

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Problematika preference tramvajové dopravy v souvislosti s průjezdem
křižovatkou řízenou světelnou signalizací

Daniel Krčál

Bakalářská práce

2024

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel Krčál**
Osobní číslo: **D20103**
Studijní program: **B1041A040002 Technologie a management v dopravě**
Specializace: **Technologie a řízení dopravy**
Téma práce: **Problematika preference tramvajové dopravy v souvislosti s průjezdem křižovatkou řízenou světelnou signalizací**
Zadávající katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Zásady pro vypracování

Úvod

1. Problematika preference tramvajové dopravy a způsoby detekce vozu řadičem křižovatky
2. Problematika udělování preference v zastávkách ležících před hranicí křižovatky
3. Návrh řešení na modelové křižovatce

Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi: sborník příspěvků. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012 (Brož.).

HABARDA, Dušan. *Modernizácia mestskej kol'ajovej dopravy.* Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2003. ISBN 80-8070-057-5.

JAREŠ, Martin. *Integrovaná doprava v praxi: jedna jízdenka, jeden tarif, jeden jízdní řád, jedna síť.* Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05896-1.

SHIFTAN, Yoram a Maria ATTARD, ed. *Sustainable urban transport.* Bingley, UK: Emerald, 2015. Transport and sustainability, volume 7. ISBN 978-1-78441-616-4.

SERPIS, Dimitris, Panos PAPADAKOS a Kostas FOUSEKIS. Tram priority at signal-controlled junctions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport* [online]. 2012, **165**(2), 87-96. ISSN 1751-7710. Dostupné z: doi:10.1680/tran.2012.165.2.87

HE, Jing, Yuting XU, Yanhuan LI, Jian YANG a Sihui LONG. An optimization model of tram timetables considering various signal priority strategies. *Scientific Reports* [online]. 2022, **12**(1). ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-022-19762-9

KACZMAREK, Mariusz a Jeremi RYCHLEWSKI. Tram priority traffic control on complex intersections. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2006, **39**(12), 416-420. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20060829-3-NL-2908.00072

WIEDEMANN, Remigiusz. Method of occupancy-based traffic light priority for public transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* [online]. 2022, **115**, 227-248. ISSN 02093324. Dostupné z: doi:10.20858/sjsutst.2022.115.16

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Josef Bulíček, Ph.D.**
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání bakalářské práce: **2. února 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2024**

L.S.

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

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

Prohlašuji:

Práci s názvem **Problematika preference tramvajové dopravy v souvislosti s průjezdem křižovatkou řízenou světelnou signalizací** jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Hradci Králové dne 28. 06. 2024

Daniel Krčál v. r.

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Josefu Bulíčkovi, Ph.D. za mimořádnou ochotu se této práci věnovat navzdory časovým okolnostem. Během celého trvání této spolupráce poskytoval cenné rady, které vždy mířily přesně tam, kam bylo potřeba směřovat. Bez jeho vhledu a připomínek by tato práce nevznikla.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá preferencí tramvají na křižovatkách řízených světelnou signalizací. Analyzuje možnosti reakce řadiče křižovatky na detekovaná vozidla a rozebírá problematiku preferování tramvají na zastávkách před hranicí křižovatky. Součástí práce je vyvinutí simulačního modelu, na kterém je možné testovat vliv jednotlivých preferenčních opatření na provoz tramvají a jejich zdržení.

KLÍČOVÁ SLOVA

křižovatka, MHD, model, preference, simulace, světelné signalizační zařízení, tramvaj

THE ISSUE OF TRAM TRAFFIC PRIORITY IN RELATION TO THE PASSAGE THROUGH AN INTERSECTION CONTROLLED BY TRAFFIC LIGHTS

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with tram priority at intersections controlled by traffic lights. It analyses the possibilities of the intersection controller's response to detected vehicles and discusses the issue of tram priority at stops in front of the intersection edge. The work includes the development of a simulation model on which the effect of different priority measures on tram operations and delays can be tested.

KEYWORDS

intersection, public transport, model, priority, simulation, traffic lights, tram

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM ZKRATEK	10
ÚVOD.....	11
1 PROBLEMATIKA PREFERENCE TRAMVAJOVÉ DOPRAVY A ZPŮSOBY DETEKCE VOZU ŘADIČEM KŘIŽOVATKY.....	12
1.1 Preferování tramvají se statickým signálním plánem	12
1.2 Absolutní preference.....	14
1.3 Podmíněná preference.....	15
1.4 Možnosti reakce řadiče SZZ na přijíždějící vozidlo MHD.....	15
1.4.1 <i>Prodloužení a zkrácení fáze</i>	15
1.4.2 <i>Vložení fáze</i>	17
1.5 Metody detekce tramvají	19
2 PROBLEMATIKA UDĚLOVÁNÍ PREFERENCE V ZASTÁVCE PŘED HRANICÍ KŘIŽOVATKY	21
2.1 Stavební úpravy	22
2.2 Statický signální plán.....	23
2.3 Předdefinovaná očekávaná doba odbavení	24
2.4 Odeslání požadavku ručně řidičem přes palubní počítač.....	25
2.5 Odeslání požadavku automaticky	26
3 PROGRAM NA SIMULOVÁNÍ TRAMVAJOVÉHO PROVOZU S PREFERENCÍ NA ŘÍZENÝCH KŘIŽOVATKÁCH	27
3.1 Použité technologie.....	28
3.2 Struktura aplikace	28
3.3 Konfigurace a definování objektů.....	29
3.4 Užití aplikace	33
3.5 Technická omezení aplikace	35
3.6 Testování validity simulace	37
3.6.1 <i>Testovací scénář „Milada“</i>	37
3.6.2 <i>Testovací scénář „Viadukt“</i>	39
3.6.3 <i>Shrnutí výsledků testování</i>	42
3.7 Návrhy na další vývoj aplikace.....	42
3.8 Hodnocení aplikace.....	43
ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Diagram průjezdu tramvaje úsekem s koordinovanými křižovatkami.....	13
Obrázek 2 Diagram střídání fází na křižovatce s absolutní preferencí tramvají.....	14
Obrázek 3 Prodloužení preferované fáze bez pevně dané délky cyklu	16
Obrázek 4 Prodloužení preferované fáze se zachováním délky cyklu	17
Obrázek 5 Nouzový kontaktní zámek na Halasově náměstí v Brně.....	20
Obrázek 6 Zastávka Náměstí 28. října a křižovatka Milady Horákové X Drobného	22
Obrázek 7 Zastávka Bazén Slovany v Plzni	23
Obrázek 8 Výstřižek z aplikace Microsoft Excel při práci s detailním přehledem	35
Obrázek 9 Diagram řešených hran a fází na křižovatce Koliště X Křenová	40
Obrázek 10 Graf čekacích dob tramvají podle funkčnosti opatření „fáze3alt“	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Klíčová slova, atributy objektů a jejich datové typy	30
Tabulka 2 Nastavitelné proměnné prostředí	32
Tabulka 3 Možné chyby zachycené v aplikaci	33
Tabulka 4 Popis sloupců výsledkových sestav	34
Tabulka 5 Výňatek z hlavního souhrnu scénáře „Milada“ s funkční vloženou fází.....	38
Tabulka 6 Výňatek z hlavního souhrnu scénáře „Milada“ bez preferenčních opatření.....	39
Tabulka 7 Data z testovacího scénáře „Viadukt“	41

SEZNAM ZKRATEK

CSV.....comma separated values (formát souboru s hodnotami oddělenými čárkou)

DC.....směr do centra

IADindividuální automobilová doprava

IZSintegrovaný záchranný systém

MHDměstská hromadná doprava

SSZ.....světelné signalizační zařízení

TXT.....formát souboru obsahujícího prostý text

ZCsměr z centra

ÚVOD

Vlivem motorizace, stálého růstu objemu individuální automobilové dopravy (dále IAD) a jejího pohybu po komunikacích sdílených s dopravou veřejnou, klesá kvalita osobní veřejné dopravy, zejména její rychlost a přesnost. Preferenci hromadné dopravy tak lze v širším slova smyslu chápat jako opatření pro zajištění konkurenceschopnosti hromadné dopravy vůči IAD. (1)

Zavádění preferenčních opatření na území dnešní České republiky bylo v odborné literatuře zmiňováno již v roce 1984. (2) do dnešní doby je téma preference tramvajů a obecně městské hromadné dopravy (dále MHD) tématem mnoha odborných publikací. Součástí některých z nich je model konkrétní křižovatky, na kterém jsou preferenční opatření testována a zkoumána. Tam se jedná zejména o prosté křížení tramvajové trati s komunikací (3) či vedení tramvajové trati po hlavní komunikaci. (4)

Hlavní motivací tohoto autora je pokrýt oblasti tématu preferování tramvajů na řízených křižovatkách, které si podle jeho názoru zaslouží zvláštní pozornost. Jedná se zejména o problematiku preferování tramvajů se zastávkou před křižovatkou, a také o modelování topologicky složitějších křižovatek a preferenčních opatření. Krom dostupné literatury tento autor čerpá také z vlastních zkušeností s prací řidiče tramvaje v Brně a také s programováním v jazyce Java.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou preferování tramvajů na křižovatkách řízených světelným signalizačním zařízením (dále SSZ). Rozebírá možnosti udělování preference tramvajům na křižovatkách se zastávkou před hranicí křižovatky. Rozebrané situace následně poskytují podklad k modelování testovacích scénářů pro simulační model vyvinutý v praktické části práce.

Cílem bakalářské práce je především naprogramovat simulační model, na kterém je možné analyzovat a testovat jednotlivá preferenční opatření reprezentující ta ve skutečných tramvajových provozech.

1 PROBLEMATIKA PREFERENCE TRAMVAJOVÉ DOPRAVY A ZPŮSOBY DETEKCE VOZU ŘADIČEM KŘIŽOVATKY

Preferencí hromadné dopravy se obvykle myslí jakékoliv upřednostňování a zvýhodňování této formy dopravy oproti dopravě ostatní. Podle (5) je rozdělována na legislativní a technickou. Legislativní preferencí se míní zákonné úpravy, jako je například přednost autobusů při výjezdu ze zastávky či přednost tramvaje před chodci. Technickou preferencí se míní stavební a provozní úpravy jako například vyhrazené jízdní pruhy, vlastní dopravní cesta či úprava režimu SZZ. (1) tyto nástroje označuje za přímou preferenci a odlišuje je od nepřímé preference, kam zařazuje nástroje ke zvyšování atraktivity hromadné dopravy jako zvýšení frekvence spojů či cestovního komfortu.

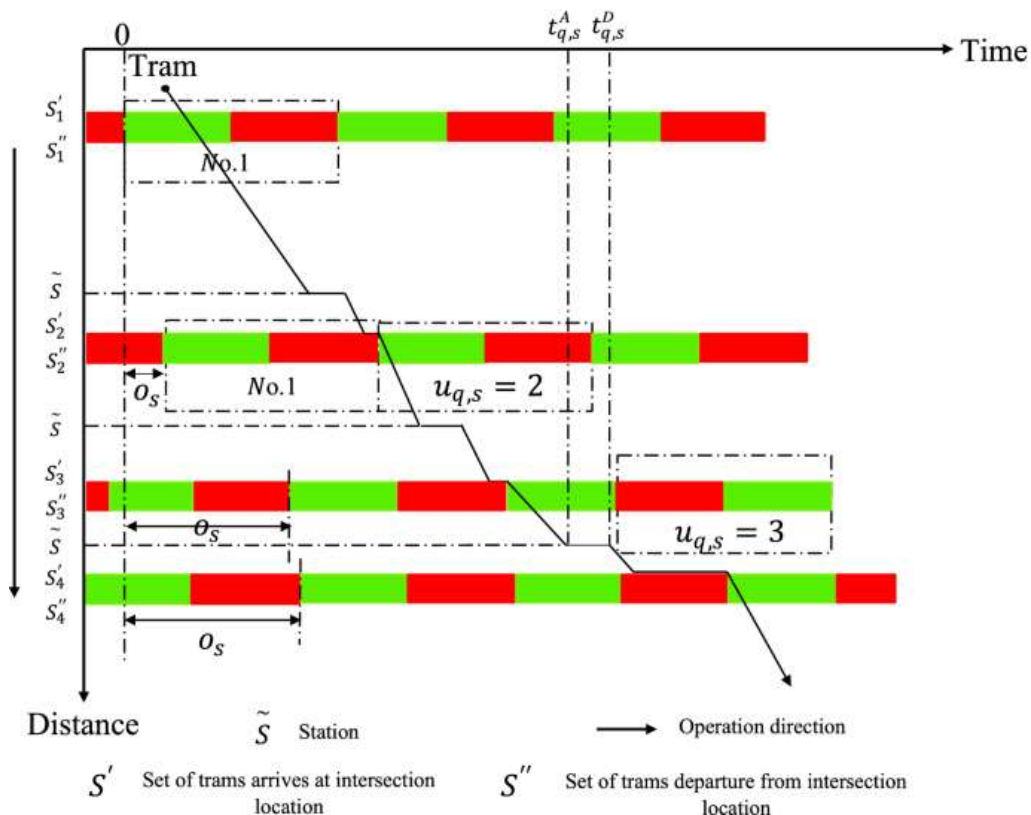
Režimy SSZ se podle (6) dělí na statické a dynamické. Statický režim se skládá z pevných cyklů a bez možnosti přizpůsobení řízení aktuální dopravní situaci. Dynamické řízení je takové, které v reálném čase podle nároků zjišťovaných detektory reaguje na poptávku po zelené změnou délky fází, případně střídáním těchto fází. Tím snižuje zdržení a zvyšuje plynulost provozu. Dynamické řízení je podle (1) nutnou podmínkou pro implementaci aktivní preference MHD. Aktivní preference se dále dělí na absolutní a podmíněnou. Těmi se zabývají podkapitoly 1.2 a 1.3.

