



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**SYSTÉM PRE PODPORU OPTIMALIZÁCIE SIETE  
MESTSKEJ HROMADNEJ DOPRAVY**

SYSTEM FOR SUPPORTING THE OPTIMIZATION OF URBAN PUBLIC TRANSPORT NETWORK

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**LUKÁŠ KATONA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. FRANTIŠEK ZBOŘIL, Ph.D.**

**BRNO 2025**

## Zadání bakalářské práce



163440

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)  
Student: **Katona Lukáš**  
Program: Informační technologie  
Název: **Systém pro podporu optimalizace sítě městské hromadné dopravy**  
Kategorie: Umělá inteligence  
Akademický rok: 2024/25

### Zadání:

1. Prostudujte problematiku vytváření sítě městské hromadné dopravy, její modelování a její optimalizace pro města do půl milionu obyvatel.
2. Pro město velikosti krajského města České republiky získejte nebo odhadněte data, ze kterých sestavte model zdejší městské hromadné dopravy.
3. Seznamte se s řešeními, které pro optimalizaci takové sítě používají metody umělé inteligence.
4. Vytvořte prostředí, které bude sloužit k modelování a optimalizaci takové sítě.
5. Na vhodně zvolených příkladech ověřte fungování vašeho systému a diskutujte dosažené výsledky.

### Literatura:

- Kate Han, Lee A. Christie, Alexandru-Ciprian Zăvoianu, and John McCall. 2021. Optimising the introduction of connected and autonomous vehicles in a public transport system using macro-level mobility simulations and evolutionary algorithms. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 315–316.
- Yentl Van Tendeloo and Hans Vangheluwe. 2018. Discrete event system specification modeling and simulation. In Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference (WSC '18). IEEE Press, 162–176.
- 

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:  
První dva body zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Zbořil František, doc. Ing., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Kočí Radek, Ing., Ph.D.  
Datum zadání: 1.11.2024  
Termín pro odevzdání: 14.5.2025  
Datum schválení: 31.10.2024

## Abstrakt

Cielom tejto práce je optimalizácia mestskej hromadnej dopravy, konkrétne časového rozpisu jednej linky. Zmyslom tohto textu je popis celého riešenia daného problému, od analýzy až po výsledný systém. Informácie získané priamo z Dopravného podniku mesta Brno boli využité na zostrojenie simulačného modelu jednej linky mestskej hromadnej dopravy. Pomocou tohto modelu a genetického algoritmu sa systém pokúsi nájsť najoptimálnejší časový rozpis danej linky. Súčasťou práce je aj nástroj s používateľským rozhraním, ktorý je možné v praxi použiť na analýzu a optimalizáciu terajších časových rozpisov jednotlivých liniek. Nástroj poskytuje širokú škálu rôznych vstupov, ktorými môže analytik obmedziť isté vlastnosti výsledného rozpisu. Vďaka tomuto nástroju by sa mala práca analytikov, ktorí majú na starosť správu a vytváranie liniek, výrazne zjednodušiť a zvýšiť tak efektivitu mestskej hromadnej dopravy.

## Abstract

The aim of this work is the optimization of urban public transport, specifically the timetable of one line. The purpose of this text is to describe the entire solution of the given problem, from analysis to the resulting system. Information obtained directly from the Brno Public Transport Company was used to construct a simulation model of one urban public transport line. Using this model and a genetic algorithm, the system will attempt to find the most optimal timetable for the given line. Part of this work is a tool with a user interface that can be used in practice to analyze and optimize the current timetables of individual lines. The tool provides a wide range of different inputs that an analyst can use to restrict certain properties of the resulting timetable. Thanks to this tool, the work of analysts who are responsible for managing and creating lines should be significantly simplified and thus increase the efficiency of urban public transport.

## Klíčové slová

optimalizácia, mestská hromadná doprava, algoritmy inšpirované prírodou, genetický algoritmus, simulácia, DEVS

## Keywords

optimization, urban public transport, nature-inspired algorithms, genetic algorithm, simulation, DEVS

## Citácia

KATONA, Lukáš. *Systém pre podporu optimalizácie siete mestskej hromadnej dopravy*. Brno, 2025. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. František Zbořil, Ph.D.

# Systém pre podporu optimalizácie siete mestskej hromadnej dopravy

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostante pod vedením pána doc. Ing. Františka Zbořila Ph.D. Ďalšie informácie mi poskytol pán Dr. Ing. Petr Peringer z jeho prezentácií predmetov IMS a SNT a pán Michael Kříž z Dopravného podniku mesta Brno. Uviedol som všetky literárne zdroje, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....

