

Simulační studie

Implementace abstraktního modelu autobusové linky

Hromadná osobní přeprava

9. prosince 2023

Martin Pech (xpechm00)
Josef Škorpík (xskorp04)

1 Úvod

Tématem projektu je implementace abstraktního modelu [3, snímek 10] autobusové linky. Projekt vznikl jako zápočtová práce do předmětu Modelování a simulace. Chování modelu bylo demonstrováno a validováno na základě existující Jihomoravské autobusové linky číslo 501. Tento model si klade za cíl najít optimální počet autobusů, které je potřeba rezerovat pro danou linku tak, aby nedocházelo k dlouhému čekání a najít optimální jízdní řád na základě zadaných parametrů o hustotě provozu a struktuře dané autobusové linky. Optimální počet autobusů i jízdní řád je vyhodnocován podle spokojenosti cestujících, která je ovlivněna několika faktory. Jelikož je tento simulační model [3, snímek 44] zacílen pouze na výše uvedené cíle, připouští výskyt pouze takových jevů, které přímo ovlivňují jeho chování. Tyto jevy jsou popsány v kapitole 3.1.

1.1 Autoři a původ faktů

Na implementaci projektu a tvorbě technické zprávy spolupracovali studenti Fakulty informačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Martin Pech a Josef Škorpík.

Údaje o počtu zastávek, průměrné době mezi zastávkami a intervalech mezi výjezdy autobusů, které byly použity pro výchozí nastavení modelu, vychází z veřejně přístupných jízdních řádů uveřejněných na webu Integrovaného dopravního systému Jihomoravského kraje [2]. Pravděpodobnost výskytu dopravní nehody byla spočítána na základě veřejně dostupných statistik pro rok 2020, které každoročně uveřejňuje Policie České republiky a podle informací poskytnutých Ministerstvem dopravy České republiky k říjnu roku 2020 [4]. Z těchto informací je možná získat následující data pro rok 2020:

- Počet platných řidičských průkazů: **6 002 348**
- Počet dopravních nehod: **94 797**, z toho počet dopravních nehod s jedoucím nekolejovým vozidlem: **28 333**

Pro výpočet pravděpodobnosti dopravní nehody bylo dále pro jednoduchost uvažováno, že se žádná osoba neúčastnila více než jedné nehody. Výsledná pravděpodobnost se na základě těchto dat dá spočítat jako podíl počtu řidičských oprávnění a počtu nehod. Výsledná hodnota je rovna přibližně **1 : 212**, tedy **0.0047%**.

Výchozí údaje o dopravní zácpě byly zjištěny experimentálně. Na trase linky 501 momentálně dochází mezi zastávkami Ořechovská a Ústřední hřbitov k rekonstrukci dálničního nájezdu, což má za následek každodenní mnohakilometrové kolony vozidel mířících na dálnici D1 směrem od Vídně. Tyto dopravní komplikace ovlivňují i vybranou autobusovou linku. Jeden z řešitelů (Martin Pech) jezdí denně osobním automobilem po trase linky 501. Při čekání zapisoval dobu takto strávenou. Z údajů získaných o dopravě v tomto úseku od počátku října do konce listopadu v době dopravní špičky bylo následně zjištěno, že k zácpě došlo pokaždé průměrná doba čekání, ke kterému docházelo, byla vypočtena jako **17 minut**.

Mimo tento úsek dané linky byly hodnoty zpoždění pouze zanedbatelné a to jak ve špičce, tak mimo ni. Díky tomu bylo možné jednoduše určit výchozí pravděpodobnost výskytu zácpy. Pravděpodobnost výskytu zácpy při špičce je tedy možné vyjádřit jako poměr problémového úseku vůči celkovému počtu úseků. Výsledná pravděpodobnost je tedy $\frac{1}{7}$.

Pro určení průměrného počtu cestujících na zastávkách bylo využito statistik [1] uvedených na portálu wikipedia.org. Podle tohoto zdroje provozoval v roce 2022 Dopravní podnik města Brna 328 autobusů určených pro městskou osobní dopravu. Tyto autobusy v roce 2022 přepravily 111.7 milionů cestujících.

Z těchto údajů vyplývá, že jeden autobus převeze průměrně 39 lidí za hodinu. Trasa linky číslo 501 trvá ve vybraném úseku 9 minut a jede průměrně 3x za hodinu. Během jedné jízdy autobus převeze průměrně 13 lidí. Po rozpočítání tohoto počtu mezi 7 zastávek, zůstávají průměrně 2 lidi na zastávku. Tato statistika vychází z celoročních dat, tudíž jsou zde počítány jak spoje v dopravní špičce, tak i noční spoje, kde je nízké vytížení. Tento vypočtený údaj je pro daný model nedostatečný, ale nebylo možné vyhledat lepší údaje. Ze zkušenosti jednoho z řešitelů je ale průměrný počet lidí na zastávce mnohem vyšší, zejména ve špičce.

