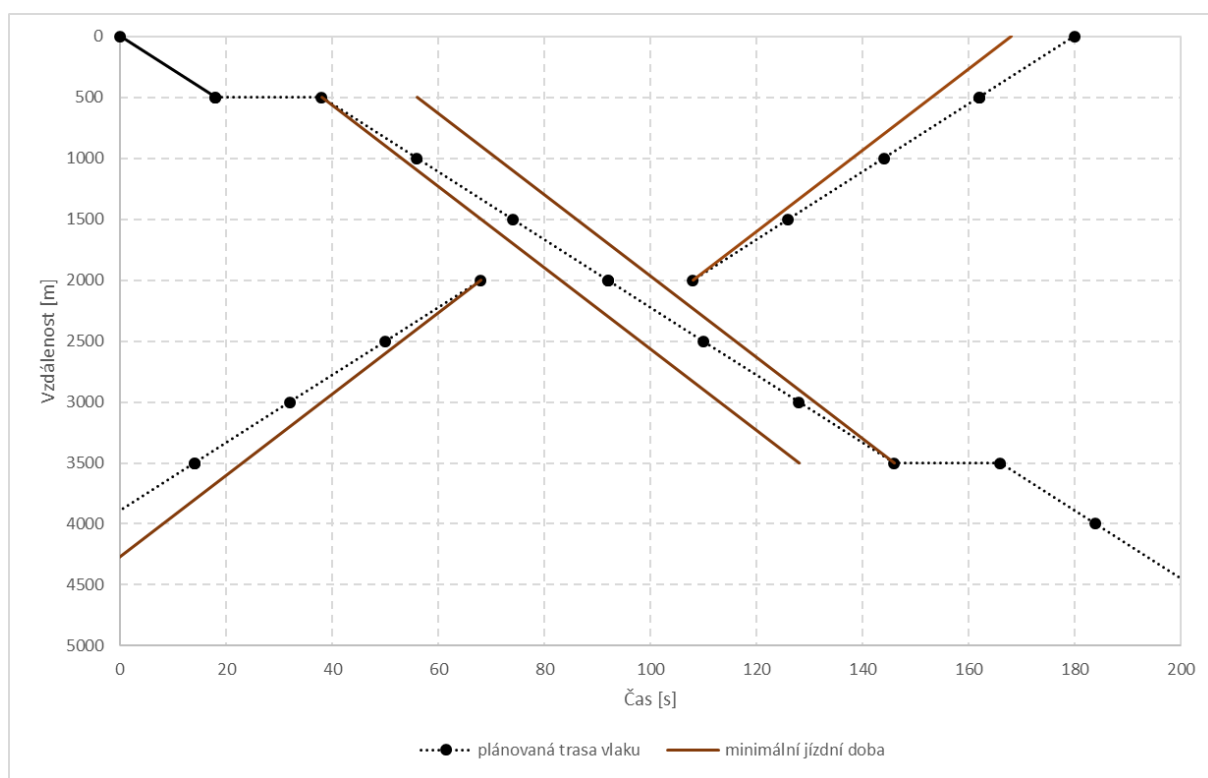
4.6 Optimalizace jízdy vlaku

Předpokládá se, že vozidlo je vybaveno nejen vlakovým zabezpečovačem, ale současně systémem ATO pro automatizaci a optimalizaci jízdy, viz kapitolu 2.4. Pro přenos informací mezi systémem optimalizace řízení provozu v infrastrukturu a systémem ATO na palubě vozidla probíhá proces standardizace rozhraní, viz kapitolu 2.5.1. Účelem této vazby je přenos optimální trajektorie jízdy vozidla. Tato trajektorie je vypočítána systémem optimalizace řízení provozu na základě aktuální dopravní situace. Předpokládá se, že systém ATO reguluje jízdu vlaku tak, aby projel stanovenými místy infrastruktury v definovaný čas. To umožní udržovat vlaky v ideálních časových polohách tak, aby vzájemně neovlivňovaly jízdy jiných vlaků a současně optimalizovaly svoji jízdu z pohledu spotřeby trakční energie. Lze říci, že jízda vozidla se přizpůsobuje vypočítanému modelu systémem optimalizace řízení provozu a zároveň lze zpřesňovat tento model na základě informací přicházejících z paluby vozidla. Systém optimalizace řízení provozu definuje časy průjezdů vybranými místy infrastruktury. Otázkou je, jak často tato místa definovat.