Lukáš Katona  
25. januára 2025

## Podakovanie

Rád by som poďakoval pánovi Zbořilovi za jeho cenné rady a konzultácie, hlavne zo strany optimalizácie a algoritmov z odvetvia umelej inteligencie. Pánovi Křížovi by som rád poďakoval za jeho čas a ochotu poskytnúť informácie o fungovaní MHD v Brne a zároveň za jeho pripomienky z pohľadu možného používateľa systému. Nakoniec by som chcel poďakovať môjmu priateľovi Danovi Valníčkovi a jeho starému otcovi za to, že mi vybavili kontakt na pána Kříže a tým umožnili získať potrebné informácie o riešenom probléme priamo z prvej ruky.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická časť</b>	<b>5</b>
2.1	DEVS - Discrete Event Simulation System . . . . .	5
2.2	Genetický algoritmus . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Relevantné vlastnosti mestskej hromadnej dopravy</b>	<b>6</b>
3.1	Konzultácia s analytikom Dopravného podniku . . . . .	6
3.2	Získané informácie . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Simulačný model linky mestskej hromadnej dopravy</b>	<b>8</b>
4.1	Popis simulačného modelu . . . . .	8
4.2	Implementácia simulačného modelu . . . . .	12
4.3	Výstupy simulačného modelu . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Optimalizácia časového rozpisu linky mestskej hromadnej dopravy</b>	<b>18</b>
5.1	Vstupné obmedzenia zo strany používateľa . . . . .	18
5.2	Implementácia genetického algoritmu . . . . .	18
5.3	Výsledky optimalizácie . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Užívateľské rozhranie analytického nástroja</b>	<b>19</b>
6.1	Návrh užívateľského rozhrania . . . . .	19
6.2	Implementácia užívateľského rozhrania . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Testovanie</b>	<b>20</b>
7.1	Testovanie ohodnocovania jednotlivých rozpisov . . . . .	20
7.2	Testovanie optimalizácie jedného rozpisu . . . . .	20
7.3	Testovanie užívateľského rozhrania . . . . .	20
7.4	Spätná väzba od analytika . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Záver</b>	<b>21</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>22</b>
<b>A</b>	<b>Programová dokumentácia</b>	<b>23</b>

# Zoznam obrázkov

4.1	Schéma simulačného modelu . . . . .	8
4.2	Stavový automat modelu zastávky . . . . .	10
4.3	Stavový automat modelu vozidla . . . . .	11
4.4	Počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku v jednotlivých hodinách . . . . .	15
4.5	Počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke v jednotlivých hodinách . . . . .	15
4.6	Počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj v jednotlivých hodinách . . . . .	16
4.7	Čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke v jednotlivých hodinách . . . . .	16
4.8	Priemerná naplnenosť vozidla na jednotlivých zastávkach . . . . .	17

# Kapitola 1

## Úvod

Mestskú hromadnú opravu využíva takmer každý človek a preto sa oplatí pracovať na jej efektívite. Zmyslom tejto práce je nazrieť do problematiky vytvárania a správy jednotlivých liniek mestkšej hromadnej dopravy, ich analýze a optimalizácie. Ďalej vytvoriť nástroj, ktorý pomôže analytikom pri vytváraní nových liniek alebo optimalizácii existujúcich. Tento nástroj popísať a otestovať na reálnych dátach. Výsledkom celej práce by teda malo byť teoretické zefektívnenie mestskej hromadnej dopravy.

Ludia odnepamäti nachádzajú inspiráciu pre svoje vynálezy v prírode a tomuto trendu neunikla ani informatika, ktorá má od prírody zo všetkých oborov asi najďalej. Algoritmy inšpirované prírodou prinášajú riešenia na problémy, ktoré by sme inými spôsobmi vedeli vyriešiť len za nereálne dlhý čas. Táto časť informatiky ma veľmi zaujala a preto som sa rozhodol nájsť ďalšie využitie pre jeden z týchto algoritmov. Tieto algoritmy sa používajú pre komplexné problémy s veľkým množstvom navzájom sa ovplyvňujúcich premenných. Jedným z takýchto problémov môžu byť optimalizácie rôznych systémov.

Mestská hromadná doprava je systém, ktorý je pre mnoho ľudí veľmi dôležitý, preto sa oplatí investovať čas a námahu do jeho optimalizácie. Keďže aj mne je problém s dlhým čakaním na zastávke alebo preplneným autobusom blízky, rozhodol som sa venovať sa práve jemu.

Cieľom tejto práce je vytvoriť nástroj, ktorý za pomoci genetického algoritmu a používateľských obmedzení nájde čo najoptimálnejší časový rozpis jednej linky mestskej hromadnej dopravy. Zároveň sa tento nástroj bude dať použiť na analýzu už existujúcich rozpisov a ich porovnanie s novými riešeniami. Nástroj bude mať užívateľské rozhranie pre rýchlu manipuláciu so vstupnými dátami a prehľadné zobrazenie výsledkov.

Práca je rozdelená na 8 kapitol vrátane úvodu a záveru, z toho najdôležitejšie sú kapitoly 3 až 6.

Po tomto úvode nasleduje kapitola 2, v ktorej sú vysvetlené základné pojmy potrebné na porozumenie celej práce. Optimalizácia jednotlivých rozpisov pracuje so simulačným modelom, preto je potrebné poznať základy simulácií. V zhladom sa systém mestskej hromadnej dopravy, konkrétne príchody vozidiel na zastávky bola zvolená diskretná simulácia riadená udalosťami. Ďalej je v tejto kapitole vysvetlený genetický algoritmus, jeden z algoritmov inšpirovaných prírodou, ktorý bol zvolený na riešenie problému optimalizácie.