Ačkoliv se preferencí MHD myslí její upřednostňování oproti ostatní dopravě, podle (6) se obvykle zavedením preference s dynamickým řízením povede zvýšit i plynulost IAD. To je dáno tím, že je zelený signál oproti statickým signálními plánům efektivněji přidělován a vozidla MHD dostávají volno pouze v případě, že jsou na křižovatce skutečně přítomna.

1.1 Preferování tramvají se statickým signálním plánem

Statickou preferencí (2) či pasivní předností (5) se rozumí takové opatření, ve kterém je brán zřetel na dynamiku vozidel MHD při tvorbě statického signálního plánu. Podstatou opatření je poskytnutí většího podílu signálu volno pro směr pojížděný vozidly MHD. Efekt takového opatření je podle (2) nízký při malé frekvenci vozidel MHD, ovšem s větší intenzitou provozu MHD stoupá. (5) upozorňuje na to, že při slabém provozu vozidel hromadné dopravy může být blokován provoz v kolmém směru, i když úsekem žádné vozidlo MHD neprojíždí. Také poukazuje na to, že toto opatření nedokáže úplně eliminovat zdržení, pouze zkracuje průměrnou dobu čekání.

V (7) a (4) je diskutováno, jak může být na koordinovaných křižovatkách využito zelených vln pro IAD při preferování tramvají. k tomu může být využito diagramu s časem na vodorovné ose a dráhou na ose svislé s vyznačením průběhu fází na křižovatkách a se šikmou lomenou čarou znázorňující pohyb tramvaje. Na diagramu (Obrázek 1) je znázorněn pohyb tramvaje skrz úsek koordinovaných křižovatek se statickým signálním plánem. z diagramu je patrné, že na pohyb tramvaje nebyl při návrhu signálního plánu brán zřetel, neboť je tramvaj na třech ze čtyř křižovatek zastavena světelnou signalizací.



Obrázek 1 Diagram průjezdu tramvaje úsekem s koordinovanými křižovatkami

Zdroj: (4)

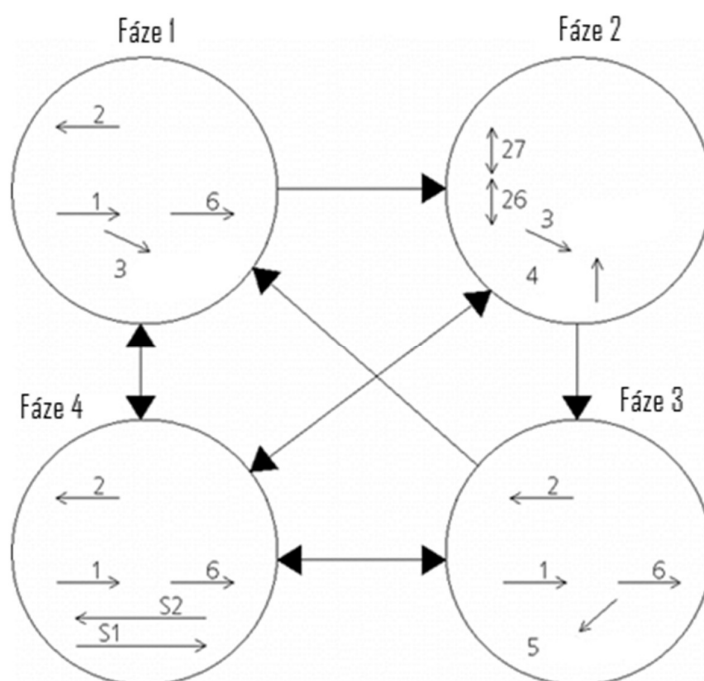
Klíčové pro efektivní statickou preferenci s využitím zelených vln pro ostatní dopravu je také umístění zastávek. (2) zmiňuje pro jejich umístování následující pravidlo: Před 1. křižovatkou, za 2. křižovatkou, před 3. křižovatkou, za 4. křižovatkou atd. Takto v polovině mezizastávkových úseků žádná křižovatka není a u zbylé poloviny úseků se počítá s tím, že druhou křižovatkou projede tramvaj plynule spolu se svazkem IAD.

Ve vyvinutém simulačním modelu je možné simulovat jednak liniovou koordinaci křižovatek (mít 1 společný signální plán pro více křižovatek), jednak odbavování tramvají v zastávkách.

1.2 Absolutní preference

Absolutní preference je podle (1) a (6) takový způsob řízení křižovatky, při kterém je pořadí a délka fází upravováno tak, aby vozidlo MHD projelo bez nutnosti zastavit. Výjimkou jsou případy, kdy se ke křižovatce přihlašuje více vozidel tak, že by nebyl umožněn průjezd ostatní dopravy. Výjimkou také mohou být případy, pokud se ke křižovatce přihlásí více navzájem konfliktních preferenčních požadavků. Například tento autor byl jednou při řízení tramvaje na křižovatce s absolutní preferencí zastaven, protože v kolizním směru projíždělo vozidlo IZS.

Podle (1) se absolutní preference uplatňuje zpravidla na jednoduchých křižovatkách a přechodech řízených SSZ. Nicméně (7) rozebírá situaci, ve které je světelnou signalizací řízena styková křižovatka (tvar písmene „T“) s tramvajovou tratí vedenou paralelně vedle přímé větve křižovatky. Na diagramu (Obrázek 2) je vyznačeno střídání fází obsluhujících všechny větve křižovatky (označeno jako „Fáze 1“ – „Fáze 3“), přičemž řízení může během kterékoliv z těchto fází na základě preferenčního požadavku tramvaje přejít do fáze „Fáze 4“, během které mají volno signální skupiny pro tramvaje označené jako S1 a S2. Po proběhnutí této fáze se řízení může vrátit do libovolného stavu.



Obrázek 2 Diagram střídání fází na křižovatce s absolutní preferencí tramvají

Zdroj: (7)

1.3 Podmíněná preference

Podle (1), (5) i (6) se podmíněnou preferencí rozumí takové opatření, které sice neumožní všem vozidlům plynulé projetí bez zastavení, ovšem zásadně zkrátí dobu čekání v porovnání se stavem bez preference.

Podmíněná preference se používá na místech se silným provozem či křižovatkách s provozem preferovaných vozidel ve více směrech. Nevhodnost zavedení absolutní preference na těchto místech vyplývá podle (5) v prvním případě z toho, že by mohlo dojít k naprostému zablokování křižovatky, a v druhém případě z toho, že není možné zajistit plynulý průjezd vozidlům v navzájem kolizních směrech.

(2) také upozorňuje na skutečnost, že při vysokých intenzitách provozu preferovaných vozidel (například pokud preferovaná vozidla přijíždějí v kratším intervalu, než je délka cyklu) se dynamický signální plán přemění v de-facto statický se střídáním minimálních délek fází pro nepreferované směry a maximálních délek fází pro preferované směry.

1.4 Možnosti reakce řadiče SZZ na přijíždějící vozidlo MHD

V této podkapitole jsou rozebrány základní způsoby, jakým mohou být řadičem křižovatky obsluhovány preferenční požadavky. Podle (1) a (8) mezi tyto základní způsoby patří prodloužení a zkrácení fáze, změna pořadí fází či vložení fáze navíc.

Z pohledu algoritmizace je možné dosáhnout efektu přeskočení fáze pouhým zkrácením jejího trvání na 0 s (a přeskočením následné vyklízeční doby pro tuto fázi), podobně je také možné dosáhnout efektu vložení fáze jejím prodloužením z výchozí délky 0 s. Efektu změny pořadí fází je pak možno dosáhnout nejprve vložení fáze, která je do běžného programu zařazena později, a následně jejím přeskočením. Proto dále není metoda změny pořadí fází diskutována. Této možnosti „skládání složitějších preferenčních opatření pomocí jednodušších“ je také využito v praktické části práce.

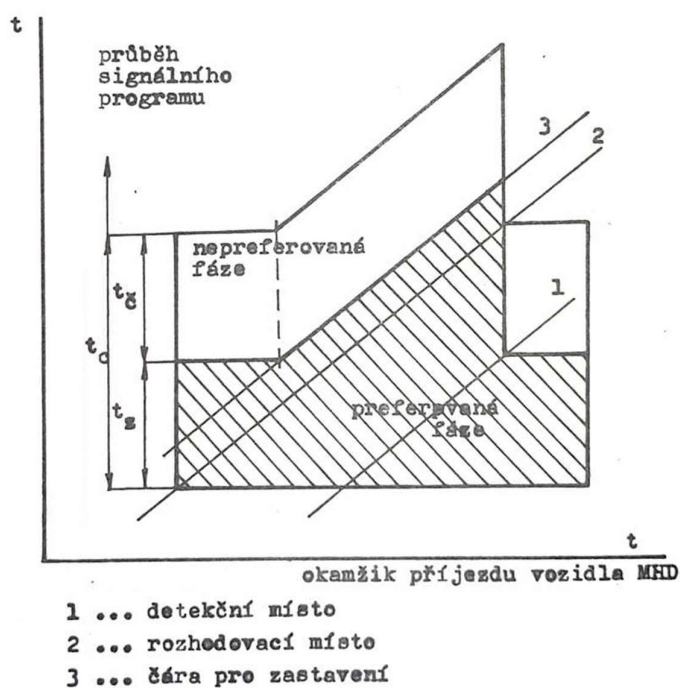
1.4.1 Prodloužení a zkrácení fáze

Tato metoda spočívá ve změně délky fází tak, aby vozidlo buďto projelo bez zastavení, nebo aby čekalo co nejkratší dobu.

Pokud se vozidlo přihlásí ke křižovatce v době, kdy probíhá vlastní poptávaná fáze, může tato fáze být prodloužena na dobu potřebnou k projetí křižovatky. Pokud se vozidlo přihlásí během průběhu nepoptávané fáze, může tato fáze být zkrácena. Například v Plzni (8) k tomuto zkracování dochází jen na úkor IAD, nikdy není zkrácena zelená pro chodce.

Nicméně podle (8) je možné zkracovat i poptávanou fázi. Pokud se vozidlo MHD přihlásí v době, kdy má na křižovatce volno a zároveň by nestihlo projet stop čarou ani při nejdelším možném prodloužení této fáze, pak je vhodné tuto fázi naopak zkrátit a ukončit co nejdříve, aby vozidlo MHD dostalo volno co nejdříve po příjezdu ke křižovatce.

Důležitým aspektem při prodlužování poptávané fáze je délka cyklu. Pokud nejsou kladeny požadavky na zachování stálé délky cyklu pro liniovou koordinaci (například na izolovaných křižovatkách), je vždy možné prodloužit poptávanou fázi na dobu, kterou detekované vozidlo potřebuje na projetí křižovatky. Na diagramu (Obrázek 3) je znázorněno, jak může být ve dvoufázovém programu prodlužována preferovaná fáze až do průjezdu detekovaného vozidla, což prodlužuje i délku cyklu (označenou jako t_c).

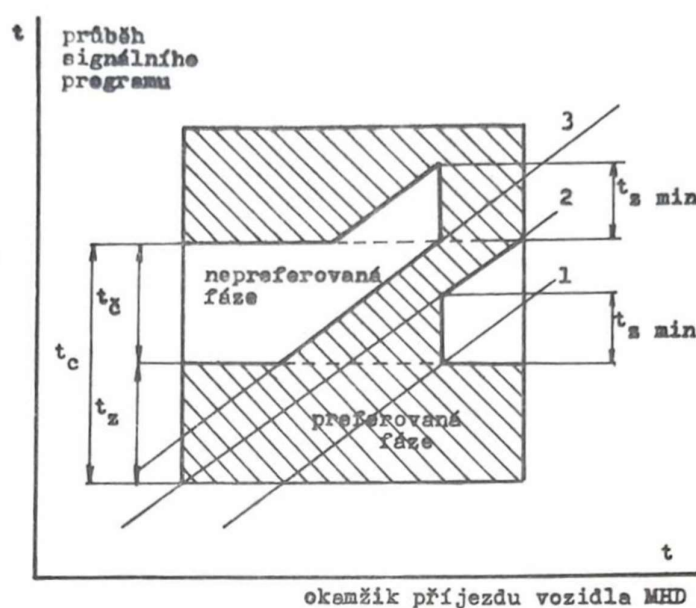


Obrázek 3 Prodloužení preferované fáze bez pevně dané délky cyklu

Zdroj: (2)

Při zavádění preference tramvají v Athénách (7) bylo nutné na dotčených křižovatkách zachovat délku cyklu. Tam toho bylo docíleno zkrácováním nepreferované fáze a případně jejím přeskočením, pokud by pro ni vycházela délka zelené méně než 8 s. Až pokud by nepreferovaná fáze měla být přeskočena potřetí ve třech za sebou jdoucích cyklech, byla by detekovaná tramvaj řadičem křižovatky ignorována.