1.2 Validace výstupů

V rámci validace výstupů bylo provedeno několik experimentů (popsané v kapitole 5) a výsledky těchto experimentů byly validovány s daty z původního jízdního řádu a nového, výlukového jízdního řádu, který Integrovaný dopravní systém vytvořil v reakci na situace mezi zastávkami Ořechovská a Ústřední hřbitov.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Tento model hromadné osobní přepravy se zaměřuje na nalezení optimálního jízdního řádu autobusové linky. Model vyhodnocuje vstupní parametry, ze kterých určuje výsledky. Výstupy modelu jsou určovány na základě spokojenosti pasažérů. Spokojenost pasažérů je určována na základě běžných situací, jako například čekání v koloně, opožděný a včasný příjezd, nebo situace, kdy je autobus přeplněný a nemohou do něj nastoupit další lidé. Pro určení míry spokojenosti a nespokojenosti jednotlivých aspektů bylo využito dotazníkového šetření. Dotazovaní měli za úkol určit míru spokojenosti a nespokojenosti u každého z použitých aspektů. Po zprůměrování všech výsledků je spokojenost ovlivňována následujícími aspekty s následující vahou (za každého jednoho pasažéra, kterého se situace týká):

Spozděný příjezd autobusu	Včasný příjezd autobusu	Přeplněný autobus	Čekání v dopravní zácpě	Opožděný příjezd autobusu do zastávky	Dopravní nehoda
-1/-2	+1/+2	-1/-2	0/-1	0/-1	-3

Tabulka 1: Ovlivnění celkové spokojenosti v závislosti na daném jevu (za každého jednoho pasažéra)

Po nasimulování autobusové linky s konkrétními parametry je uživatel obeznámen s výsledkem. Pokud je výsledek spokojenosti pasažérů nadprůměrný, znamená to, že by takovýto jízdní řád za daných podmínek mohl fungovat. Model dále dokáže indikovat situaci, kdy je na ince použitý nesprávný počet autobusů, což může vést k ekonomické neúnosnosti, nebo jsou intervaly mezi výjezdy autobusů příliš (málo) četné. Dále dokáže určit taková nastavení, která by v reálu zřejmě neobstála.

Výchozí nastavení modelu odpovídá autobusové lince 501. Pomocí jízdního řádu této linky byl následně model validován. Model uvažuje všechny autobusové zastávky od Ústředního hřbitova po Nebovidy, dolní konec. V tomto úseku je 7 autobusových zastávek a celková doba jízdy autobusu po této trase (bez zpoždění) je 9 minut. Simulační čas odpovídá sekundám reálného času.

Chování modelu je takové, že po pevně daných časových intervalech vyjíždí z úvodní zastávky autobus a projíždí všechny zastávky na lince. Mezi všemi zastávkami na lince existuje šance, že se autobus dostane do dopravní zácpy, v důsledku čehož se opoždí. To může mít negativní dopad na schopnost autobusu vyjet na novou linku podle jízdního řádu, čímž může negativně ovlivňovat spokojenost pasažérů. Pokud autobus přijede k zastávce, existuje možnost, že se v zastávce vyskytuje už nějaký jiný autobus. V takovém případě se autobus zařadí do fronty za zastávku. V opačném případě zabere zastávku a započne výstup a nástup cestujících. Pokud je kapacita autobusu zaplněna, nejsou další cestující vpuštěni do autobusu, což znovu negativně ovlivňuje jejich spokojenost. Po dokončení zastávky se autobus vrací na silnici. V tomto momentě hrozí riziko nedání přednosti v jízdě ze strany řidičů a s šancí 0.0047% může dojít k nehodě. V takovém případě se na linku vysílá náhradní autobus, který převezme všechny cestující z havarovaného autobusu a pokračuje dál na lince.

Z výše posaných dat vyplývá, že se průměrně na každé zastávce vyskytují 2 lidé. Obdobně uvažujeme i počet vystupujících. Obecně ale platí, že se cestující generují s rovnoměrným rozložením, daným intervalem $\langle 0, x \rangle$, kde x si může uživatel nastavit přepínačem jak pro nástup, tak pro výstup. Stejně se pak pracuje s počtem cestujících, kteří vysednou na zastávce. Výjimkou je poslední zastávka, kde se implicitně uvažuje výstup všech cestujících. Výchozí hodnota je pro oba případy $x = 4$. Průměrně naložení a vyložení cestujících trvá 90s (1.5 minuty). Průměrný čas mezi jednotlivými zastávkami na této lince je 78 sekund (1.3 minuty). Ve výchozím nastavení vyjíždí nový autobus každých 675 sekund, tedy každých 11.25 minut a k dispozici jsou dva autobusy s kapacitou 75 míst. Všechny v této kapitole popsané parametry lze modifikovat pomocí argumentů příkazové řádky při spouštění modelu.