Na zostrojenie simulačného modelu treba najprv vyhodnotiť, ktoré vlastnosti reálneho systému sú pre nás relevantné. V kapitole 3 je popísaná konzultácia s analytikom Dopravného podniku mesta Brno, ktorý poskytol informácie z reálneho života. Popísal postupy a metódy, ktoré sa používajú pre optimalizáciu liniek teraz a vytýčil vlastnosti na ktoré je potrebné sa zamerať.

Zo získaných informácií bol vytvorený simulačný model, ktorého popis, stručné zhrnutie implementácie a jednotlivé experimenty s ním sú popísané v kapitole 4. Výstupy simulačného modelu sú základom pre optimalizáciu časového rozpisu linky. Ide o sériu grafov, na ktorých môže používateľ vidieť vyťaženosť linky v priebehu dňa a naprieč zastávkami. Tieto informácie poslúžili k validácii simulačného modelu a na ohodnotenie jednotlivých rozpisov.

V kapitole 5 je popísaný proces optimalizácie časového rozpisu linky mestskej hromadnej dopravy. Jednotlivé rozpisy ohodnotené na základe informácií získaných zo simulácie sa použijú ako jedinci v genetickom algoritme. Genetický algoritmus bude tieto rozpisy spájať a mutovať, aby našiel čo najlepšie riešenie. Výsledky optimalizácie budú porovnané s pôvodnými rozpismi a ohodnotené.

Samotný program by v praxi nebol moc použiteľný bez používateľského rozhrania. V kapitole 6 je popísaný návrh a implementácia užívateľského rozhrania analytického nástroja. Tento nástroj umožňuje používateľovi jednoducho zadať vstupné dáta, spustiť optimalizáciu a zobraziť výsledky. Jednou z najdôležitejších častí tohto rozhrania je zadávanie používateľských obmedzení, ktoré musí výsledný časový rozpis splňovať.

Predposlednou kapitolou je kapitola 7, ktorá sa zaoberá testovaním celého programu. Nachádzajú sa tu testy na ohodnocovanie jednotlivých časových rozpisov, vrátane krajných situácií, popis testovania optimalizácie a testovanie užívateľského rozhrania. Na konci tejto kapitoly sa nachádza spätná väzba od analytika, ktorý poskytol informácie o reálnom systéme, a to z pohľadu možného budúceho používateľa tohto nástroja.

V závere práce 8 je uvedené zhrnutie výsledkov a možné budúce rozšírenia a vylepšenia nástroja.



## Kapitola 2

### Teoretická část

2.1 DEVS - Discrete Event Simulation System

2.2 Genetický algoritmus

## Kapitola 3

# Relevantné vlastnosti mestskej hromadnej dopravy

Optimalizácia mestskej hromadnej dopravy je veľmi široký pojem a tento úkon sa dá pre viesť v mnoho rôznych smeroch. Preto je dôležité vybrať si tú časť systému, na ktorej sa oplatí pracovať. Pre toto rozhodnutie sú potrebné informácie o reálnom systéme, doterajších postupoch, spôsoboch analýzy a optimalizácie.

### 3.1 Konzultácia s analytikom Dopravného podniku

Pre získanie potrebných informácií som sa obrátil na pána Michaela Kříže, analytika Dopravného podniku mesta Brno. Stretnutie s pánom Křížom prebehlo 7. 10. 2024 v priestoroch dopravného podniku. Vďaka získaným informáciám som sa rozhodol zamerať na analýzu a optimalizáciu časového rozpisu jednej linky mestskej hromadnej dopravy. Optimalizovať viac ako jednu linku naraz by pravdepodobne prinieslo lepšie výsledky, ale to len teoreticky. V praxi by sa to z finančných a časových dôvodov neoplatilo. Zhodli sme sa na tom, že najlepšie bude optimalizovať jednu linku a to iba jedným smerom, pretože druhý smer linky sa dá považovať za samostatnú linku, minimálne v rámci nárokov cestujúcich.

### 3.2 Získané informácie

Informácie, ktoré sú dôležité pre analýzu a optimalizáciu časového rozpisu linky mestskej hromadnej dopravy sú:

- **Počet zastávok** — potrebné pre zostavenie samotného rozpisu aj simulačného modelu, nie je dôležitý len počet, ale aj informácie o jednotlivých zastávkach.
- **Čas potrebný na prejdienie od jednej zastávky k druhej** — tiež je to súčasťou rozpisu, zároveň sa touto informáciou riadi plánovanie udalostí v simulačnom modeli, viac v kapitole 4.
- **Počet odchodov vozidla z jeho prvej zastávky za celý deň** — týmto sa myslí celkový počet vozidiel, respektíve ciest ktoré vozidlá danej linky za deň absolvujú, tento parameter je dôležitý pre optimalizáciu, pre dopravný podnik je výhodné mať čo najmenší počet vozidiel, ktoré sú v prevádzke, šetrí to palivo, údržbu aj ľudské zdroje.