(2) nicméně ukazuje, že je možné dosáhnout absolutní preference i se zachováním délky cyklu. Na diagramu (Obrázek 4) je patrné, že při zkrácení nepreferované fáze a při jejím případném „odsunutí do začátku dalšího cyklu“ je možné umožnit vozidlu plynulý průjezd, ať přijede k detekčnímu místu v libovolné časové poloze vůči stavu fází na křižovatce.



Obrázek 4 Prodloužení preferované fáze se zachováním délky cyklu

Zdroj: (2)

1.4.2 Vložení fáze

(1) i (8) zmiňují možnost zařadit do cyklu speciální fázi určenou pro průjezd vozidel MHD. Tato fáze se v programu běžně nevyskytuje a je zařazena jen při přihlášení vozidla MHD. Tedy může být zařazena fáze s volnem pro MHD i vícekrát během jednoho cyklu.

Podstatou opatření je vložení speciální preferované fáze mezi dvě nepreferované, z čehož vyplývá, že se v cyklu musí běžně vyskytovat dvě po sobě následující nepreferované fáze. Zároveň předpokládáme, že součástí cyklu je jedna běžná fáze s volnem pro MHD. Podmínka k uplatnění tohoto opatření je tedy základní cyklus skládající se minimálně ze tří rozdílných fází.

Toto opatření může být obzvláště efektivní, pokud křižovatkou vozidla MHD projíždí ve vyhrazeném jízdním pruhu a pokud je křižovatka osazena dopravní značkou s 15 (signály pro tramvaje a vozidla MHD ve vyhrazených jízdních pruzích). Při stanovování délky vložené fáze pak nemusí být brán ohled na vliv ostatních vozidel.

Pokud se počítá s tím, že před zařazením vložené fáze již vozidlo MHD čeká před křižovatkou (například v případě umístění zastávky před křižovatkou), může být délka této fáze zkrácena jen na dobu potřebnou k reakci řidiče a vjetí vozidla do křižovatky (například pouhých 5 s), a mít tak minimální dopad na čekací dobu ostatních vozidel.

Zařazení speciální fáze do cyklu na základě přihlášení tramvaje může být také užito v případě, že se v křižovatce nachází kolejová křižovatka s větví, která není v pravidelném provozu pojížděna, takže v základním programu křižovatky není zařazena příslušná fáze. To může být implementováno například tak, že běžná fáze s volnem pro tramvaje umožní jízdu jen ve směru pojížděným v pravidelném provozu, a fáze vložená umožní tramvaji jízdu ve všech směrech.

Ve městě Melbourne (9) je používána vložená fáze v provozu tramvajů v jízdním pruhu sdíleném s IAD. Na dvoupruhové komunikaci bez odbočovacích pruhů mohou vozidla odbočující vlevo (v případě Melbourne vpravo) způsobovat časové ztráty tramvajím, které je na rozdíl od ostatních vozidel nemohou objet. Vložená fáze spočívá v udělení volna pouze větví s čekající tramvaji, aby vozidla IAD mohla odbočit vlevo bez dávání přednosti protijedoucím a umožnila tak plynulý průjezd tramvaje.

Vkládání fází je podle pozorování autora v Brně hojně implementováno. V praktické části této práce (v kapitole 3.6.1) je na jedné z takových brněnských křižovatek demonstrováno, že toto opatření může nejenom zkrátit časové ztráty vozidel MHD, nýbrž i zásadně navýšit propustnost této křižovatky pro vozidla MHD.

1.5 Metody detekce tramvají

Základním způsobem detekce tramvaje je trolejový kontakt. Jedná se o čidlo citlivé na průjezd pantografu umístěné na pevně daném místě před křižovatkou na trolejovém vedení. Výhodou trolejových kontaktů je podle (8) jejich vysoká spolehlivost a cena (není potřeba instalovat žádné zařízení přímo do tramvají), jejich nevýhodou je obtížná změna jejich polohy vůči křižovatce, nemožnost odesílat řidiči další informace o vozidle jako směr a zpoždění, také a nemožnost rozšířit toto opatření na nekolejovou dopravu. Naopak (1) tvrdí, že je možné trolejové kontakty používat alespoň v trolejbusové dopravě.

V Brně v blízkosti zastávky Celní přechází tramvajová trať ze středového pásu komunikace na místo mimo komunikaci. Křižovatka je osazena SSZ a trolejovými kontakty a fáze pro tramvaje je zařazena pouze při projetí kontaktem. Řídící logika řadiče křižovatky je ovšem nevhodně implementována, a pokud tramvaj projede přes kontakt v době trvání poptávané fáze, bude řadičem ignorována, ačkoliv již volno nestihne, čímž prakticky uvízne před křižovatkou. Je tak možné pozorovat, jak řidiči tramvají zejména ve směru do centra (dále jen DC) zdánlivě bezdůvodně zastavují na volné trati. Zastavují před trolejovým kontaktem v případě, že právě probíhá fáze pro tramvaje, aby mohli projet přes kontakt až po jejím skončení a být tak řadičem zaregistrováni.

Pro případ poruchy, neočekávaného zdržení tramvaje v úseku mezi kontaktem a křižovatkou nebo v případě uvíznutí tramvaje ve výše zmíněné situaci je nutné křižovatky vybavit nouzovým čidlem, které může aktivovat sám řidič. (1) i (6) je zmiňují jako takzvané nouzové kontaktní zámky. Nouzový kontaktní zámek na obrázku (Obrázek 5) má na sobě piktogram tramvaje a je ovládán čtyřhranným klíčem, aby nedošlo ostatními účastníky provozu k záměně či zneužití. Zároveň kontrolka v horní části signalizuje, že požadavek řidiče byl zaregistrován.



Obrázek 5 Nouzový kontaktní zámek na Halasově náměstí v Brně

Zdroj: foto autor

Křižovatky s kolejovým rozvětvením navíc mohou být podle (1) i (6) vybaveny stavěcími kontakty výhybek, díky nimž je řadiči odeslána i informace o směru detekovaného vozidla.

V Plzni byla podle (8) v rámci výstavby dispečinku všechna vozidla MHD osazena GPS přijímači a jednotkou schopnou bezdrátově posílat datové zprávy řadičům křižovatek. Výhodou tohoto způsobu detekce je možnost preference nejenom drážních vozidel, ale i autobusů, a také možnost odesílat data o směru a zpoždění vozidla. Informace o poloze vozidel mají zároveň další využití pro dispečink i veřejnost.

V Plzni je podle (8) také implementována takzvaná sdílená preference. Jde o přenos informací o detekovaných vozidlech mezi sousedícími křižovatkami pomocí koordinačního kabelu. Je tak možno zvýšit počet křižovatek s preferencí MHD bez nutnosti pořizování dalších preferenčních jednotek.

2 PROBLEMATIKA UDĚLOVÁNÍ PREFERENCE V ZASTÁVCE PŘED HRANICÍ KŘÍŽOVATKY

Udělování preference tramvajím na křižovatkách, na kterých se nachází zastávka v těsné blízkosti stop čáry, je stále otevřený problém. Relevantní zdroje, například (7) a (3), většinou situaci zjednodušují na vozidla, která křižovatkou pouze projíždí. Tato kapitola je zaměřena na rozbor problému zastávek před hranou křižovatky a na vhodná preferenční opatření.

Samotné jádro problému tkví ve skutečnosti, že při udělování preference vozidlům, která křižovatkou pouze projíždí, je možné spolu s vhodným umístěním přihlašovacích bodů předvídat příjezd vozidla ke křižovatce desítky vteřin předem. To je obvykle dostatek času k tomu, aby řidič křižovatky mohl adekvátně zareagovat jedním ze způsobů uvedených v kapitole 1.4.

Jenže pokud vozidlo před křižovatkou odbavuje cestující, nelze tak snadno předvídat, za jak dlouho bude připraveno k odjezdu. Odbavení cestujících může trvat jednotky vteřin, ale například nástup či výstup vozíčkáře, kočárků nebo otázky cestujících na řidiče mohou dobu odbavování prodloužit až na minutu. Zároveň pokud řidič využívá poptávkového otevírání dveří a nikdo v zastávce nevystupuje ani nenastupuje, doba odbavení nemusí být prodloužena ani o čas potřebný na zavření a otevření dveří. Tedy je zřejmé, že dobu odbavení nelze s jistotou předvídat. Nicméně při použití různých signálních plánů pro různé denní doby lze proměnlivou dobu odbavování vzít v potaz.

Motivačním příkladem může být situace u zastávky Náměstí 28. října v Brně (Obrázek 6). Nástupní ostrůvek zastávky ve směru z centra je určen pouze pro 1 odbavující soupravu. Přesná délka cyklu a jednotlivých fází není autorovi známa a pro účely tohoto rozboru byly hodnoty odhadnuty pozorováním křižovatky takto: Délka cyklu 90 s, fáze s volnem pro tramvaje 20 s. V takovém uspořádání projede každý cyklus pouze 1 tramvaj, protože popojetí čekající tramvaje na nástupní ostrůvek a odbavení trvá déle než 20 sekund.

V přepravní špičce projíždí křižovatkou tramvaje 3 linek o intervalu 5 minut, tedy 36 vozidel za hodinu. (10) 90sekundových cyklů během hodiny proběhne 40. Bez žádného preferenčního opatření je tedy křižovatka na hraně kapacity (zbývají pouhé 4 cykly pro vyrovnání nerovností v provozu a pro případné služební, cvičné nebo zvláštní jízdy). Křižovatka nicméně přijímá požadavky na preferenci a umí vložit speciální fázi pouze pro tramvaje mezi jiné dvě, kde mají tramvaje stůj. V praktické části v oddílu 3.6.1 je na této křižovatce demonstrováno, že toto opatření prakticky zdvojnásobuje propustnost křižovatky.



Obrázek 6 Zastávka Náměstí 28. října a křižovatka Milady Horákové X Drobného

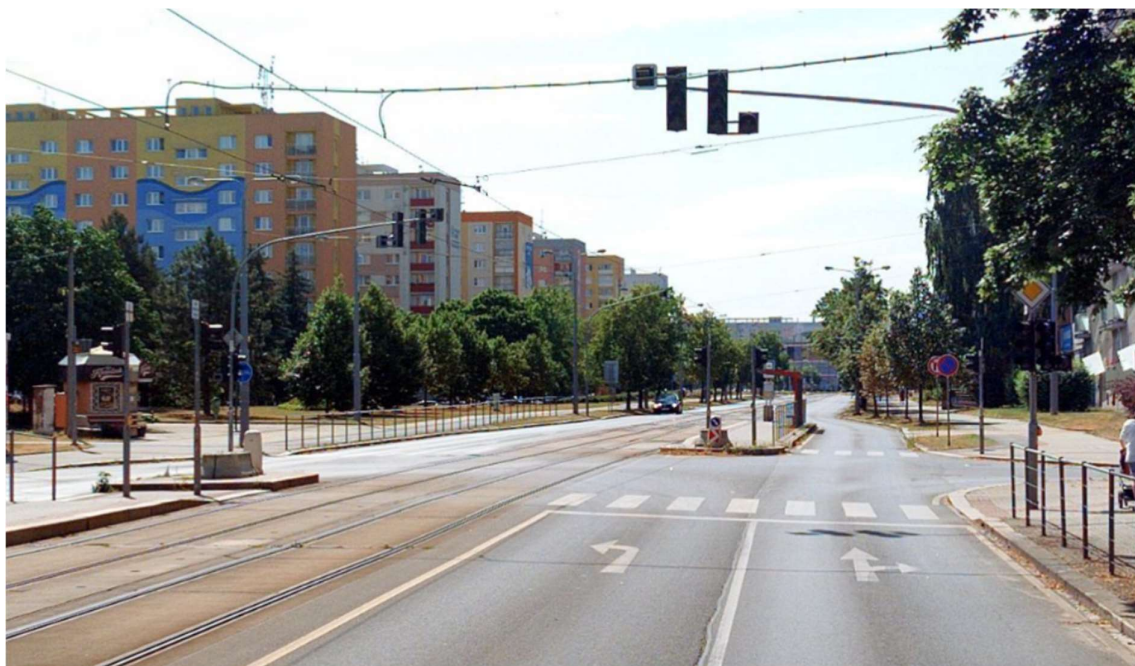
Zdroj: (11)

Následující podkapitoly se věnují rozboru jednotlivých preferenčních opatření, která mohou být na místech se zastávkou před hranicí křižovatky zavedeny.

2.1 Stavební úpravy

Nejjednodušším a zároveň zřejmě nejstarším navrhovaným řešením je problému předcházet a zastávky na tramvajových tratích umístit vždy za křižovatkou. O tomto opatření má ale smysl uvažovat pouze při projektování nových tramvajových tratí, případně při jejich rekonstrukcích, a jeho proveditelnost je silně svázána s prostorovými poměry.

Výhodou takového řešení je lepší geometrické uspořádání křižovatky. V prostoru před křižovatkou zabírá každý odbočovací pruh minimálně 2,5 m šíře ulice a toto místo může být za křižovatkou věnováno nástupnímu ostrůvku, jak ukazuje Obrázek 7.



Obrázek 7 Zastávka Bazén Slovany v Plzni

Zdroj: (11)

Nevýhodou takového uspořádání (oproti tomu se zastávkami proti sobě) je ztížená přístupnost nástupních ostrůvků chodcům, obzvláště při přestupu na spoj jedoucí v protisměru. Zároveň nevýhodou může být skutečnost, že konfliktními body mezi tramvajemi a chodci nebo IAD budou tramvajové vlaky projíždět výrazně vyšší rychlostí oproti uspořádání se zastávkami před křižovatkou. V případě zastávky Bazén Slovany leží stop čára přilehlé křižovatky 70 m od označníku zastávky (11), tedy je možné očekávat při průjezdu křižovatkou výrazně vyšší rychlost tramvaje, než pokud by do křižovatky rozjížděla ze zastávky.