2.1 Popis použitých postupů

K vytvoření základní koncepce projektu jsme využili deklarativních modelů [3, snímek 49], konkrétně Petriho sítě [3, snímek 123] vyobrazené níže. Pomocí Petriho sítě byl vytvořen model obslužné linky simulující chování linky hromadné osobní přepravy. Model byl vytvořen za pomoci programovacího jazyka C++, jelikož je velmi dobře využitelný v případech, kdy je nutný vysoký výkon. Proto je ideální volbou právě pro tvorbu simulací, které mohou být výpočetně náročné. Pro účely modelování je využito knihovnu SIMLIB¹ ve verzi 3.09 a pro sestavení projektu nástroje GNU Make². Nástroj i knihovna jsou volně dostupné a jsou distribuovány pod svobodnou licenci softwaru.

2.2 Popis původu použitých metod/technologií

S pomocí jazyka C++ bylo přistupováno k rozhraní knihovny SIMLIB, pomocí kterého byly vytvořeny předpisy pro všechny komponenty potřebné k simulaci. Díky principům jazyka C++ bylo možné využít objektově orientovaného programování. Proces autobusu byl implementován ve třídě Bus a proces dopravní nehody ve třídě Accident.

¹<https://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>

²<https://www.gnu.org/software/make/>

3 Koncepte modelu

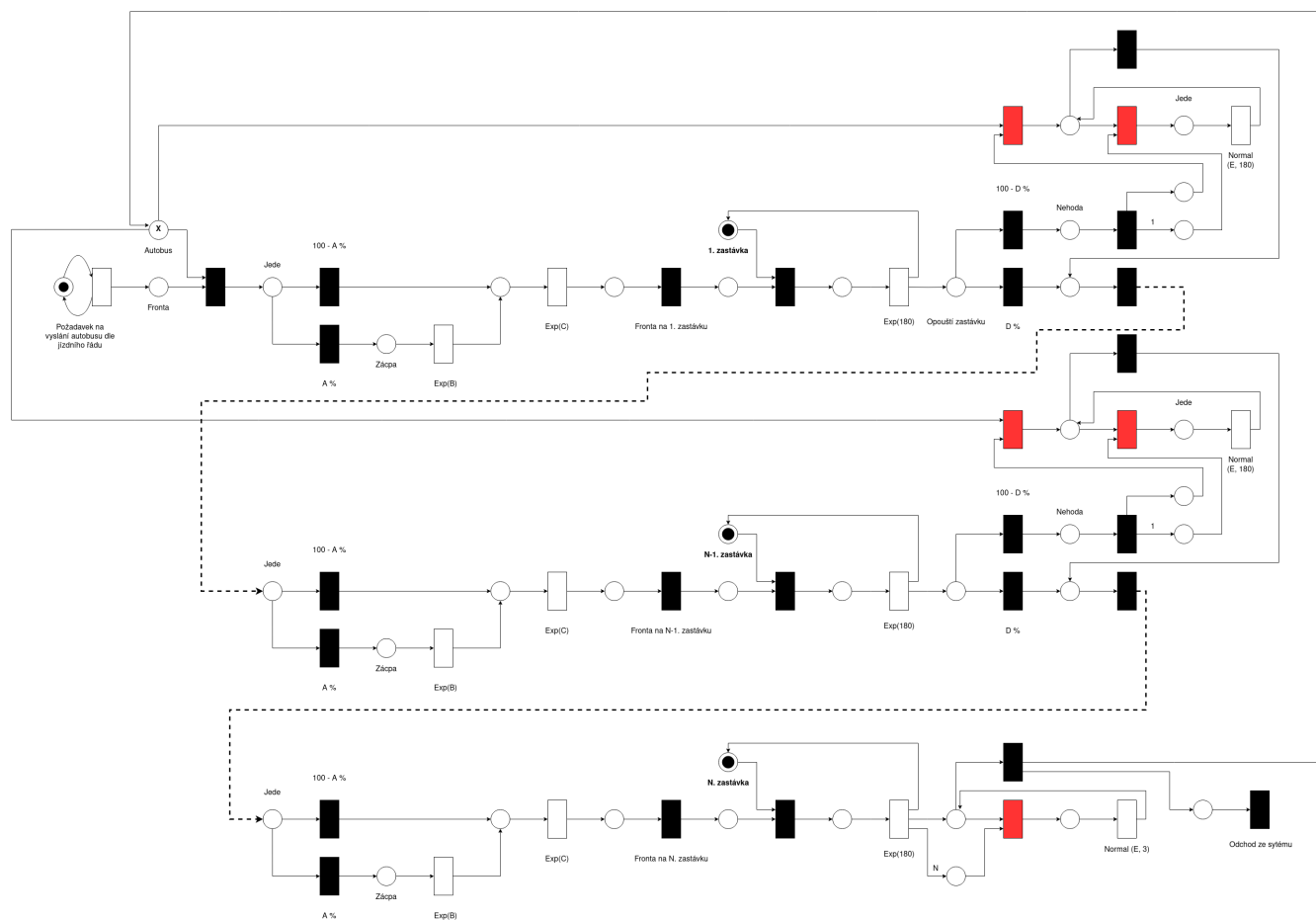
Konceptuální model [3, snímek 48] je koncipován jako systém hromadné obsluhy [3, snímek 136]. V modelu se pracuje s obslužnou linkou autobusu, která zpracovává příchozí požadavky na výjezd autobusu dle jízdního řádu. Dále v modelu existuje dynamický počet linek reprezentující autobusové zastávky. Počet zastávek volí uživatel při spuštění programu. Díky tomu, že se tento model neomezuje na počet autobusových zastávek, či na předem daný počet autobusů, je možné ho použít k modelování libovolné linky. V modelu se dále vyskytuje dispečer, který je implementován jako generátor z knihovny Simlib.