- **Počet odchodov vozidla z jeho prvej zastávky za hodinu** — myslí sa tým jeden riadok v časovom rozpise, mal by byť priamo úmerný priemernému počtu cestujúcich čakajúcich na danú linku v danej hodine.
- **Počet cestujúcich čakajúcich na jednotlivých zastávkach** — najdôležitejší parameter pre optimalizáciu, časový rozpis musí dostatočne uspokojiť potreby všetkých cestujúcich, zároveň je ťažké získať presné hodnoty. Pri reálnom použití by sa mala spraviť štúdia ktorá by tieto hodnoty získala. Na návrh pána Kříže som na testovacie účely použil hodnoty, ktoré sú úmerné počtu odchádzajúcich vozidiel v hodine a kapacite vozidiel, povedal, že linky v Brne sú už celkom dobre naplánované a preto by mali byť tieto hodnoty približne správne. Jedná sa o nemenný vstup optimalizácie, ktorému sa má časový rozpis prispôbiť, preto je teoreticky jedno aké hodnoty budú do systému zadané.
- **Doba čakania na zastávke** — druhý z parametrov podstatných pre optimalizáciu, systém by mal zostrojiť taký rozpis, kedy je celková doba čakania všetkých cestujúcich čo najmenšia.
- **Počet cestujúcich vo vozidle** — tretí dôležitý parameter pre optimalizáciu, vysoká preplnenosť vozidla má za dôsledok nekomfortné cestovanie, na druhej strane, príliš prázdne vozidlo je neefektívne využité zo strany dopravného podniku.
- **Kapacita vozidla** — každé vozidlo prenesie naraz len isté množstvo cestujúcich, zároveň sa od preplnenosti vozidla odvíja komfort cestujúcich.
- **Počet cestujúcich, ktorí nenásúpia kvôli preplnenosti vozidla** — v extrémnych prípadoch môže nastať, že bude vozidlo úplne plné a zvyšní cestujúci musia na zastávke čakať do príchodu ďalšieho vozidla, rozpisy pri ktorých sa toto bude diať budú veľmi negatívne ohodnocované aby sa táto zlá vlastnosť čo najviac eliminova, viac v kapitole o optimalizácii 5.
- **Počet vystupujúcich cestujúcich na jednotlivých zastávkach** — tento parameter je potrebný pre simuláciu, keďže do vozidla s istou kapacitou priebežne nastupuje veľa cestujúcich, musia z neho aj vystupovať, získanie presných hodnôt je ešte ťažšie ako pri predošlých parametroch, preto som sa rozhodol každej zastávke prideliť koeficient dôležitosti, ktorý bude určovať aký podiel cestujúcich vystúpi na danej zastávke. Na prvej zastávke je tento koeficient 0, keďže na nej cestujúci iba nastupujú, na poslednej zastávke je koeficient 1, keďže na nej cestujúci iba vystupujú a na zastávkach medzi nimi sa koeficient mení podľa toho aký podiel cestujúcich na danej zastávke priemerne vystupuje, prestupné zastávky budú mať vyšší koeficient ako tie, ktoré cestujúcich len zbierajú.

Po vytvorení simulačného modelu a implementácii optimalizácie som za pánom Křížom prišiel druhýkrát, ukázať mu výsledky, získať spätnú väzbu a zistiť jeho požiadavky na používateľské rozhranie tohto nástroja.

**TODO navštíviť ho ešte raz a ukázať mu návrh užívateľského rozhrania.**

## Kapitola 4

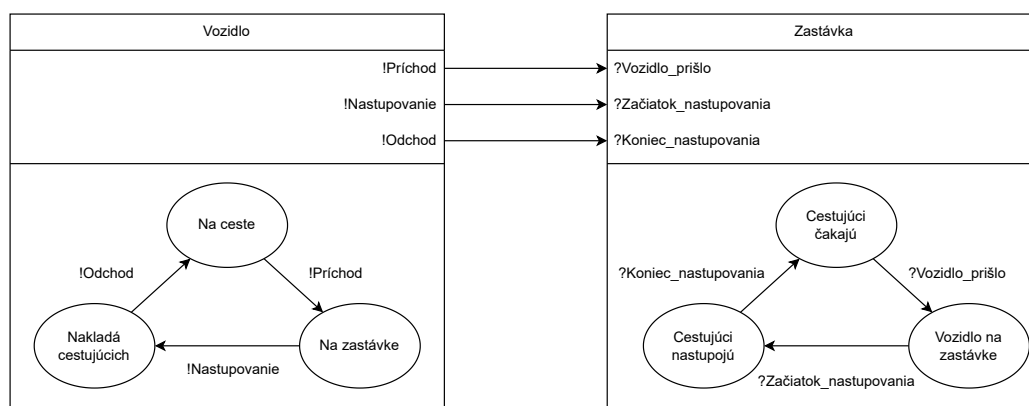
# Simulačný model linky mestskej hromadnej dopravy

Druhým hlavným krokom po získaní potrebných informácií je zostrojenie simulačného modelu. Problém optimalizácie časového rozpisu linky mestskej hromadnej dopravy je veľmi komplexný a vytvoriť program ktorý by ho riešil analyticky by bolo veľmi náročné. Na modelovanie bol použitý formalizmus DEVS (Discrete Event Simulation System), po slovensky diskretná simulácia riadená udalosťami. Ide o typ simulácie, kde sa modelový čas posúva skokovo a to od jednej udalosti k druhej. Viac o tomto formalizme je napísané v kapitole 2.