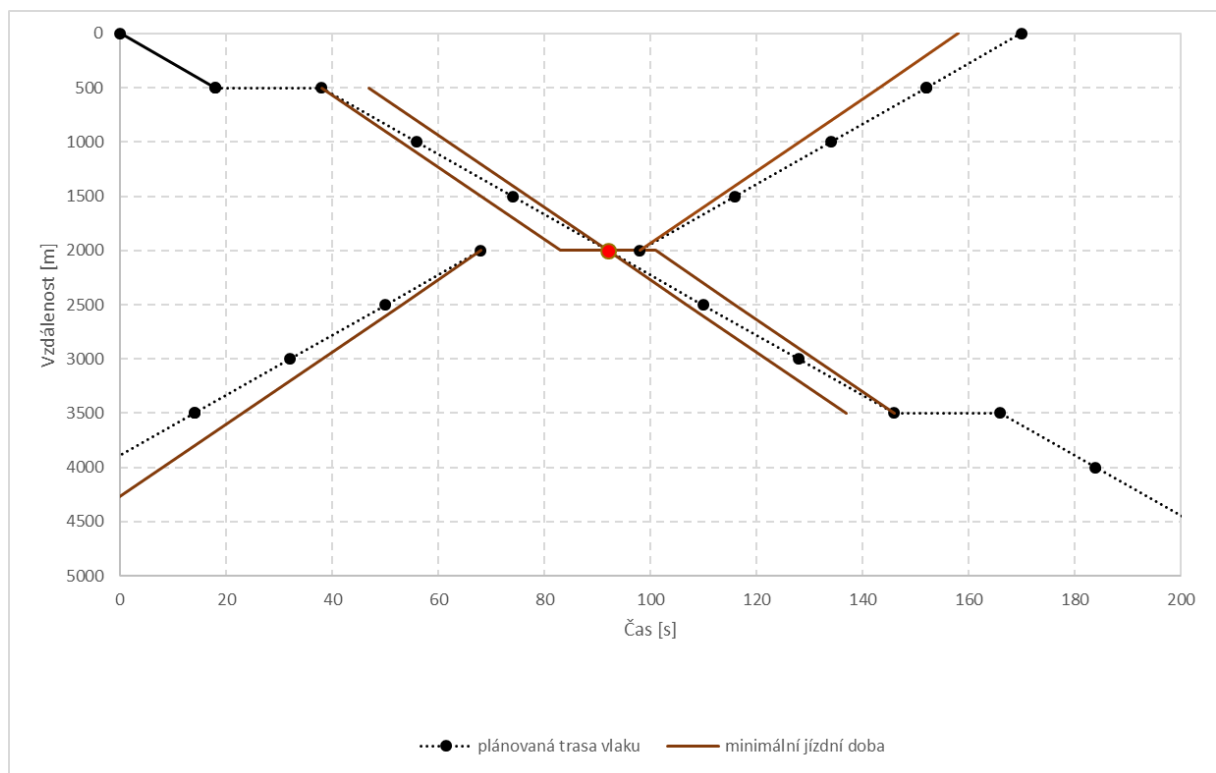
Bude-li hustota míst, ve kterých je definován čas průjezdu, vysoká, trajektorie jízdy vlaku se bude velmi blížit vypočítanému modelu. Ovšem za cenu častých a neefektivních zásahů do řízení vozidla. Na straně infrastruktury nelze dosáhnout úplně přesného modelu popisujícího jízdu vlaku. K tomu není dostatek vstupních informací z důvodu omezené přenosové kapacity mezi vozidlem a infrastrukturou i samotné neurčitosti některých proměnných, ani dostatek výpočetního výkonu na straně infrastruktury. Proto je důležité definovat časy průjezdů v místech infrastruktury, kde by odchylka od tohoto času způsobila narušení jízdy jiného vlaku. V ostatních částech infrastruktury lze ponechat vozidlu volnost v jeho jízdě, aby mohlo optimalizovat svoji jízdu z hlediska spotřeby trakční energie – volit vhodně parametry jednotlivých fází své jízdy podle aktuálních podmínek prostředí, parametrů vlaku a infrastruktury.