3.1 Popis konceptuálního modelu

Do modelu vstupují jednotlivé autobusy v pevně daných intervalech. V čas výjezdu vyjíždí autobus na první zastávku. Na zastávce nabírá cestující. Mohou nastat dvě komplikace. Autobus může havarovat, na základě čehož vyšle systém nový autobus na místo havárie a převezme cestující. Poté pokračuje v dané lince namísto původního autobusu. Druhou komplikací je dopravní zácpa, do které se autobus může dostat. Výstupem modelu je spokojenost cestujících. Spokojenost je ovlivněna časem příjezdu do cílové destinace a dalšími faktory. Pokud cestující přijede bez komplikací a včas, dá se říct, že se službou dané linky byl spokojený. Pokud se dostane do havárky nebo dopravní zácpy, autobus přijede se zpožděním a můžeme očekávat, že cestující nebude se službou spokojen.

3.2 Forma konceptuálního modelu

Model je reprezentován následující Petriho sítí.



Obrázek 1: Petriho síť

X	Kapacita linky autobusu
N	N -tá linka reprezentující autobusovou zastávku o kapacitě 1
A	Pravděpodobnost dopravní zácpy
B	Doba čekání v zácpě dané exponenciálním rozložením se zadaným středem
C	Doba přejezdu do další zastávky dané exponenciálním rozložením se zadaným středem
D	Pravděpodobnost nehody
E	Reprezentuje dobu přejezdu mezi zastávkami
<i>Červené bloky</i>	Znázorňují zvýšenou prioritu přechodu, $priorita = 1$
<i>Bílé bloky</i>	Znázorňují časové přechody
<i>Černé bloky</i>	Znázorňují funkční/nečasové přechody

Tabulka 2: Legenda k Petriho síti

4 Architektura simulačního modelu

Spuštěním simulačního modelu [3, snímek 44] se spustí simulační experiment se zadanými parametry. Parametry a jejich zadávání jsou popsány v kapitole 4.2. Během simulačního experimentu jsou vypisovány všechny podstatné změny stavů. Výpis každé změny stavu je doprovázen modelovým časem [3, snímek 21]. Modelový čas odpovídá sekundám reálného času. Příkladem změny stavu může být například to, že se autobus dostal do havárie, nebo to, že se na místo havárie vyslal nový autobus. Stav a jeho přechody jsou znázorněny v Petriho síti v kapitole 3.2.

Pro účely simulace byl simulační čas nastaven na 1 hodinu a 40 minut. Tato doba byla určena na základě jízdního řádu. Jízdnímu řádu odpovídají i intervaly, po kterých je vygenerován požadavek na vyslání autobusu a doba jeho přesunu mezi zastávkami.

Modelový čas [3, snímek 21] lze nastavit způsobem popsaným v kapitole 4.2. Jednotka modelového času je chápána jako sekunda v reálném čase. Model dále pracuje s 5 % šancí, že se autobus dostane do dopravní zácpy, ve které průměrně stráví 300 sekund (5 minut) a s 0.00471% šancí, že autobus havaruje. Obě proměnné jsou nastavitelné.

4.1 Mapování konceptuálního modelu do simulačního modelu

Generování požadavků na vypravení autobusu je reprezentováno třídou `BusDispatcher`, která je implementována jako událost [3, snímek 169]. Proces chování autobusu je implementován třídou `Bus`. Dalším samostatným procesem je nehoda, která je reprezentována třídou `Accident`.

4.2 Spouštění simulačního modelu

Simulační experiment je možné spouštět s parametry. Pokud není zadán žádný parametr, použije se výchozí hodnoty pro linku číslo 501.