### 4.1 Popis simulačného modelu

Na začiatok je potrebné definovať základné prvky modelu (viď obrázok 4.1), ich stavy a vzťahy medzi nimi. Simulačný model je zložený z troch hlavných častí, tými sú:

- **Kalendár udalostí** — dôležitý pre plánovanie udalostí v modeli
- **Model zastávky** — dôležitý pre príchod a odchod cestujúcich
- **Model vozidla** — dôležitý pre prepravu cestujúcich medzi zastávkami



Obr. 4.1: Schéma simulačného modelu

V simulácii sa budú nachádzať viaceré inštancie modelu zastávky, každá reprezentujúcu jednu zastávku na linke. Vozidiel bude taktiež viacero, neberieme do úvahy fyzické vozidlá a fakt, že v reálnom živote sa tieto vozidlá na linke v priebehu dňa niekoľkokrát otočia. Dôležitá je trasa, ktorú prejde, preto jedna inštancia modelu vozidla reprezentuje jednu cestu, ktorú vozidlo prejde. Cestujúcich v modeli nie je potrebné reprezentovať ako samostatný model, sú reprezentovaní len jedným číslom, časom kedy prišli na zastávku. Sú súčasťou modelu zastávky, konkrétne tej na ktorej čakajú.

## Kalendár udalostí

Kalendár udalostí je základným prvkom modelu, ktorý riadi priebeh simulácie. V kalendári sú uložené všetky udalosti, ktoré sa majú v modeli stať. Tieto udalosti sú v prípade tohto modelu príchody vozidiel na zastávky. V rámci jednej udalosti sa vykoná rutina obslúženia cestujúcich čakajúcich na zastávke. Všetky udalosti sú naplánované na začiatku simulácie, pretože vďaka časovému rozpisu presne vieme všetky príchody vozidiel na jednotlivé zastávky. Príchody na prvú zastávku sú dané hlavným časovým rozpisom, príchody na ostatné zastávky sú odvodené od času potrebného na prejde z jednej zastávky na druhú. Pseudokód plánovania udalostí je uvedený v algoritme 1. V priebehu simulácie už netreba žiadne ďalšie udalosti plánovať.

---

### Algoritmus 1: Plánovanie udalostí

---

```

1: for čas v časovom rozpise počiatkovej zastávky do
2:   Vytvorí sa vozidlo
3:   for zastávka na linke do
4:     Pridá sa udalosť príchodu vozidla na danú zastávku
5:   end for
6: end for

```

---

Po naplánovaní všetkých udalostí sa začne simulácia. Postupne sa vykonávajú jednotlivé udalosti a simulácia sa diskretné posúva vpred, až kým nie je kalendár udalostí prázdny alebo nie je dosiahnutý koncový čas simulácie. Pseudokód riadenia simulácie je popísaný v algoritme 2.

---

### Algoritmus 2: Simulácia riadená udalosťami

---

```

1: while kalendár udalostí nie je prázdny do
2:   Vyberie sa udalosť s najmenším časom v kalendári
3:   Udalosť sa odstráni z kalendára
4:   if čas udalosti > koncový čas simulácie then
5:     Simulácia končí
6:   end if
7:   Modelový čas sa nastaví na čas udalosti
8:   Udalosť sa vykoná
9: end while

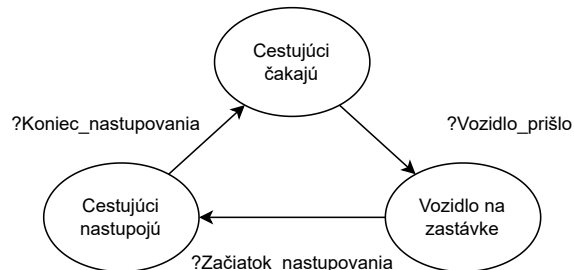
```

---

Pre potreby časového rozpisu stačí simulovať jeden deň, v prípade rôznych rozpisov v čase pracovných dní a v čase sviatkov a víkendov ide o kompletne iný rozpis, ktorý sa musí simulovať a optimalizovať samostatne. Všetky naplánované udalosti by mali byť v rámci jedného dňa, preto by simulácia mala končiť vždy vyprázdnením kalendára udalostí a nie prekročením koncového času.