Na obrázku 27 je znázorněno pásmo neurčitosti jízdy vlaku při použití systému ATO. Pásmo je ohraničeno minimální jízdní dobou, přičemž jedna hranice je dána stanoveným časem odjezdu podle naplánovaného GVD, resp. časem odjezdu nebo průjezdu určeným dispozicí operativního řízení, a uvažováním jízdy s maximálním výkonem. Druhá hranice je dána stanoveným časem příjezdu podle naplánovaného GVD, resp. časem příjezdu nebo průjezdu určeným dispozicí operativního řízení – systém ATO si může dovolit prodloužení jízdní doby v určité části trasy tak, aby následnou jízdou s maximálním výkonem byl schopen dosáhnout místa příjezdu, resp. průjezdu, v definovaný čas.

Pokud do pásma neurčitosti jízdy nezasahuje jízda, resp. pásmo neurčitosti, žádného jiného vlaku, není nutné v této části infrastruktury definovat časy průjezdů. Předpokládá se, že systém ATO bude udržovat jízdu vlaku v těchto hranicích. Pokud by pásmo neurčitosti zasahovalo do jízdy jiného vlaku, bude v těchto místech stanoven čas požadovaného průjezdu. Tím se zúží oblast neurčitosti jízdy vlaku.



Obrázek 27: Neurčitost jízdy vlaku
Zdroj: autor



Obrázek 28: Zúžení neurčitosti jízdy vlaku vydáním požadavku na čas průjezdu
Zdroj: autor

5 Ověření řešení

Pro ověření navrhované architektury řízení provozu, včetně rozhraní a funkcí jednotlivých úrovní řízení provozu, byla zvolena infrastruktura Dopravního sálu Fakulty dopravní²⁹ (dále DSFD). Za výchozí stav lze považovat situaci, kdy infrastruktura byla vybavena elektronickým stavědlem (s funkčními požadavky na zabezpečovací zařízení 3. kategorie podle [9], aniž by byla řešena technická bezpečnost) s rozhraním zadávacího pracoviště podle požadavků JOP [29]. Řízení pohybu vozidel bylo realizováno podle principů ETCS L2 (lokalizace vozidla podle balíz a odometrie, vydání oprávnění k jízdě a výpočet dynamického profilu). Pro simulaci řízení provozu jsou pracoviště vybavena informačním systémem s aplikací nákrešného GVD podle požadavků [32]. V kontextu navrhované architektury lze hovořit o pokrytí přímé úrovně řízení podle stávajícího způsobu řízení provozu v prostorových oddílech bez automatizační nadstavby.

Další vývoj DSFD směřoval k naplnění navrhované architektury – vytvoření vyšších úrovní řízení provozu. Byly rozšířeny prostory DSFD o místnost pro pracoviště dispečerů operativního a strategického řízení, a to jak na straně správce infrastruktury, tak dopravce. Předpokládá se, že v budoucnu bude možné simulovat veškeré procesy související s řízením provozu – přidělení trasy v úrovni strategického řízení, řešení konfliktů v jízdách vlaků (včetně koordinace s dopravcem) v úrovni operativního řízení a zajištění jízdy vlaků (včetně komunikace se strojvedoucím) v úrovni přímého řízení. Stávající vývoj byl zaměřen především na vytvoření úrovně operativního řízení, včetně rozhraní s přímým řízením, a implementace automatizační nadstavby v úrovni přímého řízení.