2.2 Statický signální plán

Ve specifickém případě může i křižovatka řízená statickým signálním plánem preferovat průjezd tramvají. Pokud se zastávka nachází v těsné blízkosti křižovatky a je běžné, že tramvaje ze zastávky vyjíždí přesně na čas (například jde o výchozí zastávku linky či zastávku přestupní, kde je podle jízdního řádu vyrovnávací čas), je možné nastavit pevný signální plán s délkou cyklu 60 s tak, aby tramvaje vyjíždějící včas projely křižovatkou bez zastavení.

Příkladem místa, kde by takové opatření mohlo být uplatněno, je výjezd ze smyčky Stará osada v Brně. Lze předpokládat, že vozidla vyjíždějící z výchozí zastávky pojedou právě včas, a doba jízdy ke křižovatce vzhledem k vedení trati po samostatném tělese nekolísá.

Výhodou takového opatření je jeho jednoduchost, samočinnost a případná možnost liniové koordinace. Nevýhodou jsou jednak specifické podmínky pro jeho uplatnění, dále že takové opatření bude ve většině případů fungovat pouze v jednom směru, a také že z jízdy včas činí labilní rovnovážný bod – pokud v 60sekundovém cyklu bude fáze s volnem pro tramvaje trvat 20 s, tak vozidlo opožděné o 20 s bude nutně zdrženo o dalších 40.

Uplatnitelnou úlohou takového signálního plánu může být program křižovatek, kde se vzhledem k nízké intenzitě provozu nevyplatí zavádět dynamické řízení. Také může být použitý jako náhradní signální plán v případě poruchy přijímače na radiči křižovatky.

2.3 Předdefinovaná očekávaná doba odbavení

Toto opatření počítá s vysláním požadavku na preferenci v čase příjezdu na zastávku (ať už trolejovým kontaktem v blízkosti označníku, GPS bodem v prostoru zastávky či automatizovaným odesláním požadavku při otevření dveří). Radič křižovatky zareaguje na požadavek tak, aby fáze pro tramvaj byla přidělena po uplynutí předem nastaveného času na odbavení.

Takové opatření má smysl uplatnit spíše na zastávkách, kde doba potřebná k odbavení příliš nekolísá. Výhodou opatření je jeho jednoduchost i fakt, že čas na odbavení lze stanovit prostým měřením doby odbavení na místě. Takové měření by mělo být provedeno v různých denních dobách (zvláště v ranní špičce, dopoledním sedle, odpolední špičce a během večerního provozu), v pracovní den, o víkendu, v případě studentského města během semestru i ve zkuškovém období. Výsledná doba na odbavení může být stanovena například tak, aby předem stanovený percentil všech vozů právě stihl odbavit. Nevýhodou opatření je opět amplifikace menšího zpoždění (a to obzvláště během přepravních špiček, kdy je možné očekávat delší dobu odbavení i větší zpoždění).

2.4 Odeslání požadavku ručně řidičem přes palubní počítač

Na zastávce Osová v Brně funguje systém elektrických výhybek se zabezpečením pomocí pražcových návěstidel, které zabraňuje vzájemné jízdě tramvají v kolizním směru. Při příjezdu tramvají ve směru do centra (zastávka až za řízeným úsekem) se tramvaje přihlašují do řízeného úseku automaticky průjezdem přes kontaktor. Pokud není jiná tramvaj přihlášená v kolizním směru, dojde k přestavení výhybky a umožnění jízdy. Ve směru z centra (řízený úsek za zastávkou) je přihlašovací bod v úrovni označníku zastávky. Přihlašování do úseku je v tomto směru řešeno ručním požadavkem řidiče přes palubní počítač.

K uvolnění cesty v požadovaném směru dochází přibližně za 5 sekund od vyslání požadavku, během kterých je řidič informován příslušnou návěstí, že jeho požadavek byl přijat. Taková návěst může vypadat například jako svítící tečka v rohu plochy pražcového návěstidla. Stejný systém může být použit i pro odeslání preferenčního požadavku řadiči křižovatky se světelným zabezpečením. Výhodou tohoto systému je jeho jednoduchost a transparentnost – řidič ihned ví, zda mu bude volno uděleno, i za jak dlouho může volno očekávat, tedy je pro něj snadné si odeslání požadavku načasovat tak, aby nedocházelo ke zbytečným prodlevám. V případě, že je právě obsluhován jiný konfliktní požadavek, může být řidič alespoň informován, že jeho požadavek byl přijat. Další výhodou je využívání již existujících prvků na palubním počítači – řidiči jsou již navyklí na používání tlačítek se šipkami k ovládní elektrických výhybek.

Nutnost aktivního zásahu řidiče se může jevit jako nevýhoda, nicméně k zásahu nedochází nikdy při jízdě, vždy při stání v zastávce. Skutečnou nevýhodou tohoto systému je použití fyzického kontaktoru v železničním svršku, kvůli kterému je nutné zastavit přesně nad ním (což je vzhledem k různé poloze vysílače palubního počítače napříč typy vozů obtížné). Nesprávné zastavení znamená buďto nutnost po odbavení popojet a následně vyčkat na udělení volna, anebo vyjít z kabiny a využít nouzový kontaktní zámek umístěný v prostoru zastávky.

2.5 Odeslání požadavku automaticky

Křižovatka u zastávky Náměstí 28. října v Brně řešená na začátku kapitoly 2 uděluje preference tramvajím pomocí vložené fáze. Ve směru do centra se zastávka nachází za křižovatkou a vložená fáze je aktivována průjezdem přes GPS bod přibližně 200 m před křižovatkou. Ve směru z centra je zastávka přímo před hranicí křižovatky a k přihlášení dojde přepnutím do následujícího mezizastávkového úseku, tedy zavřením dveří a popojetím, případně stisknutím tlačítka „průjezd zastávkou“. Takové opatření je nepraktické a nepohodlné pro cestující, protože je k jeho aktivaci vyžadováno zbytečné popojetí s vozem, případně přepnutí polohy v palubním počítači a nesprávné ohlášení příští zastávky. Možným řešením by bylo vyslat požadavek zároveň se stisknutím tlačítka zavření dveří.

Doba zavírání dveří (tj. doba od stisknutí tlačítka po dobu, kdy sepnou všechna koncová čidla dveří a řidiči zhasne kontrolka „blokování rozjezdu“) se liší podle typu vozů, obvykle trvá 5-10 sekund. Pokud by fázový přechod trval déle než tento čas, docházelo by k nežádoucímu efektu, kdy již cestující nemohou nastupovat, ačkoliv vozidlo stále stojí v zastávce – tedy přesně k tomu efektu, ke kterému dochází v křižovatkách bez dynamického řízení a kterému má toto preferenční opatření předcházet. Zároveň je také nutné počítat s tím, že dveře se mohou zaseknout vlivem poruchy či mechanické překážky, což dobu jejich zavírání prodlouží nejméně na dvojnásobek.

Toto opatření lze využít na křižovatkách, kde je možný rychlý fázový přechod do preferované fáze, například na izolovaných křižovatkách bez liniové koordinace či na signalizovaných přechodech pro chodce.

3 PROGRAM NA SIMULOVÁNÍ TRAMVAJOVÉHO PROVOZU S PREFERENCÍ NA ŘÍZENÝCH KŘÍŽOVÁTKÁCH

Cílem praktické části této bakalářské práce je naprogramovat simulaci, na které bude možné demonstrovat problémy řešené teoreticky v předchozích kapitolách a kvantifikovat jejich dopady. Aplikace by ovšem měla být připravena pro širší případy užití než pouhé testování konkrétních situací zmíněných v této práci. Pro simulaci by mělo být možné nadefinovat část jakékoliv tramvajové sítě o jakémkoliv geometrickém uspořádání a křižovatky s dynamickým řízením, a následně testovat vliv nastavení signálního plánu na doby jízdy tramvají.

Nutným požadavkem ke splnění tohoto cíle je zajistit dostatečnou kvalitu simulace. Program musí umět věrně simulovat jízdu, zrychlování a brzdění tramvají. Také musí být zajištěno, aby každá tramvaj reagovala na okolní provoz a uměla zastavit před překážkou, aby respektovala návěsti zakazující jízdu a aby nepřekračovala traťovou rychlost.

Dalším požadavkem na aplikaci je její přístupnost a jednoduchost. Cílem této aplikace je některé aspekty skutečného provozu v simulaci abstrahovat, aby bylo nastavení simulace co nejjednodušší, ale zároveň tím co nejméně ovlivnit její věrnost a validitu výsledků a zabezpečit racionální poměr mezi případným zhoršením kvality výsledků a úsporou práce. Simulace například zanedbává konstrukční rychlost tramvají vzhledem k tomu, že v běžném provozu je obvykle více omezující rychlost traťová.

Zároveň jsou modelované situace v literatuře (3) (4) často zjednodušené, až lze jejich výsledky jen stěží aplikovat na tramvajové provozy v ČR. V tramvajových provozech v ČR je běžné vedení tratí úzkými ulicemi v centrech měst, mnohdy v jízdním pruhu společném s IAD, a tomu odpovídá i složité uspořádání křižovatek a signální plány. Zároveň jsou v českých provozech běžné výrazně omezené rychlosti při průjezdu přes výhybky a křížení (obvykle na 15 či 10 km·h⁻¹). Běžné jsou také zákazy souběžné jízdy či míjení protijedoucích vozů v obloucích s nedostatečnou vzdáleností os kolejí. s těmito specifikami je nutné, aby aplikace uměla pracovat.

3.1 Použité technologie

Pro psaní aplikace byl tímto autorem zvolen jazyk Java. Java je univerzální objektově orientovaný programovací jazyk vhodný pro tento účel. Zároveň umožňuje program spouštět na strojích s různými operačními systémy. Celý program používá Javu 8, což je podle jejího vydavatele nejčastěji užívaná verze v produkčních aplikacích, a tedy vydavatel její běhové prostředí nabízí ke stažení na úvodní stránce (12). Sestavení aplikace pod touto verzí Javy je tedy v souladu s cílem co nejvíce aplikaci zpřístupnit uživatelům. Výsledkem sestavení je spustitelný soubor typu JAR.

Aplikace komunikuje s uživatelem pomocí jednoduchých vyskakovacích oken a komponent pro výběr souborů. Jde o výchozí komponenty grafického balíčku Swing, který je součástí standardních knihoven v Javě. Úprava vzhledu těchto komponent a bohatší grafické rozhraní je mimo rozsah řešené úlohy.

Vstupní data se definují pomocí textového konfiguračního souboru, ve kterém jsou strukturována podle zvláštního formátu vyvinutého právě pro účel této aplikace. Formát vychází z formátu OBJ používaného pro grafické 3D modelování. Požadavky na tento formát jsou jeho jednoduchá čitelnost pro člověka i pro stroj.

Výstupem aplikace je textový soubor obsahující dvě sestavy dat. Jejich obsah je popsán v podkapitole 3.4. Obě sestavy dat jsou ve formátu CSV (comma separated values, tedy hodnoty oddělené čárkami). CSV je běžně používané pro ukládání dat, které mají formát tabulky. Pokud uživatel uloží jednu ze sestav jako samostatný soubor, může ji pak snadno naimportovat do aplikace Microsoft Excel pro analýzu.

3.2 Struktura aplikace

Simulace je založena na takzvaných agentech. Agent je samostatná a do nějaké míry autonomní entita, která sleduje nějaký cíl a podle něho zobrazuje množinu vjemů do množiny rozhodnutí. (13) Agent tramvaje sleduje cíl jet po své trati, dodržovat předpisy a zabránit kolizím. Vnímá svou současnou rychlost, trať před sebou a všechny informace o ní (další vozidla na trati, maximální povolenou rychlost, zda na křižovatce svítí návěst volno atd.). Výstupem jeho rozhodnutí je rychlost, jakou se tramvaj má dále po trati pohybovat. Agent signálního plánu vnímá svůj současný stav (jaká fáze probíhá jak dlouho) a požadavky na udělení preference, a výsledkem jeho rozhodnutí je délka, jakou by podle něj měla současná fáze mít.

Dále v simulaci figurují „přirodní zákony“ či fyzika. Ty mechanicky zařizují samotné změny v prostředí. Pokud se agent tramvaje rozhodne jet nějakou rychlostí, tak fyzika simulace posune tramvaj o odpovídající vzdálenost. Pokud se signální plán rozhodl zkrátit současnou fází, vyvolá fyzika simulace fázový přechod na fázi následující.

Jádrem simulace je neustále opakující se rutina, ve které se každý agent rozhodne o dalším počínání a ve které fyzika simulace vykoná příslušné změny. Jedna iterace této rutiny reprezentuje ve výchozím nastavení 1/60 sekundy, tedy každou sekundu v simulaci se stav obnoví šedesátkrát. Toto nastavení je možné změnit v konfiguraci. V některých iteracích dojde k zápisu stavu všech agentů do výstupní sestavy. Interval zapisování je nastavitelný v konfiguraci.