## Model zastávky

Model zastávky slúži na reprezentáciu jednotlivých zastávok na linke. Každá reálna zastávka je v systéme ako samostatná inštancia modelu zastávky. Je pasívna, to znamená, že jej vnútorný stav sa plne odvíja od prichádzajúcich vonkajších signálov.



Obr. 4.2: Stavový automat modelu zastávky

Ako je vidieť na obrázku 4.2, model zastávky má tri stavy:

- **Cestujúci čakajú** — na zastávke nie je žiadne vozidlo
- **Vozidlo na zastávke** — na zastávku práve prišlo vozidlo
- **Cestujúci nastupujú** — cestujúci nastupujú do vozidla

Dôležitejšie sú však vstupné signály, ktorými je celý stavový automat riadený. Zároveň sa pri prechodoch medzi stavmi vykonávajú akcie pre obsluhu cestujúcich.

Vstupný signál **?Vozidlo\_prišlo** mení vnútorný stav zastávky z **Cestujúci čakajú** na **Vozidlo na zastávke**. Taktiež sa vypočíta dĺžka intervalu medzi posledným príchodom vozidla a terajším príchodom. Tento údaj slúži pre vygenerovanie prichádzajúcich cestujúcich.

Vstupný signál **?Začiatok\_nastupovania** mení vnútorný stav zastávky z **Vozidlo na zastávke** na **Cestujúci nastupujú**. Pri tomto prechode sa vygenerujú časy všetkých cestujúcich, ktorí prišli od posledného príchodu vozidla.

Vstupný signál **?Koniec\_nastupovania** mení vnútorný stav zastávky z **Cestujúci nastupujú** na **Cestujúci čakajú**. Prepíše sa čas posledného príchodu vozidla.

## Generovanie cestujúcich

Cestujúci sa generujú na základe exponenciálneho rozdelenia s parametrom  $\lambda$ . Tento parameter je v rámci jednej zastávky každú hodinu iný, pretože počet prichádzajúcich cestujúcich sa v priebehu dňa mení. V algoritme 3 je popísaný proces generovania cestujúcich na zastávke.

---

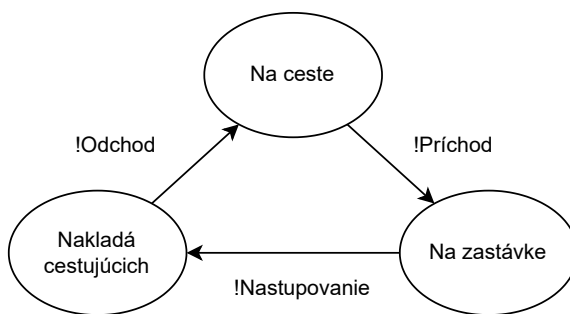
**Algoritmus 3:** Generovanie cestujúcich

---

- 1: získanie  $\lambda$  pre danú zastáku a hodinu
  - 2: **while** modelový čas < čas príchodu autobusu **do**
  - 3:   vygenerovanie času príchodu cestujúceho
  - 4:   pridanie cestujúceho do fronty
  - 5:   zmena modelového času na čas príchodu cestujúceho
  - 6: **end while**
-

## Model vozidla

Každé vozidlo, respektíve jedna trasa ktorú vozidlo podľa časového rozpisu prejde, je reprezentovaná jednou inštanciou modelu vozidla. Model vozidla je na rozdiel od modelu zastávky aktívnym prvkom, nemá žiadne vstupné signály, iba výstupné. Tieto výstupné signály sú prepojené so vstupnými signálmi modelu zastávky ako je vidieť na obrázku 4.1.



Obr. 4.3: Stavový automat modelu vozidla

Na obrázku 4.3 je vidieť stavový automat modelu vozidla. Model vozidla má tri stavy:

- **Na ceste** — vozidlo sa pohybuje medzi zastávkami
- **Na zastávke** — vozidlo práve prišlo na zastávku
- **Nakladá cestujúcich** — vozidlo nakladá cestujúcich

Výstupný signál **!Príchod** mení vnútorný stav vozidla z **Na ceste** na **Na zastávke**. Pri tomto prechode vystúpia cestujúci podľa koeficientu zastávky na ktorú vozidlo práve prišlo. Napríklad ak je vo vozidle 100 cestujúcich a koeficient zastávky je 0.7, pretože sa jedná o prestupnú zastávku, vystúpi 70 cestujúcich.

Výstupný signál **!Nastupovanie** mení vnútorný stav vozidla z **Na zastávke** na **Nakladá cestujúcich**. Zastávka, na ktorej sa vozidlo práve nachádza tento signál zachytí a vygeneruje nových cestujúcich. Pokiaľ to dovoľuje kapacita vozidla, všetci cestujúci nastúpia. V opačnom prípade nastúpia len tí, ktorí prišli skôr a tí čo prišli neskôr musia ostať čakať na ďalšie vozidlo.

Výstupný signál **!Odchod** mení vnútorný stav vozidla z **Nakladá cestujúcich** na **Na ceste**. Informuje sa príslušná zastávka a nič viac sa pri tomto prechode nevykonáva.