- Parametr `-t` umožňuje nastavit modelový čas, jeho výchozí hodnota je 6000 sekund.
- Parametr `-a` umožňuje nastavit procento, s jakým se autobus dostane do havárky. Musí to být číslo v intervalu $<0,1>$.
- Parametr `-b` umožňuje nastavit počet autobusů, které operují na dané lince hromadné dopravy. Výchozí hodnota je 2.
- Parametr `-s` umožňuje nastavit počet autobusových zastávek na dané lince. výchozí hodnota je 7.
- Parametr `-l` umožňuje nastavit průměrný čas mezi jednotlivými autobusovými zastávkami. Výchozí hodnota je 78 sekund (1.3 minuty).
- Parametr `-g` umožňuje nastavit interval, ve kterém vyjíždět jednotlivé autobusy.
- Parametr `-w` umožňuje nastavit čas, který průměrně autobus stráví v dopravní zácpě. Výchozí hodnota je 300s, což odpovídá 5 minutám.
- Parametr `-j` umožňuje měnit šanci, se kterou se autobus dostane do dopravní zácpy. Defaultně je nastavena na 0.00471. Parametr musí být číslo v intervalu $<0,1>$.
- Parametr `-c` umožňuje nastavit kapacitu cestujících autobusu. Výchozí hodnota je 75 cestujících.
- Parametr `-i` umožňuje nastavit pravou hranici intervalu $<0,x>$ rovnoměrného rozložení, podle kterého se určuje počet cestujících na zastávce, kteří vstoupí do autobusu.

- Parametr `-o` umožňuje nastavit pravou hranici intervalu $<0,y>$ rovnoměrného rozložení, podle kterého se určuje počet cestujících na zastávce, kteří vystoupí z autobusu.

U všech parametrů je vyžadováno kladné číslo.

Program (s výchozími hodnotami) je možné spustit příkazem `make run`.

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem experimentů bylo pozorovat chování modelu a vytvořit závěry ohledně zvolené autobusové linky. Pozorováním modelu bylo možné dojít k závěrům, které ukazují, že je v současné době nejlepší variantou přistoupit k používání výlukového jízdního řádu, jako tomu ve skutečnosti je.

5.1 Postup experimentování

Experimentování probíhalo tak, že byly na základě jízdních řádů spočítány vstupní hodnoty pro několik situací. Výsledky z experimentů byly po dokončení validovány se skutečností.

Experiment každé jedné situace byl spouštěn se zvolenými parametry, které jsou zaneseny v tabulkách níže. Nejsou-li v tabulce některé parametry uvedeny, byla uvažována jejich implicitní hodnota. Každého experimentu je doplněn také o snímek s výstupem z implementovaného modelu.

5.2 Experimenty

Každý experiment má svůj dílčí cíl a závěr a nachází se u něj výpis jeho výsledků. Výsledky všech experimentů dohromady utváří celkový výsledek.

5.2.1 Experiment 1

Cílem tohoto experimentu je ověření funkčnosti modelu s výchozími vstupy a získání doporučení ohledně jízdního řádu zvolené linky mimo dopravní špičku.

Celkový čas (s)	Počet autobusů	Počet zastávek	Průměrný čas mezi zastávkami	Šance na dopravní zácpu	Čas v dopravní zácpě (s)	Šance na havárii	Spokojenost
6000	2	7	78	5%	300	0.00471%	Kladná

Tabulka 3: Výsledek experimentu 1

Z výsledku je patrné, že pro zadané parametry by mohl být výstup optimální. Hlavní znaky optimálního výsledku jsou spokojenost pasažérů a nízké opoždění autobusů. Dále model říká, že z dostupných autobusů využil všechny a tím pádem je i z hlediska využití dostupných zdrojů optimální. Dále je z podrobných výpisů změn stavů patrné, že se některý z autobusů dostal do dopravní zácpy.

```
[Time: 4814.382984]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4895.153191]   Autobus číslo [2] je v zastávce [2].
[Time: 4899.959831]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4980.828172]   Autobus číslo [2] je v zastávce [3].
[Time: 4983.965365]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5062.209332]   Autobus číslo [2] je v zastávce [4].
[Time: 5063.642049]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5134.026918]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 5143.774949]   Autobus číslo [2] je v zastávce [5].
[Time: 5148.634257]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5224.880692]   Autobus číslo [2] je v zastávce [6].
[Time: 5226.584556]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5309.568760]   Autobus číslo [2] je v zastávce [7].
[Time: 5310.331594]   Autobus číslo [2] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 5400.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 5400.000000]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 5400.000000]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5481.315064]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 5482.329645]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5561.458191]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 5563.454591]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5643.259744]   Autobus číslo [1] je v zastávce [3].
[Time: 5646.736863]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5726.107782]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 5730.919391]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5811.398459]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 5815.079790]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5815.079790]   Autobus číslo [1] se dostal do zácpy a zdrží se [4.035322].
[Time: 5853.927823]   Autobus číslo [2] je připraven k použití.
[Time: 5898.417670]   Autobus číslo [1] je v zastávce [6].
[Time: 5900.724631]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5979.027625]   Autobus číslo [1] je v zastávce [7].
[Time: 5982.620801]   Autobus číslo [1] dokončil linku a vrací se zpět.

=====
STATISTICS:
=====

Successfully dispatched buses on schedule: 9 / 9
Unused buses: 0

Passenger happiness: Above Average
Average time in traffic jam: 0.448369

Model output:
=====
Optimal solution. There is just enough buses and people are not unhappy.
=====
xpechm00@merlin: ~/IMS23/FINAL$
```

Obrázek 2: Experiment 1 - mimo dopravní špičku

5.2.2 Experiment 2

Tento experiment se zaměřuje na situaci, kdy se zvolená autobusová linka nachází v dopravní špičce. V dopravní špičce je zvýšená pravděpodobnost dopravní komplikace a je řádově více lidí, kteří potřebují nastoupit.