V simulaci figuruje také komponenta, která umisťuje tramvaje na začátek tratě. Každá linka má daný interval, ve kterém se vozidla objevují na trati, zároveň má nastavené i počáteční odsazení („offset“) pozdržující počátek umisťování tramvají na trať, aby nedošlo k objevení vozů všech linek na začátku ve stejný okamžik. Zároveň pro zvýšení variability tato komponenta náhodně generuje tramvajím zpoždění v rozsahu 0-5 minut podle exponenciálního rozdělení. Střední hodnotu tohoto rozdělení je možné nastavit v konfiguraci (nastavením střední hodnoty na 0 se funkce vypne).

3.3 Konfigurace a definování objektů

Pro deklaraci objektů a nastavení simulace byl vyvinut speciální formát snadno čitelný pro stroj i pro člověka. V používaném formátu není potřeba používat žádné speciální znaky. Jednotlivá data se oddělují mezerami (data samotná proto mezery obsahovat nesmí). Každý řádek v konfiguračním souboru reprezentuje deklaraci jednoho objektu používaného v simulaci. Prázdné řádky a řádky začínající na „-“ jsou při čtení souboru ignorovány. Příklad konfigurace simulace s doplňujícími komentáři je v příloze (PŘÍLOHA A).

Řádek deklarace objektu vždy začíná klíčovým slovem. To slouží jako identifikátor druhu objektu, který je deklarován. U většiny objektů následuje jeho název. Název musí být pro typ objektu unikátní, protože díky němu je možné se dále v konfiguraci na objekt odkázat. Dále může následovat několik pevně daných atributů. Některé objekty mohou na konci deklarace vyžadovat seznam atributů, přičemž jde vždy odkaz na objekty stejného druhu. Například na konec řádku deklarace fáze patří neomezené množství hran, případně i žádná (v tabulce znázorněno jako „0..n“). Tabulka 1 shrnuje všechna klíčová slova, atributy a jejich datové typy.

Tabulka 1 Klíčová slova, atributy objektů a jejich datové typy

klíčové slovo	atributy						
edge	název	délka	rychlost	kapacita			
	text	celé číslo [m]	celé číslo [km/h]	celé číslo			
conflict	název	hrany					
	text	edge 2..n					
line	název	délka vozidel	interval	odsazení od začátku	hrany		
	text	celé číslo [m]	desetinné číslo [min]	desetinné číslo [min]	edge 1..n		
stop	hrana	zastavující linky					
	edge	line 1..n					
phase	název	minimální trvání	výchozí trvání	maximální trvání	délka vyklízeací doby	chráněné levé odbočení	signální skupina
	text	celé číslo [s]	celé číslo [s]	celé číslo [s]	celé číslo [s]	"true" nebo "false"	edge 0..n
signalplan	název	jednotlivé fáze					
	text	phase 1..n					
rule	název	přihlašovací bod	odhlašovací bod	dotčený signální plán	dotčená fáze	akce	linky
	text	edge	edge	signalplan	phase	"s" nebo "l"	line 1..n
var	název	hodnota					
	název proměnné	podle proměnné					

Zdroj: autor

Následuje popis jednotlivých objektů, které je možné v konfiguračním souboru definovat:

- **Hrana:** Hrana reprezentuje úsek koleje pojižděné jedním směrem. Má danou délku, maximální povolenou rychlost a maximální počet tramvají, které ji mohou pojiždět v jednom okamžiku.
- **Konfliktní bod:** Za konfliktní bod je vhodné označit křížící se hrany. Simulace zajistí, že z množiny hran tvořící konfliktní bod může být obsazena vždy pouze jediná. Pořadí uvedených hran zároveň určuje přednost v jízdě. Vozidla jedoucí po hraně uvedené ve výčtu hran jako druhé či vyšší před místem zastaví. Pokud je na trati sbíhání kolejí za křižovatkou, nastavení sbíhajících se hran jako konfliktní bod způsobí to, že vozidla nebudou najíždět do křižovatky, pokud ji nemohou opustit.

- **Linka:** Objekt linky definuje především (jednosměrnou) cestu, která je pojížděna vozidly. Výčtem hran je tak zároveň definováno, jaké hrany spolu sousedí. Vozidla se na lince objevují v zadaném intervalu a začnou se objevovat po uplynutí počátečního odsazení. Každému vozidlu k cestě definované linkou přidána i soukromá počáteční a koncová hrana, aby byl správně simulován průjezd celou tratí definovanou uživatelem.
- **Zastávka:** Vozidlo v zastávce zastavuje čelem u označníku (na konci zastávkové hrany). Pokud zastaví v prostoru zastávky z jiného důvodu a je celou délkou v zastávkové hraně, odbaví rovnou. Pokud by uživatel chtěl nastavit, že zastávka je pouze pro 1 nebo 2 soupravy, je tak možno učinit nastavením kapacity zastávkové hrany. To zároveň způsobí, že další vozidla zůstanou stát před zastávkou (to je vhodné i ve skutečném provozu, aby nebyli cestující zmateni, že tramvaj sice stojí v zastávce, ale neodbavuje).
- **Signální plán:** Objekt signálního plánu reprezentuje řízenou křižovatku, případně několik svázaných řízených křižovatek. Signální plán neustále střídá fáze v pořadí, v jakém jsou definovány, a stanovuje jim délku podle výchozího nastavení a podle přijatých preferenčních požadavků. Každá hrana definovaná ve fázi by vždy měla být součástí pouze jednoho signálního plánu.
- **Fáze:** Objektu fáze lze nastavit výchozí délku a délky, na které může být nejvýše fáze prodloužena či zkrácena. Na začátku trvání fáze dostanou všechny uvedené hrany zelenou, po uplynutí doby trvání červenou a před začátkem další fáze proběhne vyklízeční doba, kdy zelenou nemá nikdo. Žlutý signál není simulován vzhledem k tomu, že se jedná výhradně o tramvajový provoz. Příznak "chráněné levé odbočení" vypíná automatické zastavování a dávání přednosti před konfliktním bodem, reprezentuje rozdíl mezi plným signálem a signálem se směrovou šipkou.

- **Pravidlo:** Když tramvaj dané linky vjede do hrany deklarované jako přihlašovací bod, odešle tím požadavek příslušnému signálnímu plánu na zkrácení/prodloužení dotčené fáze (v konfiguračním souboru příznaky s/l z anglického „shorten“ a „lengthen“). Za odhlašovací bod je vhodné definovat hranu vedoucí skrz křižovatku, aby vozidlo svůj požadavek odhlásilo, jakmile projede stop čarou. Fáze může být prodloužena či zkrácena nejvýše na dobu uvedenou jako minimální a maximální trvání. Pokud signálnímu plánu přijde více různých požadavků, bude proveden efekt, který je vyžadován vícekrát. V případě stejného množství požadavků na prodloužení i zkrácení bude mít fáze výchozí délku.
- **Proměnná prostředí:** Nastavuje hodnoty proměnných týkající se celého chodu simulace. Pokud hodnota proměnné nastavena není, použije se výchozí hodnota. V následující tabulce (Tabulka 2) je uvedeno, jaké proměnné mohou být nastaveny a jaký je jejich význam.

Tabulka 2 Nastavitelné proměnné prostředí

název proměnné	význam proměnné	datový typ a jednotka	výchozí hodnota
fps	obnovovací frekvence	celé číslo [Hz]	60
duration	doba trvání simulace	celé číslo [s]	300
logfrequency	četnost záznamů	celé číslo [fps/log]	60
acceleration	zrychlení vozidel	desetinné číslo [m/s ²]	1,5
delay	průměrné zpoždění	celé číslo [s]	20
boardmin	min. doba odbavování	celé číslo [s]	15
boardmax	max. doba odbavování	celé číslo [s]	20

Zdroj: autor

Ve výchozím nastavení trvá simulace 5 minut. Hlavní rutina programu bude vzhledem k nastavení obnovovací frekvence (60 obnovení za sekundu) vykonána právě 18000krát. Každou šedesátou iteraci hlavní rutiny bude proveden záznam stavu do výstupní sestavy, tedy bude stav zaznamenán právě jednou pro každou sekundu simulace. Podle výchozího nastavení vozidla pojedou se zrychlením $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, budou se objevovat s náhodným zpožděním (průměrně 20 s) a v zastávkách budou odbavovat po dobu mezi 15 a 20 sekundami vybranou generátorem pseudonáhodných čísel.

3.4 Užití aplikace

Ovládání aplikace je minimalistické. Uživatel si před spuštěním programu připraví konfigurační soubor ve formátu TXT. Po spuštění programu je uživatel dotázán na tento soubor. Po nahrání souboru se program pokusí přečíst jeho data. To může skončit výjimkou, o které je uživatel informován vyskakovacím oknem. V okně je uveden typ chyby a řádek, na kterém k ní došlo. Pokud čtení konfiguračního souboru skončí výjimkou, aplikace se ukončí a je nutno chybu opravit a následně spustit program znovu. Pokud čtení dat proběhne úspěšně, je o tom uživatel informován oknem, po jehož potvrzení se spustí samotná simulace.

Tabulka 3 uvádí výjimky, které aplikace může zachytit při čtení souboru. Ošetřeny jsou převážně výjimky, které brání aplikaci v přečtení souboru, a tedy v dalším chodu. Aplikace nekontroluje duplicitní názvy objektů, či jestli jsou číselné hodnoty zadávány kladné a logicky konzistentní (například zda v deklaraci fáze není minimální délka fáze větší než maximální). Tuto kontrolu musí zajistit sám uživatel. Vzhledem k tomu, že se od uživatelů očekává, že jsou s touto skutečností seznámeni a že aplikaci hodlají použít pouze k účelu, ke kterému byla napsána, považuje autor toto řešení za dostatečné.

Tabulka 3 Možné chyby zachycené v aplikaci

Text chyby	Popis chyby
Invalid number of properties	Deklarace tohoto typu objektu vyžaduje jiný počet atributů
Unknown identifier	Neznámé klíčové slovo na začátku řádku
Unknown property data type	Hodnotu atributu nelze převést na celé/desetinné číslo
Unknown property value	Hodnota atributu není v rozsahu možných hodnot
Object referenced by name is not defined	Hodnota atributu odkazuje na objekt, který nebyl definován

Zdroj: autor

Doba běhu samotné simulace se odvíjí od výkonu počítače a měla by trvat při běžném nastavení maximálně několik sekund. Po jejím doběhnutí je uživatel dotázán na umístění a název souboru výchozí sestavy. Je vždy doporučeno uvést nový název (jinak bude přepsán existující soubor) a příponu „.txt“.

Výsledný soubor obsahuje dvě sady dat. Obě sady jsou formátované jako CSV (hodnoty oddělené čárkou). První sestava obsahuje souhrnný přehled časových údajů o vozidlech, které projely celým vymodelovaným úsekem. Druhá sestava obsahuje detailní přehled o stavu všech vozidel a řízených křižovatek v průběhu simulace. Četnost těchto záznamů je dána hodnotou proměnné „logfrequency“. Tabulka 4 obsahuje všechny sloupce obou výsledkových sestav a jejich popis.

Tabulka 4 Popis sloupců výsledkových sestav

Souhrnný přehled	
VEHICLE_ID	Unikátní identifikátor vozidla přidělený při objevení vozidla
LINE	Název linky, po které vozidlo jede
SPAWN_TIMESTAMP	Čas objevení vozidla
FINISH_TIMESTAMP	Čas, ve kterém konec vozidla opustil poslední hranu
DRIVING_TIME	Celková doba od objevení vozidla po opuštění poslední hrany
WAITING_TIME	Celková doba, během které vozidlo stálo a neodbavovalo
BOARDING_TIME	Celková doba, během které vozidlo odbavovalo všechny zastávky na trase
Detailní přehled	
TIMESTAMP	Čas záznamu (počet minut a sekund uběhlých od začátku simulace)
OBJECT_TYPE	Typ zaznamenaného objektu (vozidlo či signální plán)
OBJECT_ID	Název signálního plánu či identifikátor přidělený vozidlu
STATE(EDGE PHASE)	Hrana, na které se v čase záznamu nacházelo čelo vozidla, či aktuální fáze signálního plánu v čase záznamu
PROGRESS(M S)	Kolik metrů hrany čelo vozidla ujelo, či kolik sekund uplynulo od začátku fáze
OUT_OF(M S)	Délka hrany, ve které se nachází čelo vozidla, či výchozí délka právě probíhající fáze
ADDITIONAL_INFO(CLEARING FINISHED BOARDING)	Další informace o stavu vozidla či signálního plánu (probíhá vyklízeací fáze, vozidlo dojelo, vozidlo odbavuje)

Zdroj: autor

Vhodný způsob analýzy výsledkových sestav je jejich rozdělení do dvou samostatných souborů tak, aby každý soubor obsahoval pouze záhlaví a příslušná data oddělená čárkami. Takový soubor je možné importovat do aplikace Microsoft Excel jako tabulku. Ze souhrnného přehledu je možné pomocí filtrování a funkcí Excelu zjistit například průměrné doby jízdy napříč linkami. Z detailního přehledu je možné pomocí filtrování například vidět pohyb konkrétního vozidla, chování konkrétního signálního plánu, či obsazení konkrétní hrany. Obrázek 8 ukazuje výstřižek z aplikace Microsoft Excel při práci s detailním přehledem. Nad přehledem je použit filtr na sloupci s časem záznamu, konkrétně jsou zobrazeny všechny objekty přítomny v simulaci v čase 4:12 a jejich stav.