²⁹ Dopravní sál Fakulty dopravní vznikl jako studentský projekt. Postupně byly implementovány jednotlivé typy zabezpečovacích zařízení používané na železniční síti v ČR. Pro simulaci reálné infrastruktury a jízd vlaků bylo zvoleno modelové kolejiště. V průběhu několika let tak vznikla laboratoř, která obsahuje systémy pro řízení a zabezpečení provozu od nejstarších, z počátku 20. století, po nejnovější elektronická zabezpečovací zařízení s dálkovou obsluhou několika stanic. Koncepce Dopravního sálu je založena na principu inteligentního vozidla, které obousměrně komunikuje s infrastrukturou. To umožňuje automatickou jízdu vlaku při prezentaci stávajícího provozu, včetně vlakového zabezpečovače ETCS, ale i ověřovat nové vývojové trendy v řízení a zabezpečení železničního provozu.

Infrastrukturu v DSFD tvoří hlavní trať Benešov – Říčany (dvě vzájemně propojené skryté stanice, včetně vratných smyček), v úseku Říčany – Strančice – Senohraby dvoukolejná, navazuje jednokolejný úsek Senohraby – odbočka Pyšely a pokračuje dvoukolejným úsekem odbočka Pyšely – Čerčany – Benešov. Ve stanicích Strančice a Čerčany zaústí jednokolejná trať Strančice – Sedlnice – Davle – Čerčany.

Pro ověření navrhovaného řízení provozu musela být prvotně vytvořena úroveň operativního řízení, včetně všech jejích funkcí a rozhraní. Dále byla vytvořena v úrovni přímého řízení automatizační nadstavba pro stávající způsob řízení provozu a vytvořena prováděcí a zadávací úroveň zabezpečovacího zařízení s automatizační nadstavbou pro flexibilní způsob řízení provozu.

V první fázi bylo nutné upravit stávající aplikace informačních systémů, které neumožňovaly jednoznačný popis trasy vlaku v prostoru. Nová aplikace umožňuje volbu trasy přímo v reliéfu kolejiště, je vypočítán dynamický profil a určeny časy průjezdu vybranými místy infrastruktury podle kapitoly 4.3.1.4. Při výpočtu dynamického profilu jsou uvažovány parametry typických vlaků a výpočet probíhá s uvažováním průměrných hodnot zrychlení a odrychlení. Rovněž byla nezbytná úprava popisu infrastruktury s ohledem na požadavky uvedené v kapitole 4.5.

V druhé fázi byly realizovány funkce operativního řízení. Pro dispečera operativního řízení jsou k dispozici nástroje nákrešného grafikonu, plánu obsazení kolejí a reliéfu kolejiště podle kapitoly 4.3.4. Změnu trasy v čase lze provést přetažením trasy vlaku v nákrešném grafikonu podle kapitoly 4.3.1.5. Změnu trasy v prostoru lze provést přetažením trasy vlaku v reliéfu kolejiště. V obou případech se přepočítá dynamický profil, který je automaticky přenesen do ostatních aplikací. Dále byly implementovány funkce detekce konfliktů podle kapitoly 4.3.2.2.

V úrovni přímého řízení byla implementována automatizační nadstavba pro stávající způsob řízení provozu podle požadavků uvedených v kapitole 4.4.1, která je provázána se stávající zadávací úrovní elektronického stavědla. Pro flexibilní způsob řízení provozu byla vytvořena prováděcí úroveň (zjednodušená pro potřeby ověření základního principu flexibilního řízení provozu) a zadávací úroveň infrastrukturního zabezpečovacího zařízení s automatizační nadstavbou podle požadavků uvedených v kapitole 4.4.2.

Vzhledem k postupné implementaci navrhovaného řešení nebylo dosud možné objektivně posoudit stávající řízení provozu a řízení provozu dle navrhované architektury pomocí měření kvantitativních hodnot vybraných parametrů, např. zvýšení zpoždění v rámci řízené oblasti, doba reakce dispečera, spotřeba energie při mimořádném zastavení vlaku atd. Po skončení celé implementační fáze budou oba způsoby porovnány na vybrané skupině studentů, případně jiných účastníků. Při simulovaném provozu podle předem naplánovaného GVD budou dle připravených scénářů navozovány mimořádné situace. Měřit se budou nejen kvantitativní parametry uvedené výše, ale i kvalitativní, např. způsob obsluhy řídicích a zabezpečovacích systémů z pohledu uživatelské přívětivosti, dostupnost a přehlednost informací atd.