Šance na dopravní zácpu	³ Interval nástupu	⁴ Interval výstupu	Doba strávená v zácpě (s)	Průměrný čas mezi zastávkami (s)	Šance na havárii	Spokojenost
14%	<0,20>	<0,2>	1020	85	1%	Podprůměrná

Tabulka 4: Parametry experimentu 2

Experiment dokázal, že je situace za dopravní špičky diametrálně odlišná a je potřeba ji řešit. Na základě výstupů je vidět, že pasažéři nebyli spokojeni. Z výstupů lze vyvodit, že je tato situace způsobena faktem, že drtívá většina autobusů vyrazila opožděná (musela čekat na obsluhu). Situace vznikla tak, že autobusy dlouho stály v dopravní zácpě a nestíhaly včas vyrazit na novou cestu.

Model pro tuto situaci doporučuje upravit jízdní řád snížením intenzity požadavků, nebo zvýšit počet autobusů na lince.

```
[Time: 4542.538396]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 4543.447944]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4543.447944]   Autobus číslo [1] se dostal do zácpy a zdrží se [203.146764].
[Time: 4725.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 4725.000000]   Požadavek na vyslání autobusu byl zařazen do fronty.
[Time: 4833.285895]   Autobus číslo [2] je v zastávce [6].
[Time: 4834.218345]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4834.223395]   Autobus číslo [1] je v zastávce [6].
[Time: 4835.898822]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4917.512333]   Autobus číslo [2] je v zastávce [7].
[Time: 4919.462452]   Autobus číslo [2] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 4922.512059]   Autobus číslo [1] je v zastávce [7].
[Time: 4923.150784]   Autobus číslo [1] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 5400.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 5400.000000]   Požadavek na vyslání autobusu byl zařazen do fronty.
[Time: 5514.221761]   Autobus číslo [2] je připraven k použití.
[Time: 5514.221761]   Autobus s číslem [2] byl vyslán na linku.
[Time: 5514.221761]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5514.221761]   Autobus číslo [2] se dostal do zácpy a zdrží se [1281.931722].
[Time: 5527.753900]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 5527.753900]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 5527.753900]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5611.820311]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 5615.116511]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5701.353915]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 5705.462561]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5787.880149]   Autobus číslo [1] je v zastávce [3].
[Time: 5788.578244]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5871.598345]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 5872.696031]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5953.463023]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 5955.340682]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.

=====
                        STATISTICS:
=====

Successfully dispatched buses on schedule: 2 / 9
Unused buses: 0

Passenger happiness: Below Average
Average time in traffic jam: 2171.480132

Model output:
=====
Not optimal solution. You should either increase a number of buses or decrease the intensity of bus dispatches. Optimal solution of this depends on current intensity and amount of traffic jams.
=====
xpechm00@merlin: ~/IMS23/FINAL$
```

Obrázek 3: Výsledek experimentu 2 - dopravní špička

5.2.3 Experiment 3

Na základě předchozího experimentu, jehož výsledek je patrný na obrázku 4 je potřeba změnit jízdní řád. Trasa linky 501 umožňuje vynechat problémový úsek mezi zastávkami Ořechovská a Ústřední hřbitov, protože na zastávce Ořechovská je možné přesoupit na tramvaj. V jízdním řádu [2] je patrné, že se tak v době dopravní špičky děje a autobus jezdí „zkrácenou linku“. Parametry experimentu proto byly nastaveny tak, aby odpovídaly této „zkrácené lince“.

Počet zastávek	⁵ Interval nástupu	⁶ Interval výstupu	Průměrný čas v zácpě (s)	Průměrný čas mezi zastávkami (s)	Šance na havárii	spokojenost
6	20	2	500	85	1%	Nadprůměrná