TIMESTAMP	OBJECT_TYPE	OBJECT_ID	LINE(VEHICLES ONLY)	STATE(EDGE PHASE)	PROGRESS(M S)	OUT_OF(M S)	SPEED(VEHICLES ONLY)	ADDITIONAL
4:12	Intersection	koliště		kol2	16	30		
4:12	Intersection	osmec		osmec4	39	40		
4:12	Intersection	jug		jug1	2	40		
4:12	Vehicle	3	5ZC	dětskáZC	30	30		0 BOARDING
4:12	Vehicle	4	3DC	dětskádolůDC	245	280		50
4:12	Vehicle	5	2DC	dětskánahoruDC	31	190		16
4:12	Vehicle	6	2ZC	miladaosmZC	116	250		50
4:12	Vehicle	7	9ZC	miladaosmZC	39	250		35

Obrázek 8 Výstřížek z aplikace Microsoft Excel při práci s detailním přehledem

Zdroj: autor

3.5 Technická omezení aplikace

Některé aspekty skutečného provozu tramvají simulace zjednodušuje či úplně ignoruje. Tato zjednodušení nicméně nemají zásadní vliv na validitu výsledků. Všechna tato zjednodušení je možné implementovat korektně, nicméně taková implementace je mimo rámec řešené úlohy.

Reakční doba řidiče tramvaje a náběh motorů jsou zcela zanedbány. Agent tramvaje reaguje na změny v prostředí hned v následující iteraci hlavní rutiny (tedy v základním nastavení proměnné „fps“ na hodnotu 60 bude reagovat 1/60 sekundy po poslední změně v prostředí). Toto omezení lze obejít, pokud by bylo nastaveno v konfiguraci, že jedna rutina reprezentuje například jen 1/2 sekundy, nicméně vedlejším efektem by byl neplynulý průběh simulace.

Agent tramvaje se snaží jet vždy co nejrychleji. Tedy pokud se dostane do úseku, kde může v úseku tratě dlouhém 5 m jet vyšší rychlostí, bude zrychlovat a brzdit. Taková technika jízdy je nevhodná a nepohodlná pro cestující, a řidič by v takovém úseku měl udržovat rychlost stálou. Kontrola, zda je trať volná, probíhá vždy jen na zábrzdnu vzdálenost. Tento fakt také vede k nevhodné jízdě, poněvadž překážka či důvod k zastavení se může nacházet například jen 1 m za zábrzdnu vzdáleností, přesto agent tramvaje využije možnost zrychlovat, dokud překážka nebude ležet blíže než zábrzdna vzdálenost.

Zastavování před překážkou či na konkrétním místě musí být v simulaci upraveno oproti skutečnému provozu. Pokud je překážka či důvod zastavit dále než zábrzdná vzdálenost, agent ji nevnímá. Pokud je blíže, tramvaj již z definice zábrzdne vzdálenosti nestihne zastavit. Šance, že v konkrétním stavu bude překážka právě v zábrzdne vzdálenosti, se blíží nule. Proto fyzika simulace vozidlo zastaví a „přichytí“ na místo, kvůli kterému brzdí (většinou konec hrany), pokud by mělo zastavit těsně za tímto místem. Toto zjednodušení může být interpretováno také jako prudší dobrzdění pomocí kolejnicových brzd, které řidiči ve skutečnosti používají, když nesprávně odhadnou brzdnu dráhu.

Dalším zjednodušením je dávání přednosti v jízdě v křížících se hranách (konfliktní body musí uživatel explicitně definovat v konfiguraci). Definice dání přednosti je nepokračovat v jízdě, pokud by vozidlo mající přednost v jízdě muselo náhle změnit směr nebo rychlost jízdy. (14) Agent tramvaje ovšem vnímá pouze trať před sebou, nevnímá ostatní tratě a zábrzdne vzdálenosti vozidel na nich. Ty jsou ale jsou potřebné pro rozhodnutí, zda pokračovat v jízdě.

Agent tramvaje nemající přednost v jízdě tedy vždy před křížícími se hranami zastaví, a pokračuje dál, pokud konfliktní hrana není obsazena jiným vozidlem. Toto chování je na světelných křižovatkách možné vypnout specifikováním, že jde o fázi s chráněným levým odbočením (tedy bez dávání přednosti protijedoucím). Pokud by tramvaj měla najet do obsazeného křížení, bude fyzikou simulace zastavena nezávisle na její rychlosti. Pokud budou před křížícími se hranami stát vozidlo mající přednost a vozidlo nemající přednost, pojedou vozidlo, které je v simulaci déle (reprezentuje častý jev, při kterém se řidiči tramvají ze zdvořilosti dobrovolně vzdávají přednosti v jízdě ve prospěch kolegy).

Posledním zjednodušením je chování vyklízečích dob. Vyklízečí doba v programu je vždy období běžící po každé fázi, ve kterém mají všechny hrany křižovatky červenou/stůj. Simulace zanedbává fakt, že vyklízečí doba po dané fázi může být zkrácena podle toho, jaká fáze následuje. Tato podstata vyklízečí doby způsobuje také to, že i když má hrana zelenou ve dvou následujících fázích po sobě, bude tato zelená přerušena vyklízečí dobou. Toto chování je možné obejít použitím nulové vyklízečí doby a přidáním samostatné fáze, která vyklízečí dobu nahradí.

3.6 Testování validity simulace

Pro ověření validity výsledků poskytovaných aplikací byly sestaveny dva testovací scénáře. V každém z nich je testován význam jednoho preferenčního opatření na skutečných křižovatkách řízených světelnou signalizací v Brně. Simulované úseky tratě jsou vymodelované ve skutečné velikosti, (11) linkové vedení a nasazované typy vozů odpovídají skutečnému provozu v běžném neprázdninovém pracovním dni a signální plány jsou vymodelovány na základě autorova pozorování chování světelné signalizace na modelovaném místě.

3.6.1 Testovací scénář „Milada“

První testovací scénář se zabývá porovnáním propustnosti křižovatky Milady Horákové X Drobného X Příkop v případě, že řadič přijímá preferenční požadavky s případem, kdy je nepřijímá. Vymodelován byl celý úsek tratě mezi zastávkami Jugoslávská a Moravské náměstí. V přepravní špičce pracovního dne trvá projetí tohoto úseku 5 minut. Modelována je situace, kdy úsekem projíždí nejen linky 3, 5 a 9 jako za běžného provozu, nýbrž i linky 2, 4, a 7 odkloněné z paralelní trati na ulici Cejl. Tedy místo 36 spojů za hodinu projede úsekem v každém směru 66 spojů. (10) V příloze (PŘÍLOHA B) je konfigurace problému. Preferenční pravidla pro řešenou křižovátku (v konfiguraci signální plán s názvem „osmec“) jsou v příložené konfiguraci zakomentována.

V následujících tabulkách (Tabulka 5, Tabulka 6) jsou části výsledkových sad dat simulace v případě funkčních preferenčních opatření a v případě poruchy. V každé tabulce je vidět 20 posledních tramvají, které projely celým úsekem ZC.

Tabulka 5 Výňatek z hlavního souhrnu scénáře „Milada“ s funkční vloženou fází

VEHICLE_ID	LINE	SPAWN_TIMESTAMP	FINISH_TIMESTAMP	DRIVING_TIME	WAITING_TIME	BOARDING_TIME
77	5ZC	36:05	40:42	4:36	1:05	1:03
78	9ZC	36:16	41:17	5:00	1:19	1:04
80	2ZC	37:11	42:20	5:09	1:08	1:14
82	7ZC	37:23	42:49	5:26	1:32	1:13
84	4ZC	39:06	43:44	4:38	0:55	1:08
85	9ZC	39:34	44:14	4:40	0:53	1:09
88	5ZC	41:14	44:59	3:45	0:11	1:05
91	3ZC	41:38	46:03	4:24	0:30	1:14
93	2ZC	44:42	48:33	3:51	0:20	1:00
98	9ZC	46:07	50:02	3:55	0:26	1:05
99	5ZC	46:17	51:02	4:45	1:05	1:03
100	3ZC	46:26	51:28	5:02	1:24	0:54
102	7ZC	47:24	52:02	4:37	1:01	0:56
103	2ZC	48:11	52:59	4:47	1:04	1:00
104	4ZC	48:39	53:47	5:07	1:04	1:12
105	4ZC	49:13	54:22	5:08	1:09	1:08
113	9ZC	52:50	57:07	4:16	0:50	0:58
114	2ZC	52:55	58:05	5:09	1:22	1:01
115	5ZC	53:12	59:18	6:05	2:01	0:58
117	9ZC	53:22	58:34	5:12	1:21	1:04

Zdroj: autor

Celkové doby průjezdu vozidel v tabulce 5 odpovídají skutečné jízdě (5 min), a ani po hodině simulování nedochází k výraznému nárůstu doby průjezdu. Porucha přijímače preferenčních požadavků skutečně snižuje propustnost křižovatky pro tramvaje jedoucí ve směru z centra. z tabulky 6 je patrné, že tramvajím jedoucím z centra postupem času narůstají doby průjezdu a zpoždění oproti skutečné jízdě dosahuje po hodině simulace 14 minut. To je způsobeno tím, že kvůli kombinaci délky fáze volna pro tramvaje a umístění nástupního ostrůvku pro jednu soupravu před křižovatkou stihne v každém cyklu projet pouze jedna tramvaj. V opačném směru se nástupní ostrůvek nachází až za křižovatkou, a tedy k výraznému zpoždění nedochází.

Tabulka 6 Výňatek z hlavního souhrnu scénáře „Milada“ bez preferenčních opatření

VEHICLE_ID	LINE	SPAWN_TIMESTAMP	FINISH_TIMESTAMP	DRIVING_TIME	WAITING_TIME	BOARDING_TIME
48	3ZC	22:57	36:18	13:20	8:07	1:09
50	4ZC	24:10	37:24	13:14	8:30	0:51
51	9ZC	24:24	38:45	14:20	9:21	0:58
55	3ZC	26:21	40:38	14:17	8:50	1:26
56	5ZC	26:22	41:49	15:26	10:01	1:17
59	7ZC	27:20	42:27	15:06	9:48	1:11
61	2ZC	28:04	43:20	15:16	9:50	1:18
62	4ZC	29:16	44:29	15:12	10:05	0:54
67	3ZC	32:03	46:01	13:58	9:01	0:59
68	2ZC	32:14	47:29	15:14	10:01	1:02
70	9ZC	32:38	48:47	16:09	10:40	1:19
71	5ZC	32:42	50:34	17:51	12:19	1:02
73	9ZC	33:08	51:22	18:13	12:44	1:00
75	4ZC	35:02	52:48	17:46	12:16	0:55
79	7ZC	37:16	53:13	15:57	10:30	1:01
80	2ZC	37:58	54:26	16:27	10:50	1:06
83	3ZC	39:03	55:46	16:43	11:19	0:57
84	9ZC	39:24	57:04	17:39	12:06	1:00
85	4ZC	39:30	58:30	18:59	12:52	1:06
86	5ZC	39:41	58:59	19:17	13:01	1:11

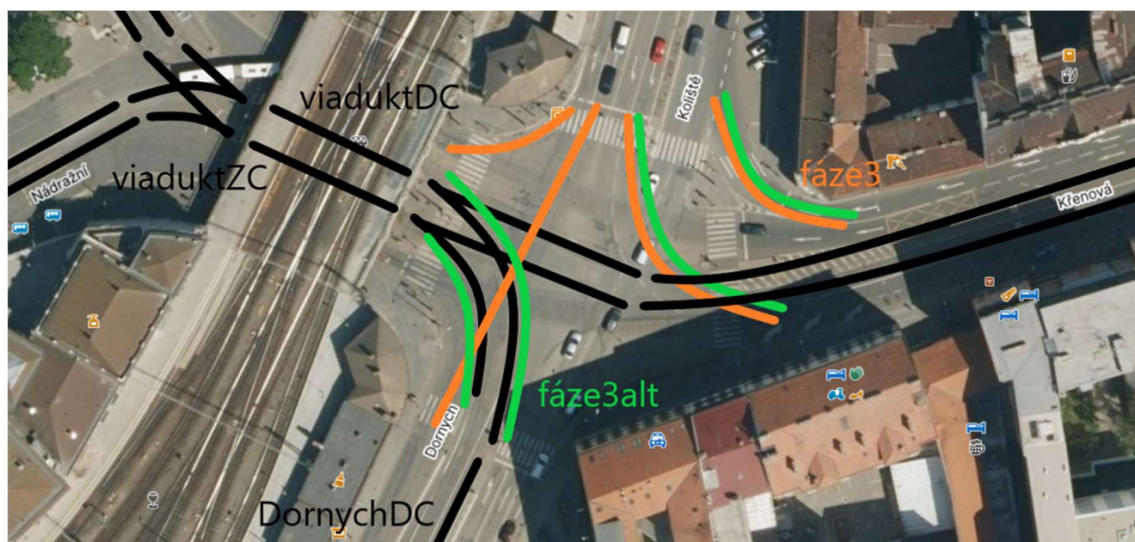
Zdroj: autor

Testovací scénář ukazuje, že implementace vložené fáze na křižovatce se zastávkou před hranicí křižovatky nejen zkracuje čekací doby tramvají, nýbrž i zásadně zvyšuje propustnost křižovatky pro tramvaje (v tomto případě se propustnost zdvojnásobuje). Tento jev může být očekáván na všech zastávkách pro jednu soupravu před hranicí řízené křižovatky. Zdvojnásobení propustnosti křižovatky lze docílit i prodloužením nástupního ostrůvku zastávky. Pokud by ostrůvek byl dostatečně dlouhý, aby na zastávce mohly odbavovat 2 soupravy tramvají současně, dá se očekávat, že by během základní fáze projely najednou.