V současnosti je možné objektivně posoudit základní funkčnost navrhovaného řešení na některých již implementovaných částech systému. V prostředí DSFD je možné sledovat provoz v úrovni dispečera operativního řízení, který je upozorňován na konflikty v jízdách vlaků. Tyto konflikty lze manuálně odstraňovat změnou trasy v prostoru a času. Provedené změny v naplánovaném GVD jsou přeneseny na ostatní pracoviště v DSFD. Dvě minuty před jízdou vlaku v daném úseku jsou kompetence přeneseny do úrovně přímého řízení. Automatizovaně jsou stavěny jízdni cesty v případě řízení provozu v prostorových oddílech. V případě flexibilního způsobu řízení provozu jsou automatizovaně přestavovány jednotlivé výhybky a následně je prodlužováno oprávnění k jízdě.

6 Závěr

V disertační práci je řešena problematika nových přístupů řízení provozu za účelem zvýšení efektivity využití železničního systému. Práce vychází z předem definovaných předpokladů, které zahrnují technické systémy i technologické postupy. Zejména se uvažuje s infrastrukturou, která je vybavena komunikační sítí s dostatečnou kapacitou pro spolehlivý a bezpečný přenos informací mezi vozidlem, vnějšími prvky infrastruktury a systémy řízení a zabezpečení. Takto vybavená infrastruktura umožňuje změnit přístup k řízení provozu, kdy oprávnění k jízdě může být vydáno do libovolného místa infrastruktury na základě znalosti polohy ostatních vlaků v řízené oblasti. Datová výměna informací mezi jednotlivými subjekty řízení provozu umožňuje efektivně organizovat provoz v rámci celé sítě.

Disertační práce definuje novou architekturu řízení provozu. Zavádí strategickou, operativní a přímou úroveň řízení provozu. V rámci strategické úrovně řízení je stanoven požadavek na vytvoření bezkonfliktního Plánu vlakové dopravy, který je výchozím podkladem pro řízení provozu. V navrhované architektuře je výrazně posílena úroveň operativního řízení, jejíž hlavní funkce jsou predikce jízdy vlaků, detekce konfliktů a návrh řešení dopravní situace. V úrovni přímého řízení je zajištěna vazba na zabezpečovací systémy a uvažuje se s automatizací rutinních činností souvisejících s prodlužováním oprávnění k jízdě. V disertační práci jsou detailně popsány funkce jednotlivých úrovní řízení provozu a rozhraní mezi nimi. Samostatná pozornost je věnována optimalizačním kritériím.

Jsou navrženy základní principy algoritmů pro výše uvedené funkce operativního a přímého řízení, umožňující optimalizaci řízení železniční dopravy. Navržené principy řízení provozu jsou průběžně ověřovány na infrastruktuře Dopravního sálu Fakulty dopravní, kde jsou jednotlivé funkce postupně implementovány.

Tato práce nastavuje základní systematický přístup a návrh nového využití informačních, řídicích a zabezpečovacích technologií pro řešení problematiky optimalizace železničního provozu. Navržené přístupy vycházejí ze současně aplikovaných či aktuálně diskutovaných technologií. Lze tedy předpokládat, že závěry této práce bude možné v blízké době zavést a ověřovat i v reálném provozu.