Tabulka 5: Parametry experimentu 3

Model vyhodnotil že „zkrácenou linku“ jako fungující i v dopravní špičce. Tím pádem by takovýto jízdní řád bylo možné použít. Ve skutečnosti se opravdu takovýto zkrácený řád používá.

```
[Time: 4314.815021]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4376.228273]   Autobus číslo [2] je připraven k použití.
[Time: 4400.235370]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 4411.303949]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4503.465115]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 4508.845416]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4591.830303]   Autobus číslo [1] je v zastávce [6].
[Time: 4597.729212]   Autobus číslo [1] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 4725.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 4725.000000]   Autobus s číslem [2] byl vyslán na linku.
[Time: 4725.000000]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4812.956709]   Autobus číslo [2] je v zastávce [1].
[Time: 4813.172688]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4900.669820]   Autobus číslo [2] je v zastávce [2].
[Time: 4900.958859]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4987.634862]   Autobus číslo [2] je v zastávce [3].
[Time: 4993.212266]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5074.976439]   Autobus číslo [2] je v zastávce [4].
[Time: 5076.076876]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5098.819491]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 5163.944557]   Autobus číslo [2] je v zastávce [5].
[Time: 5165.662103]   Autobus číslo [2] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5253.755820]   Autobus číslo [2] je v zastávce [6].
[Time: 5253.820207]   Autobus číslo [2] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 5400.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 5400.000000]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 5400.000000]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5400.000000]   Autobus číslo [1] se dostal do zácpy a zdrží se [352.581592].
[Time: 5772.019773]   Autobus číslo [2] je připraven k použití.
[Time: 5840.222137]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 5847.365958]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5927.615004]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 5929.753437]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.

=====
                        STATISTICS:
=====

Successfully dispatched buses on schedule: 9 / 9
Unused buses: 0

Passenger happiness: Above Average
Average time in traffic jam: 39.175732

Model output:
=====
Optimal solution. There is just enough buses and people are not unhappy.
=====
xpechm00@merlin: ~/IMS23/FINAL$
```

Obrázek 4: Výsledek experimentu 3 - zkrácená linka v dopravní špičce

5.2.4 Experiment 4

V tomto experimentu byla snaha vylepšit nezkrácenou linku mimo dopravní špičku přidáním několika autobusů se zachováním jízdního řádu.

Počet autobusů	Spokojenost
4	Above average

Tabulka 6: Parametry experimentu 4

Z výsledků je patrné, že přidáním autobusů se nic nezlepší. Výstup pokusu upozorňuje na přebytné množství rezervovaných autobusů.

```
[Time: 4814.382984]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 4895.153191]   Autobus číslo [2] je v zastávce [2].
[Time: 4899.959831]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 4980.828172]   Autobus číslo [2] je v zastávce [3].
[Time: 4983.965365]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5062.209332]   Autobus číslo [2] je v zastávce [4].
[Time: 5063.642049]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5134.026918]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 5143.774949]   Autobus číslo [2] je v zastávce [5].
[Time: 5148.634257]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5224.880692]   Autobus číslo [2] je v zastávce [6].
[Time: 5226.584556]   Autobus číslo [2] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5309.568760]   Autobus číslo [2] je v zastávce [7].
[Time: 5310.331594]   Autobus číslo [2] dokončil linku a vrátí se zpět.
[Time: 5400.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 5400.000000]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 5400.000000]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5481.315064]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 5482.329645]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5561.458191]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 5563.454591]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5643.259744]   Autobus číslo [1] je v zastávce [3].
[Time: 5646.736863]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5726.107782]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 5730.919391]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5811.398459]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 5815.079790]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5815.079790]   Autobus číslo [1] se dostal do zácpy a zdrží se [4.035322].
[Time: 5853.927823]   Autobus číslo [2] je připraven k použití.
[Time: 5898.417670]   Autobus číslo [1] je v zastávce [6].
[Time: 5900.724631]   Autobus číslo [1] vyřadí do další zastávky.
[Time: 5979.027625]   Autobus číslo [1] je v zastávce [7].
[Time: 5982.620801]   Autobus číslo [1] dokončil linku a vrátí se zpět.

=====
STATISTICS:
=====

Successfully dispatched buses on schedule: 9 / 9
Unused buses: 2

Passenger happiness: Above Average
Average time in traffic jam: 0.448369

Model output:
=====
Some buses could be omitted, but people are not unhappy.
=====
xpechm00@merlin: ~/IMS23/FINAL$
```

Obrázek 5: Výsledek experimentu - nezkrácená linka mimo špičku s přidáním několika autobusů

5.2.5 Experiment 5

Cílem posledního experimentu bylo vyzkoušet, jak by autobusová linka fungovala, kdyby se počet autobusů na ní jezdící naopak snížil