3.6.2 Testovací scénář „Viadukt“

Druhý testovací scénář se zabývá křižovatkou Koliště X Křenová v blízkosti hlavního nádraží v Brně. Křižovatkou ve špičce pracovního dne projíždí v každém směru 30 tramvají za hodinu po Křenové a 12 tramvají za hodinu po ulici Dornych. (10) Tato křižovatka byla kvůli své relativní komplexitě vybrána pro demonstraci splnění požadavků na simulační program. V příloze (PŘÍLOHA A) je konfigurace tohoto testovacího scénáře. Pořadí fází v konfiguraci je shodné se skutečným signálním plánem na této křižovatce. Přesná délka jednotlivých fází není autorovi známa, byla tedy odhadnuta na základě pozorování křižovatky.

Na diagramu (Obrázek 9) je znázorněna řešená křižovatka, černě jsou vyznačeny vymodelované hrany, oranžově signální skupiny, které mají volno během fáze označené jako „fáze3“ a zeleně signální skupiny, které mají volno během fáze „fáze3alt“.



Obrázek 9 Diagram řešených hran a fází na křižovatce Koliště X Křenová

Zdroj: autor pomocí (11)

Testovací scénář opět porovnává 2 signální plány. V prvním může být fáze pojmenovaná „fáze3“ nahrazena fází „fáze3alt“, v druhém toto nahrazení neprobíhá. k tomuto nahrazení dojde tehdy, pokud tramvaj jedoucí na Dornych vjede do hrany označené jako „viaduktZC“, případně pokud tramvaj jedoucí z Dornychu vjede do hrany „DornychDC“.

Účelem tohoto preferenčního opatření je především zkrátit čekací doby tramvají jedoucí od nádraží na Křenovou. V základním signálním plánu je totiž fáze pro tramvaje jedoucí ve směru Nádražní-Dornych zařazena hned po fázi pro tramvaje jedoucí ve směru Nádražní-Křenová. Pokud tedy ve směru z ulice Nádražní čeká na volno nejprve tramvaj jedoucí na Dornych a za ní tramvaj jedoucí na Křenovou, bude tato tramvaj čekat před křižovatkou minimálně dobu jednoho celého cyklu. Fáze „fáze3“, případně „fáze3alt“ je zařazena v signálním plánu právě před fází pro směr z Nádražní na Křenovou. Tedy pokud v hraně „viaduktZC“ čeká tramvaj jedoucí na Dornych a za ní tramvaj jedoucí na Křenovou, výměna „fáze3“ za „fáze3alt“ způsobí vyklizení hrany „viaduktZC“ ještě před fází pro tramvaje na Křenovou, což zkrátí dobu čekání tramvaje jedoucí na Křenovou o délku celého jednoho cyklu.

Simulována byla hodina provozu a proměnná „delay“ byla zvýšena na hodnotu 90 s, aby bylo zajištěno, že tramvaje budou do hrany „viaduktZC“ přijíždět v náhodném pořadí (vlivem počátečního odsazení při umisťování tramvají na trať by se totiž mohlo stát, že by nikdy nenastala výše zmíněná situace, kdy těsně za tramvají na Dornych jede tramvaj na Křenovou).

Tabulka 7 ukazuje doby čekání pro linky jedoucí na Křenovou (tedy 8ZC, 9ZC a 10ZC) a z Křenové (8DC, 9DC, 10DC) v závislosti na tom, zda bylo zapnuto preferenční pravidlo nahrazující fázi „fáze3“ za „fáze3alt“. Průměrná doba čekání byla vypočtena jako aritmetický průměr hodnoty sloupce „WAITING_TIME“ z hlavního souhrnu u všech vozidel linek uvedených ve vedlejším sloupci.

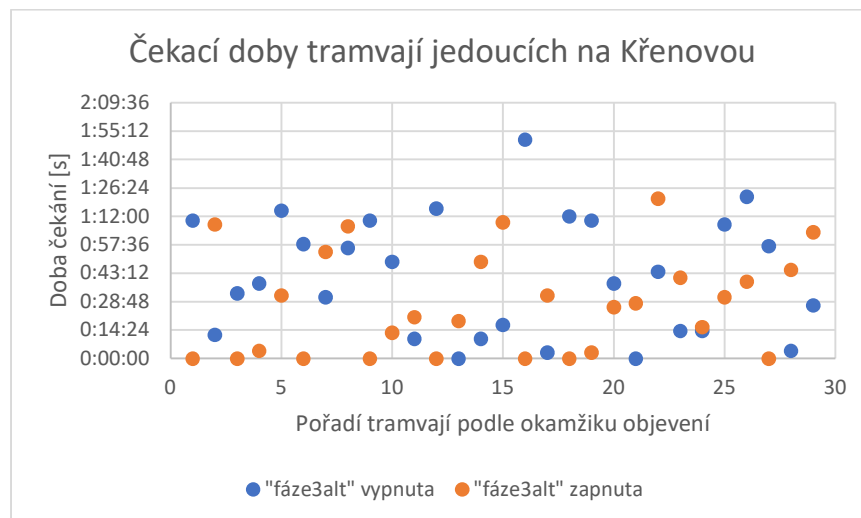
Tabulka 7 Data z testovacího scénáře „Viadukt“

Opatření „fáze3alt“	Linky	Průměrná doba čekání
zapnuto	8ZC, 9ZC, 10ZC	0:27:39
zapnuto	8DC, 9DC, 10DC	0:32:14
vypnuto	8ZC, 9ZC, 10ZC	0:41:41
vypnuto	8DC, 9DC, 10DC	0:27:39

Zdroj: autor

Z tabulky je patrné, že zavedení fáze „fáze3alt“ snižuje dobu čekání pro tyto linky ve směru ZC průměrně o 14 sekund. Tento výsledek je v souladu s očekáváním. Je očekáváno, že s funkčním opatřením s fází „fáze3alt“ budou tramvaje jedoucí na Křenovou čekat maximálně 79 sekund (tj. délka všech vyklízecích dob a délka všech fází krom fáze, kdy mají tramvaje jedoucí na Křenovou volno). Graf (Obrázek 10) vizualizuje doby čekání jednotlivých tramvají linek jedoucí na Křenovou. z grafu vyplývá, že výše zmíněný negativní jev nastal právě jednou u v pořadí 16. tramvaje, poněvadž pouze tato tramvaj čekala výrazně déle než 79 sekund.

Testovací scénář také ukazuje, že zavedení fáze „fáze3alt“ má i negativní efekt. Negativním vedlejším efektem tohoto opatření je zvýšená doba čekání pro stejné linky jedoucí směrem do centra průměrně o 5 sekund. To je dáno tím, že do hrany „viaduktDC“ může kvůli výhybkovému kontaktoru vždy najet pouze 1 tramvaj, a tedy když ve fázi „fáze3alt“ najede do této hrany tramvaj z Dornychu, musí tramvaje z Křenové čekat, až se hrana uvolní.



Obrázek 10 Graf čekacích dob tramvají podle funkčnosti opatření „fáze3alt“

Zdroj: autor

3.6.3 Shrnutí výsledků testování

Testovací scénáře prokázaly, že simulovaný provoz tramvají odpovídá skutečnosti. Doba jízdy tramvají se shoduje se skutečnými jízdami řády, a preferenční opatření mají předpokládaný efekt. Nejenom, že výsledkové sady dat odpovídají očekávání, dokonce je z nich možno vyvozovat nové souvislosti, jako například negativní efekt nahrazení fáze ve scénáři „Viadukt“.

3.7 Návrhy na další vývoj aplikace

Pro zjednodušení vývoje byly abstrahovány některé vztahy mezi objekty a jsou nastavitelné pouze globálně. Například nastavení délky vozidel pro celou linku najednou neumožňuje simulovat provoz různě dlouhých vozidel na jedné lince. Zároveň tak nejde simulovat zákaz míjení platící jen pro určité typy vozidel – nastavení konfliktního bodu platí pro všechna vozidla. Pokud by typ vozidla byl samostatně nastavitelný objekt, bylo by možné nastavit akceleraci pro každý typ zvlášť a nikoliv globálně.

Výrazným zjednodušením užívání aplikace by byla možnost definovat objekty a modelovat kolejovou síť pomocí grafického rozhraní namísto psaní konfiguračního souboru. s tím souvisí i vykreslování průběhu simulace v reálném čase na stejném podkladu, na kterém byla síť nakonfigurována. Tato vylepšení by výrazně přispěla k přiblížení aplikace uživateli.

Dalším možným rozšířením aplikace je přidání dalších preferenčních pravidel jako prohození pořadí fází či vyměnění jedné fáze za jinou. Druhého efektu je možné v současnosti docílit tím způsobem, jakým byla nastavena dvojice fází fáze3 a fáze3Alt a sada pravidel v testovacím scénáři „Viadukt“. Preferenční pravidla by také mohla být citlivá na zpoždění konkrétní tramvaje, která ho vyvolává. Pokud by byl do simulace zakomponován provoz IAD a s ním spojená pravidla pro dynamické řízení křižovatek, bylo by nutné požadavky na preferenci opatřit prioritou, aby například 2 vozidla IAD „nevyhrála“ nad 1 tramvají s protichůdným požadavkem.

3.8 Hodnocení aplikace

Vyvinutá aplikace poskytuje uživateli širokou škálu možností konfigurace, aby bylo možné při správné konfiguraci simulovat prakticky jakoukoliv situaci v tramvajovém provozu v poměrech ČR. To je dáno i tím, že některé možnosti konfigurace mohou sloužit různým účelům – například hrana s kapacitou 1 může reprezentovat jednak úsek trati zabezpečené na principu autobloku, jednak úsek od výhybkového kontaktoru po prostor výhybky, do kterého například v Brně smí tramvaj najet až po jeho uvolnění předchozí tramvají.

Na testovacích scénářích bylo demonstrováno, že data poskytovaná aplikací odpovídají očekávání i zkušenostem ze skutečného provozu. Výsledná aplikace vyhovuje požadavkům definovaným v úvodu praktické části práce a je vhodná k užití při skutečném navrhování signálních plánů.

ZÁVĚR

Z rešerše problematiky preferencí tramvají na křižovatkách řízených SZZ a z analýzy problematiky preferencí se zastávkou před hranicí křižovatky vyplynuly požadavky a nároky na simulační model. Jde například o požadavek implementovat realistické odbavování zastávek či možnost modelovat topologicky složité křižovatky a signální plány.

Vyvinutá aplikace dokáže simulovat provoz tramvají na úseku jakékoliv tramvajové sítě s jakoukoliv intenzitou tramvajového provozu a s dynamickým řízením světelných křižovatek. Možnosti modelování preferenčních pravidel nejsou neomezené, nicméně jsou dostačující k modelování naprosté většiny běžných preferenčních opatření (zkrácení/prodloužení fáze, přeskočení fáze, vložení fáze).

Vyvinutá aplikace je výhradním autorským dílem tohoto autora a byla vyvinuta pro účely této práce na základě požadavků plynoucích z teoretické části, čímž byly naplněny předpoklady pro splnění cíle bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

1. DRDLA, Pavel. *Technologie a řízení dopravy – městská hromadná doprava*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. ISBN 80-7194-804-7.
2. *Dopravně inženýrský návrh světelného řízení křižovatek*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1984.
3. WIEDEMANN, Remigiusz. METHOD OF OCCUPANCY-BASED TRAFFIC LIGHT PRIORITY FOR PUBLIC TRANSPORT. Online. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, roč. 115, s. 227-248. ISSN 02093324. Dostupné z: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.16>. [cit. 2024-06-28].
4. He, J., Xu, Y., Li, Y. *et al.* An optimization model of tram timetables considering various signal priority strategies. *Sci Rep* **12**, 16564 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19762-9>
5. MERVART, Michal; RATHOUSKÝ, Bedřich; KOLÁŘ, Petr a NOVÁK, Radek. *City logistika*. Praha: Wolters Kluwer, 2021. ISBN 978-80-7676-212-1.
6. KŘIVDA, Vladislav; OLIVKOVÁ, Ivana a FRIČ, Jindřich. *Dopravní telematika*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0767-x.
7. SERMPIS, Dimitris; PAPADAKOS, Panos a FOUSEKIS, Kostas. Tram priority at signal-controlled junctions. Online. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. 2012, roč. 165, č. 2, s. 87-96. ISSN 0965-092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/tran.2012.165.2.87>. [cit. 2024-06-28].
8. SPRÁVA VEŘEJNÉHO STATKU MĚSTA PLZNĚ. *Technologie SSZ v Plzni - Preference MHD*. Online. 2022. Dostupné z: <https://svsmp.cz/svetelna-signalizace/technologie-ssz-v-plzni-preference-mhd/>. [cit. 2024-06-28].
9. MCGINLEY, F. J. a STOLZ, D. R. The design of tram priority at traffic signals. Online. *Journal of Advanced Transportation*. 1985, roč. 19, č. 2, s. 133-151. ISSN 0197-6729. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/atr.5670190204>. [cit. 2024-06-28].
10. DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA. *Jízdní řády DPMB*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.dpmb.cz/jizdni-rady-zastavek-linek>. [cit. 2024-06-28].
11. SEZNAM.CZ. *Mapy.cz*. Online. 2024. Dostupné z: <https://mapy.cz/>. [cit. 2024-06-28].
12. ORACLE. *Download Java for Windows*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.java.com/download/ie_manual.jsp. [cit. 2024-06-28].
13. NETRVALOVÁ, Arnoštka. *Úvod do problematiky multiagentních systémů* [online]. [Cit. 2010-01-16].