7 Literatura

7.1 Použitá literatura

- [1] Široký Jaromír; Mechanika v dopravě I – kolejová vozidla, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004
- [2] Myslivec I., Lieskovský A.; CRV & AVV Systém pro automatické vedení vlaku Českých drah, Obecná prezentace CRV&AVV 06/2010, prezentace AŽD Praha s.r.o., Závod Technika, VaV P1
- [3] SUBSET-026, Issue 3.6.0 (Baseline 3 Release 2); ERTMS/ETCS – System Requirements Specification; Brussels; ERA – UNISIG – EEIG ERTMS USERS GROUP; European Commission (EC), 2016.
- [4] Hlubuček A., Metodika integrace a dezintegrace prvků topologického popisu železniční infrastruktury, Studie k disertační práci, Fakulta dopravní ČVUT v Praze, 2018
- [5] SŽDC D1 Dopravní a návěštní předpis, SŽDC s.o., účinnost od 1.5.2015
- [6] SŽDC D3 Předpis pro zjednodušené řízení drážní dopravy, SŽDC s.o., účinnost od 14.12.2014
- [7] SŽDC D7 Předpis pro operativní řízení provozu, SŽDC s.o., účinnost od 14. 12. 2014
- [8] SŽDC D7/2 Organizování výlukových činností, SŽDC s.o., účinnost od 15. 12. 2013
- [9] TNŽ 34 2620 Železniční zabezpečovací zařízení, Staniční a traťové zabezpečovací zařízení, účinnost od 1.7.2002
- [10] ČSN 34 2650 Železniční zabezpečovací zařízení, Přejezdová zabezpečovací zařízení, účinnost od 1.2.2012
- [11] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb., ve znění vyhlášky č. 253/2015 Sb., účinnost od 15.1.2015
- [12] SŽDC PO–01/2019–GŘ; Pokyn generálního ředitele „Pracoviště pro dálkové řízení“, SŽDC s.o., účinnost od 1. února 2019
- [13] Provozní řád Centrálního dispečerského pracoviště Přerov pro provozování dráhy s dálkově ovládaným zabezpečovacím zařízením; účinnost od 15.4.009
- [14] Kolář Pavel; Centrální dispečerské řízení u SŽDC; Vědeckotechnický sborník ČD č. 47/2019
- [15] 2006/62/ES; Technical specification for interoperability relating to the telematics applications for freight subsystem of the trans-European conventional rail system;
- [16] 2011/454/ES; Technical specification for interoperability relating to the subsystem telematics applications for passenger services of the trans-European rail system;
- [17] SŽDC Is10; Směrnice SŽDC pro užívání informačních systémů provozovatele dráhy (SPIS), SŽDC s.o., účinnost od 1. 7. 2011;

- [18]Polach V., Šturma M.; Automatické stavění vlakových cest – Příležitost, zkušenost a další rozvoj; prezentace Závod Technika, Výzkum a vývoj, VP09
- [19]Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2016/797 ze dne 11. května 2016 o interoperabilitě železničního systému v Evropské unii;
- [20]Národní implementační plán ERTMS, Česká republika; Praha 2017
- [21]Myslivec I.; ATO over ETCS (AoE) alias „interoperabilní AVV“; prezentace AŽD Praha s.r.o., Závod Technika, VaV P1; 5. 3. 2019
- [22]Bienfait B.; WP 4 ATO up to GoA4; X2rail1 Final Event, Shift2Rail, 12.7.2019
- [23]Nařízení Komise (EU) 2016/919 ze dne 27. května 2016 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystémů „Řízení a zabezpečení“ železničního systému v Evropské unii
- [24]Nařízení Komise (EU) 2015/995 ze dne 8. června 2015 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „provoz a řízení dopravy“ železničního systému v Evropské unii
- [25]Směrnice SŽDC č. 104; Provozní intervaly a následná mezidobí, SŽDC s.o., účinnost od 1.10.2013
- [26]Hruban I., Molková T.; Současné přístupy k časovým přírážkám v jízdních řádech železniční dopravy; Perner's Contacts, Univerzita Pardubice, listopad 2010, ISSN 1801-674
- [27]Marek J.; Brzdný model ERTMS/ETCS a možnosti jeho optimalizace na úrovni aplikace; Vědeckotechnický sborník ČD č. 47/2019
- [28]Felez J., Yeojun Kim, Borrelli F.; A Model Predictive Control Approach for Virtual Coupling in Railways; IEEE Transactions in Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, No. 7, 2019
- [29]Jednotné obslužné pracoviště; Základní technické požadavky, vydání IV., České dráhy, účinnost od 1.5.2000
- [30]Konopáč T., Leso M., Marvan M.; Koncepční záměr řízení železničního provozu na tratích ve vlastnictví státu – České republiky; certifikovaná metodika, 2013
- [31]Mařík V., Štěpánková O., Lažanský J.; Umělá inteligence (4); Academia, 2003, ISBN 80-200-1044-0
- [32]SŽDC č. 109 Zobrazování prvků v listu grafikonu vlakové dopravy v provozních aplikacích pro organizování a řízení drážní dopravy; SŽDC s.o., účinnost od 19.10.2015