Počet autobusů	Spokojenost
1	Podprůměrná

Tabulka 7: Parametry experimentu 5

Dle výsledku experimentu by v situaci, kdy by za daných podmínek jezdil jen jeden autobus byla spokojenost cestujících negativní. Model doporučuje zvýšit počet autobusů, nebo snížit frekvenci s jakou autobusy jezdí (například vyslat autobus jednou za hodinu).

```
[Time: 4508.582722]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 4508.582722]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 4508.582722]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4589.028176]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 4601.127982]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4680.054810]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 4680.283403]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4725.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 4725.000000]   Požadavek na vyslání autobusu byl zařazen do fronty.
[Time: 4757.397948]   Autobus číslo [1] je v zastávce [3].
[Time: 4770.860254]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4849.223365]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 4852.551153]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 4934.316112]   Autobus číslo [1] je v zastávce [5].
[Time: 4935.271783]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5014.665148]   Autobus číslo [1] je v zastávce [6].
[Time: 5018.139180]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5091.909795]   Autobus číslo [1] je v zastávce [7].
[Time: 5093.610629]   Autobus číslo [1] dokončil linku a vrací se zpět.
[Time: 5400.000000]   Autobus by měl nyní vyjet podle jízdního řádu.
[Time: 5400.000000]   Požadavek na vyslání autobusu byl zařazen do fronty.
[Time: 5653.774964]   Autobus číslo [1] je připraven k použití.
[Time: 5653.774964]   Autobus s číslem [1] byl vyslán na linku.
[Time: 5653.774964]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5738.170050]   Autobus číslo [1] je v zastávce [1].
[Time: 5739.904679]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5816.615718]   Autobus číslo [1] je v zastávce [2].
[Time: 5820.063610]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5891.281898]   Autobus číslo [1] je v zastávce [3].
[Time: 5894.725631]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.
[Time: 5968.980793]   Autobus číslo [1] je v zastávce [4].
[Time: 5969.542258]   Autobus číslo [1] vyřáží do další zastávky.

=====
STATISTICS:
=====

Successfully dispatched buses on schedule: 1 / 9
Unused buses: 0

Passenger happiness: Below Average
Average time in traffic jam: 68.058842

Model output:
=====
Not optimal solution. You should either increase a number of buses or decrease the intensity of bus dispatches. Optimal solution of this depends on current intensity and amount of traffic jams.
=====
xpechm00@merlin: ~/IMS23/FINAL$
```

Obrázek 6: Výsledek experimentu 5 - nízký počet autobusů

5.3 Závěry experimentů

Bylo provedeno 5 experimentů s různými parametry. V prvním experimentu jsme ověřili, že mimo dopravní špičku funguje jízdní řád autobusové linky č. 501 optimálně. V dalších experimentech jsme např. testovali, jak se autobusová linka chová, když je dopravní špička, tedy cestuje více cestujících a je větší šance na to, že se autobus dostane do zácpy. Došli jsme k závěru, že pokud bychom měli normální jízdní řád, v době dopravních špiček by byl značně nevyhovující. Dále jsme otestovali, jestli momentální řešení Českých drah funguje. Tedy zkusili jsme simulaci spustit nad zkrácenou linkou, která nevyjíždí z první zastávky, ale až z druhé. Ukázalo se, že aktuální řešení funguje. Zkusili jsme také simulaci spustit nad jednoznačně malým množstvím autobusů u linky a ukázalo se, že pokud bychom měli jen jeden autobus na tuto linku, momentální stav jízdního řádu by byl nevyhovující a musel by se změnit. Pokud bychom si nemohli dovolit přidat další autobus na linku, museli bychom zvětšit prodlevu mezi jednotlivými cestami autobusu.

Experimenty lze považovat s dostatečnou věrohodností za správný zdroj informací, protože jich bylo provedeno několik a odpovídají již existujícímu jízdnímu řádu dané linky.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V rámci experimentů jsme ověřili, že aktuální jízdní řád autobusové linky číslo 501 je vymyšlen dobře a měl by být odolný vůči aktuální dopravní situaci. Vzhledem k faktu, že výsledky simulace korespondují s výlukovým jízdním řádem, dalo by se říci, že výsledky jsou validní.

V rámci této práce byl vytvořen nástroj, který je schopen napomáhat s tvorbou ideálních jízdních řádů. Nástroj může pomoci s návrhem ideální dopravní infrastruktury, může pomáhat uspokojovat potřeby cestujících a může se uplatnit i jako pomocník s úsporou financí.

Nástroj byl implementován v jazyce C++ s využitím knihovny SIMLIB. Zadáním parametrů je možné model nastavovat a modifikovat tak, aby jej bylo možné využít na řadě dalších uzlech hromadné osobní přepravy. Výstupem modelu je především spokojenost cestujících, podle které můžeme parametry iterativně upravovat, abychom dostali ideální výsledky. Společně se spokojeností dále ze simulace vystupují podrobné statistiky, které napomáhají činit správné kroky k dosažení cíle.

Nástroj by mohl být využit těmi, kteří se zaměřují na plánování spojů a linek hromadné osobní přepravy. Cílovou skupinou jsou tedy především dopravní podniky, cestovní agentury a podobně. Za předpokladu, že jsou do modelu vložena velmi přesná data, by model mohl být velmi efektivní nástroj pro optimalizaci nákladů a dalších zdrojů. Výsledkem použití nástroje by měla být vyšší spokojenost na straně zákazníka i klienta (tedy dopravce i cestujícího).

Použitá literatura

- [1] Městská autobusová doprava v Brně. [online], 1. listopadu 2023. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bstsk%C3%A1_autobusov%C3%A1_doprava_v_Brn%C4%9B
- [2] JMK, I.: Integrovaný dopravní systém jihomoravského hraje, jízdní řád. [online], 4. září 2023. Dostupné z: <https://content.idsjmk.cz/jrady23/230904/501.pdf>
- [3] Peringer, P.; Hrubý, M.: Modelování a simulace, Text k přednáškám kursu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. [online], 15. září 2022, [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>
- [4] ČR, P.: Statistika nehodovosti 2020. [online], 2020. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-900835.aspx?q=Y2hudW09NA%3d%3d>