14. Zákon č. 361/2000 Sb. Zákon o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu). In: Zákony pro lidi [online]. AION CS, 2010-2018 [cit. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A.	PŘÍKLAD KONFIGURAČNÍHO SOUBORU S VYSVĚTLUJÍCÍMI KOMENTÁŘI.....	48
PŘÍLOHA B.	KONFIGURACE TESTOVACÍHO SCÉNÁŘE „MILADA“	51

PŘÍLOHA A. PŘÍKLAD KONFIGURAČNÍHO SOUBORU S VYSVĚTLUJÍCÍMI KOMENTÁŘI

```
--TESTOVACÍ SCÉNÁŘ "VIADUKT"

-- hrana: nazev, delka[m], rychlost[km/h], kapacita

edge N1 65 20 2
edge N2 65 20 2
edge N3 65 20 2
edge N4 65 20 2

edge N2dolu 50 15 1
edge N4dolu 50 15 1
edge N1nahoru 40 15 1
edge N3nahoru 40 10 1
edge rampaDolu 70 30 99
edge rampaNahoru 50 30 99
edge vyhybkaNahoru 20 30 1

-- konfliktní bod: nazev, hrany (v pořadí, v jakým si dávají přednost)

conflict c1 N2dolu N3nahoru

edge GV 30 30 1
edge GD 30 30 1
edge viaduktZC 30 30 1
edge viaduktDC 30 30 1
edge viaduktGD 15 15 1
edge viaduktRampa 20 10 1
edge rampaViadukt 15 15 99
edge GVViadukt 30 15 10
conflict c2 viaduktRampa GVViadukt
conflict c3 rampaViadukt GVViadukt

edge KřenováZC 250 50 99
edge KřenováDC 270 50 99
edge DornychDC 130 50 99
edge DornychZC 160 50 99
edge viaduktKřenová 30 15 99
edge viaduktDornych 20 10 99
edge DornychViadukt 55 15 99
edge KřenováViadukt 60 50 99
conflict c4 DornychViadukt viaduktKřenová
conflict c5 DornychViadukt KřenováViadukt

-- linka: název, délka vozidel[m], interval[min], offset po začátku[min],
hrany v pořadí

line 9ZC 30 5 0 N2 N2dolu rampaDolu rampaViadukt viaduktZC viaduktKřenová
KřenováZC
line 9DC 30 5 1 KřenováDC KřenováViadukt viaduktDC viaduktRampa rampaNahoru
vyhybkaNahoru N1nahoru N1
```

```

line 8ZC 30 5 1 N4 N4dolu rampaDolu rampaViadukt viaduktZC viaduktKřenová
KřenováZC
line 8DC 30 5 4 KřenováDC KřenováViadukt viaduktDC viaduktRampa rampaNahoru
vyhybkaNahoru N3nahoru N3
line 12ZC 40 5 3 N4 N4dolu rampaDolu rampaViadukt viaduktZC viaduktDornych
DornychZC
line 12DC 40 5 2 DornychDC DornychViadukt viaduktDC
viaduktRampa rampaNahoru vyhybkaNahoru N3nahoru N3
line 10ZC 20 10 4 GV GVViadukt viaduktZC viaduktKřenová KřenováZC
line 10DC 20 10 2 KřenováDC KřenováViadukt viaduktDC viaduktGD GD

```

```
-- zastávka: hrana, linky, co tam zastavujou
```

```

stop N1 9DC
stop N2 9ZC
stop N3 8DC 12DC
stop N4 8ZC 12ZC
stop GD 10DC
stop GV 10ZC

```

```
-- fáze: jmeno, min[s], default[s], max[s], vyklizeci[s], protected left
turns, hrany
```

```

phase fáze1 10 10 10 0 true DornychViadukt viaduktDornych
phase fáze2 50 60 60 0 true
phase fáze3 0 10 10 3 true
phase fáze3Alt 0 0 10 3 true DornychViadukt viaduktDornych
phase fáze4 15 20 25 6 true KřenováViadukt viaduktKřenová

```

```
-- světelná křižovatka: jméno, fáze v pořadí, jak jdou za sebou
```

```
signalplan plán1 fáze1 fáze2 fáze3 fáze3Alt fáze4
```

```
-- preferenční pravidlo: jmeno, přihlašovací bod, odhlašovací, signální
plán,...
```

```
-- ...fáze, akce s/d/l (shorten, default, lengthen), linky
```

```

rule zkratKoliště1 viaduktZC viaduktKřenová plán1 fáze2 s 8ZC 9ZC 10ZC
rule zkratKoliště2 KřenováDC KřenováViadukt plán1 fáze2 s 8DC 9DC 10DC
rule zkratKoliště3 viaduktZC viaduktDornych plán1 fáze2 s 12ZC
rule zkratKoliště4 DornychDC DornychViadukt plán1 fáze2 s 12DC

```

```

rule zkratKřenovou1 DornychDC DornychViadukt plán1 fáze4 s 12DC
rule zkratKřenovou2 viaduktZC viaduktDornych plán1 fáze4 s 12ZC
rule prodlužKřenovou1 viaduktZC viaduktKřenová plán1 fáze4 l 8ZC 9ZC 10ZC
rule prodlužKřenovou2 KřenováDC KřenováViadukt plán1 fáze4 l 8DC 9DC 10DC

```

```

rule přidejAlt1 DornychDC DornychViadukt plán1 fáze3Alt l 12DC
rule zruš3 DornychDC DornychViadukt plán1 fáze3 s 12DC
rule přidejAlt2 viaduktZC viaduktDornych plán1 fáze3Alt l 12ZC
rule zruš32 DornychDC DornychViadukt plán1 fáze3 s 12ZC

```

```
--proměnné prostředí: název proměnné, hodnota
```

```
--"jemnost simulace", kolikrat za sekundu se obnovi stav
var fps 60
-- trvani simulace v sekundach
var duration 3600
-- zrychleni vozidel v m/s^2
var acceleration 1.5
-- prumerne zpoždění při spawnu v sekundach (přidává variabilitu)
var delay 90
-- min a max doba odbavovani v zastavkach (globalne) v sekundach
var boardmin 30
var boardmax 50
-- jak casto se ma delat prubezny log v jednotce snimku (ob kolik snimku),
ted co 5 sekund
var logfrequency 300
```

PŘÍLOHA B. KONFIGURACE TESTOVACÍHO SCÉNÁŘE „MILADA“

edge morkolZC 40 30 99
edge kolištěZC 30 30 99
edge miladaosmZC 250 50 99
edge osmecZC 50 50 99
edge drobnéhoZC 40 50 99
edge dětskánahoruZC 330 50 99
edge dětskáZC 30 50 99
edge dětskádolůZC 180 50 99
edge dětskádolůZCkontaktor 200 50 99

edge jugZCdoleva10 25 10 1
edge jugZCdoleva15 30 15 99
edge jugZCrovně 65 15 1
edge jugZCdoprava10 25 10 1
edge jugZCdoprava15 30 15 99
edge jug9ZCnahoru 80 50 99
edge jug5ZC 55 50 99
edge jug3ZC 60 50 99
edge jug9ZC 30 50 99

line 3ZC 30 5 0 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCdoprava10
jugZCdoprava15 jug3ZC

line 5ZC 22 5 1 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCrovně
jug5ZC

line 9ZC 30 5 3 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCdoleva15
jug9ZCnahoru jug9ZC

line 2ZC 30 5 2 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCdoprava10
jugZCdoprava15 jug3ZC

line 4ZC 22 5 4 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCdoprava10
jugZCdoprava15 jug3ZC

line 7ZC 22 10 7 morkolZC kolištěZC miladaosmZC osmecZC drobnéhoZC
dětskánahoruZC dětskáZC dětskádolůZC dětskádolůZCkontaktor jugZCdoleva15
jug9ZCnahoru jug9ZC

stop osmecZC 3ZC 5ZC 9ZC 2ZC 4ZC 7ZC
stop dětskáZC 3ZC 5ZC 9ZC 2ZC 4ZC 7ZC
stop jug3ZC 3ZC 2ZC 4ZC
stop jug5ZC 5ZC
stop jug9ZC 9ZC 7ZC

edge jug3DC10 20 10 1
edge jug3DC15 30 15 99
edge jug9DCkříž 15 50 1
edge jug9DC10 10 10 1
edge jug9DC15 15 15 99

```

edge jug5DC 55 15 1

conflict c1 jug5DC jugZCdoleva10
conflict c2 jug5ZC jug3DC15
conflict c3 jugZCdoleva10 jug3DC15

edge morDC 50 30 99
edge morkolDC 50 30 99
edge kolištěDC 25 30 99
edge miladaosmesíčkoDC 110 50 99
edge miladaosmDC 125 50 99
edge osmecDC 60 50 99
edge drobnéhoDC 45 50 99
edge traubovaDC 110 50 99
edge dětskádolůDC 280 50 99
edge dětskáDC 45 40 99
edge dětskánahoru40DC 120 40 99
edge dětskánahoruDC 190 50 99

line 3DC 30 5 1 jug3DC10 jug3DC15 dětskánahoruDC dětskánahoru40DC dětskáDC
dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC miladaosmDC miladaosmesíčkoDC
kolištěDC morkolDC morDC
line 5DC 22 5 4 jug5DC dětskánahoruDC dětskánahoru40DC dětskáDC
dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC miladaosmDC miladaosmesíčkoDC
kolištěDC morkolDC morDC
line 9DC 30 5 3 jug9DCkříž jug9DC10 jug9DC15 dětskánahoruDC
dětskánahoru40DC dětskáDC dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC
miladaosmDC miladaosmesíčkoDC kolištěDC morkolDC morDC
line 2DC 30 5 2 jug3DC10 jug3DC15 dětskánahoruDC dětskánahoru40DC dětskáDC
dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC miladaosmDC miladaosmesíčkoDC
kolištěDC morkolDC morDC
line 4DC 22 5 4 jug3DC10 jug3DC15 dětskánahoruDC dětskánahoru40DC dětskáDC
dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC miladaosmDC miladaosmesíčkoDC
kolištěDC morkolDC morDC
line 7DC 22 10 0 jug9DCkříž jug9DC10 jug9DC15 dětskánahoruDC
dětskánahoru40DC dětskáDC dětskádolůDC traubovaDC drobnéhoDC osmecDC
miladaosmDC miladaosmesíčkoDC kolištěDC morkolDC morDC

stop dětskáDC 3DC 5DC 9DC 2DC 4DC 7DC
stop osmecDC 3DC 5DC 9DC 2DC 4DC 7DC
stop morDC 3DC 5DC 9DC 2DC 4DC 7DC

phase jug1 30 40 50 5 false jug5DC jugZCrovně jugZCdoleva10 jugZCdoprava10
phase jug2 10 10 15 3 true jug9DC10
phase jug3 20 20 20 5 true jug3DC10 jugZCdoprava10
signalplan jug jug1 jug2 jug3

phase osmec1 15 15 20 3 true drobnéhoZC drobnéhoDC
phase osmec2 20 20 20 3 true
phase osmec3 0 0 5 3 true drobnéhoZC drobnéhoDC
phase osmec4 30 40 40 3 true
signalplan osmec osmec1 osmec2 osmec3 osmec4

phase kol1 50 50 50 5 true

```

```
phase kol2 30 30 30 5 true kolištěZC kolištěDC
signalplan koliště kol1 kol2
```

```
--rule zkratdrobného osmecZC drobnéhoZC osmec osmec4 s 3ZC 5ZC 9ZC 2ZC 4ZC
7ZC
--rule vložosmec osmecZC drobnéhoZC osmec osmec3 l 3ZC 5ZC 9ZC 2ZC 4ZC 7ZC
--rule prodlužosmec osmecZC drobnéhoZC osmec osmec1 l 3ZC 5ZC 9ZC 2ZC 4ZC
7ZC
--rule zkratdrobného traubovaDC drobnéhoDC osmec osmec4 s 3DC 5DC 9DC 2DC
4DC 7DC
--rule vložosmec traubovaDC drobnéhoDC osmec osmec3 l 3DC 5DC 9DC 2DC 4DC
7DC
--rule prodlužosmec traubovaDC drobnéhoDC osmec osmec1 l 3DC 5DC 9DC 2DC
4DC 7DC
```

```
rule zkratjug5 jug9DCkříž jug9DC10 jug jug1 s 9DC 7DC
rule prodlužjug9 jug9DCkříž jug9DC10 jug jug2 l 9DC 7DC
rule prodlužjug5 dětskádolůZCkontaktor jugZCdoleva10 jug jug1 l 9DC 7DC
rule prodlužjugZC9 dětskádolůZCkontaktor jugZCdoleva10 jug jug1 l 9ZC 7ZC
rule prodlužjugZC5 dětskádolůZCkontaktor jugZCrovně jug jug1 l 5ZC
rule prodlužjugZC3 dětskádolůZCkontaktor jugZCdoprava10 jug jug1 l 3ZC 2ZC
4ZC
```

```
var duration 3600
var logfrequency 120000000
var boardmin 15
var boardmax 30
var delay 90
```