7.2 Autorova literatura

- [33]Kamenický D., Leso M., Michl Z.; Analýza procesů a IT aplikací z hlediska centrálního celosíťového dispečerského systému v prostředí SŽDC (RCS – Rail Control System), studie pro SŽDC s.o., Praha 2015
- [34]Kamenický D., Gopak V., Fábera V., Brandejský T.; Railway Traffic Optimization, Interoperability of Rail Transport – IRICoN 2017, Acta Polytechnica CTU Proceedings
- [35]Kamenický D.; Traffic management system in terms of data Exchange; Interoperability of Rail Transport – IRICoN 2016; Acta Polytechnica CTU Proceedings, Vol 5, No 1 (2016); ISBN 978-80-01-06022-3
- [36]Kamenický D.: Information System for optimalization of control-command, EURO-ŽEL 2014, Recent challenges for European railways, 22nd International Symposium, June 2014, Žilina, SK
- [37]Leso M., Kopecký F., Domáci J., Kamenický D., Koutecký P.; Návrh prvků interoperability na regionálních tratích; uplatněná certifikovaná metodika; 2017
- [38]Kamenický D.; Optimalizační algoritmy pro systémy řízení a zabezpečení železniční dopravy, Studie k disertační práci, Praha, 2015
- [39]Kamenický D.; Multi-objective optimization of railway traffic; Young Transportation Engineers Conference 2018; Prague; p 171-176; ISBN 978-80-01-06464-1
- [40]Gopak V., Kamenický D., Fábera V.; Evoluční techniky pro optimalizaci grafikonu; vedoucí diplomové práce; Praha 2017

8 Seznam obrázků

Obrázek 1: Časová osa plánování a řízení provozu	7
Obrázek 2: Procesy stávajících informačních systémů na síti SŽDC.....	13
Obrázek 3: Architektura ATO over ETCS	22
Obrázek 4: Navrhovaná architektura řízení provozu	27
Obrázek 5: Navrhovaná architektura informačních systémů	30
Obrázek 6: Příklad hranic řízených oblastí	33
Obrázek 7: Způsob prodloužení jízdní doby	41
Obrázek 8: Hodnoty zrychlení pro vybrané vlaky	45
Obrázek 9: Porovnání reálného a průměrného zrychlení	45
Obrázek 10: Příklad hodnot odrychlení.....	48
Obrázek 11: Porovnání reálného a průměrného odrychlení	48
Obrázek 12: Změna trasy prodloužením jízdní doby.....	54
Obrázek 13: Změna trasy krácením jízdní doby	54
Obrázek 14: Příklad konfliktu protisměrně jedoucích vlaků	61
Obrázek 15: Příklad protisměrně jedoucích vlaků vzájemně se neovlivňujících.....	61
Obrázek 16: Příklad konfliktu stejným směrem jedoucích vlaků	62
Obrázek 17: Vyhrazený prostor v čase	63
Obrázek 18: Vyhrazený prostor v čase.....	64
Obrázek 19: Příklad konfliktu ve fázi rozjezdu vlaku	65
Obrázek 20: Příklad konfliktu ve fázi brzdění vlaku	65
Obrázek 21: Příklad konfliktu ve fázi brzdění vlaku	66
Obrázek 22: Konflikt dvou protijedoucích vlaků	66
Obrázek 23: Vývojový diagram algoritmu pro detekci konfliktů.....	67
Obrázek 24: Opožděný odjezd vlaku	77
Obrázek 25: Zásobník jízdních cest	80
Obrázek 26: Prodloužení oprávnění k jízdě.....	82
Obrázek 27: Neurčitost jízdy vlaku.....	87
Obrázek 28: Zúžení neurčitosti jízdy vlaku vydáním požadavku na čas průjezdu.....	88