## Obsluha zastávky

Každé vozidlo začína na prvej zastávke v rozpise, ale počas simulácie sa musí pohybovať medzi zastávkami. Proces ktorý vozidlo vykoná pri príchode na každú zastávku je popísaný v algoritme 4.

---

### Algoritmus 4: Obsluha zastávky

---

- 1: prepojenie výstupných signálov vozidla so vstupnými signálmi zastávky
  - 2: aktivácia výstupného signálu **!Príchod**
  - 3: aktivácia výstupného signálu **!Nastupovanie**
  - 4: aktivácia výstupného signálu **!Odchod**
-

## Udalosť príchodu vozidla na zastávku

V rámci jednej udalosti sa vykoná rutina obsluhy cestujúcich, ktorí čakajú na zastávke. Táto rutina je popísaná v algoritme 4. Parametre tejto udalosti sú:

- **Čas príchodu** — čas, kedy vozidlo prichádza na zastávku
- **Zastávka** — zastávka, na ktorej sa udalosť vykonáva
- **Vozidlo** — vozidlo, ktoré prichádza na zastávku

Vozidlo začína udalosť v stave **Na ceste**, príde na zastávku uvedenú v parametri udalosti, vykoná rutinu nástupu a výstupu cestujúcich a odíde na ďalšiu zastávku. Za jednu udalosť teda vozidlo prejde všetkými svojimi vnútornými stavmi, udalosť končí v opačnom stave **Na ceste**. Zastávka ktorá je uvedená v parametri udalosti tiež prejde všetkými svojimi vnútornými stavmi na základe posielaných signálov od vozidla.

## 4.2 Implementácia simulačného modelu

Simulačný model je implementovaný v jazyku Python bez využitia externých knižníc. Trieda `EventCalendar` obsahuje kód základných operácií nad kalendárom udalostí:

- `isEmpty()` — vráti `True` ak je kalendár udalostí prázdny, inak `False`
- `addEvent(event)` — pridá udalosť do kalendára
- `getNextEvent()` — vráti udalosť s najmenším časom v kalendári a odstráni ju z kalendára

Trieda `Event` reprezentuje jednu udalosť. Obsahuje:

- metóda `__call__()` — vykoná akciu
- atribúty `action` a `actionArgument`

len metódu `__call__()`, ktorá vykoná udalosť uloženú v atribúte `action` s argumentami volania uloženými v `actionArgument`.

Modelový čas je implementovaný v triede `SimulationTime`. Obsahuje:

- metódy `forward(time)` a `getHour()`
- atribúty `startTime`, `currentTime` a `endTime`

Trieda `BusStop` reprezentuje jednu zastávku, rovnako tak trieda `Bus` reprezentuje jedno vozidlo. Tieto dve triedy sú písané podľa vzoru DEVS formalizmu. Obsahujú stavy, vstupné a výstupné signály a metódy, v ktorých sa nachádzajú akcie pre jednotlivé prechody medzi stavmi. Cestujúci sú uložení ako pole čísel, časov ich príchodu, v jednotlivých zastávkach v atribúte `waitingPassangersArrivalTimes`.

Na generovanie náhodného príchodu cestujúcich slúži trieda `RandomNumberGenerator`, ktorá obsahuje statické metódy na generovanie náhodných čísel.

Zber a agregácia štatistík (viď kapitola 4.3) sú implementované v triedach `Statistics`, `BusStatistics` a `BusStopStatistics`.

Podrobnejšie informácie o kóde sa nachádzajú v programovej dokumentácii, v prílohe A. Programová dokumentácia bola vygenerovaná pomocou nástroja Sphinx.



### 4.3 Výstupy simulačného modelu

Hlavný zmysel simulácie je zber informácií, ktoré by sme inak museli získať z pozorovania reálnej prevádzky linky. Efektivitu každého jedného časového rozpisu, ktorý program vytvorí je potrebné otestovať a ohodnotiť aby sme našli ten najlepší z nich, skôr ako ho začneme používať v reálnej prevádzke. Na ohodnotenie jednotlivých rozpisov slúžia štatistiky získané počas simulácie. Štatistiky sa zbierajú pre každú zastávku aj pre každý autobus osobitne. Následne sa agregujú do jedného objektu **Statistics**, ktorý obsahuje:

- **totalNumberOfBuses** — počet spojov v priebehu dňa na linke
- **busStopStatistics** — agregované štatistiky zastávok
- **busStatistics** — agregované štatistiky vozidiel

Trieda **busStopStatistics** slúži na ukladanie informácií o jednotlivých zastávkach, ale ako bolo spomenuté vyššie tak aj na uloženie agregovaných dát. Táto trieda slúži na zber nasledujúcich informácií:

- **totalPassengersArrived** — počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku za celý deň
- **totalPassengersDeparted** — počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke za celý deň
- **totalPassengersWaitingForNextBus** — počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj
- **totalTimeSpentWaiting** — celkový čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke
- **totalPassangersLeftUnboarded** — počet cestujúcich, ktorých po celom dni nezobral žiaden spoj
- **passengersArrivedPerHour** — počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku v jednotlivých hodinách
- **passengersDepartedPerHour** — počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke v jednotlivých hodinách
- **passengersWaitingForNextBusPerHour** — počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj v jednotlivých hodinách
- **timeSpentWaitingPerHour** — čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke v jednotlivých hodinách

Trieda **busStatistics** má rovnaký účel ako trieda **busStopStatistics**, ale pre vozidlá. Zbiera informácie:

- **capacity** — kapacita vozidla
- **averageLoad** — priemerná naplnenosť vozidla
- **averageLoadInPercent** — priemerná naplnenosť vozidla v percentách
- **totalPassengersTransported** — celkový počet prevezených cestujúcich
- **loadPerBusStop** — naplnenosť vozidla na jednotlivých zastávkach
- **loadInPercentPerBusStop** — naplnenosť vozidla na jednotlivých zastávkach v percentách

### **Počet spojov v priebehu dňa na linke**

Tento údaj slúži pre optimalizáciu, z pohľadu dopravného podniku chceme, aby bol počet spojov čo najmenší aby ušetrili na prevádzkových nákladoch. Z pohľadu cestujúcich chceme aby bol počet spojov čo najväčší, aby nemuseli čakať na spoj dlhšie ako je nutné. Je potrebné nájsť kompromis medzi týmito dvoma extrémami.

### **Počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku za celý deň**

Celkový počet cestujúcich za deň je dobrým indikátorom toho, ako sú namáhané jednotlivé časti linky. V prípadoch, kedy na zastávky v strede trasy prichádza oveľa viac cestujúcich ako na koncové zastávky, posilňuje dopravný podnik práve túto strednú časť ďalšími spojmi. Tieto spoje však na koncové zastávky už nechodia.

### **Počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke za celý deň**

Je potrebné aby sme v rámci simulácie ráтали aj s cestujúcimi, ktorí z vozidiel vystupujú, inak by sa kapacita vozidla hneď naplnila. Ide o dôležitú časť reálneho systému, ktorú nemôžeme zanedbať ani pri simulácii. Slúži na validáciu modelu.

### **Počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj**

Občas sa stane, že je vozidlo tak preplnené, že nie všetci cestujúci, ktorí čakali na zastávke do neho nastúpia. V reálnom živote ide asi o subjektívny pocit, či nastúpiť alebo nie. V simulačnom modeli cestujúci prestanú nastupovať v momente keď naplnenosť vozidla dosiahne jeho maximálnu kapacitu. Rozpisy, pri ktorých sa tento jav vyskytne budú mať horšie hodnotenie.

### **Celkový čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke**

Z pohľadu optimalizácie chceme, aby bol tento čas čo najnižší. Príliš dlhé čakanie na zastávke bude rozpisy ohodnocovať negatívne. V prípade, že cestujúci musel čakať na ďalší spoj, tento čas bude ešte dlhší. Treba rátať aj s cestujúcimi, ktorí na zastávku prídu tesne pred odchodom vozidla. Napríklad ak chodí spoj dvakrát za hodinu, je oveľa vyššia pravdepodobnosť, že cestujúci nepríde v náhodný čas, ale svoj príchod na zastávku si naplánuje.

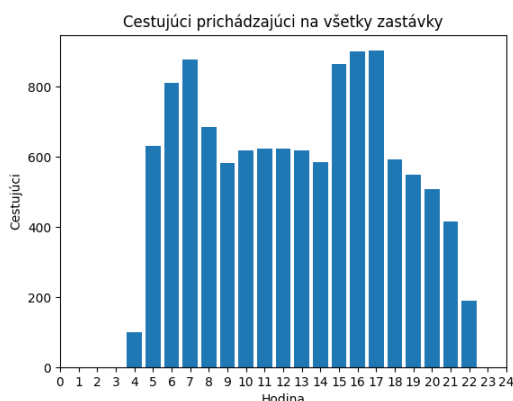
### **Počet cestujúcich, ktorých po celom dni nezobral žiaden spoj**

Podobne ako v prípade cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj, aj týchto cestujúcich by sme mali rátať a rozpis by mal byť ohodnotený veľmi negatívne. Tento jav by mohol v reálnom svete nastať asi iba ak by cestujúci išiel na posledný spoj v dni a toto vozidlo by bolo úplne preplnené. Ale keďže optimalizácia v tomto programe je riešená genetickým algoritmom, je veľká šanca že sa tento jav vyskytne častejšie. Táto vlastnosť je nežiaduca a je potrebné ju eliminovať.

### **Počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku v jednotlivých hodinách**

Tento údaj má skôr informatívny charakter, pretože ide o vstup programu. Algoritmus sa snaží vytvoriť rozpis, ktorý by bol schopný prepraviť všetkých cestujúcich. Na grafe 4.4 je vidieť, že v priebehu dňa sa počet cestujúcich prichádzajúcich na zastávku mení. Obzvlášť

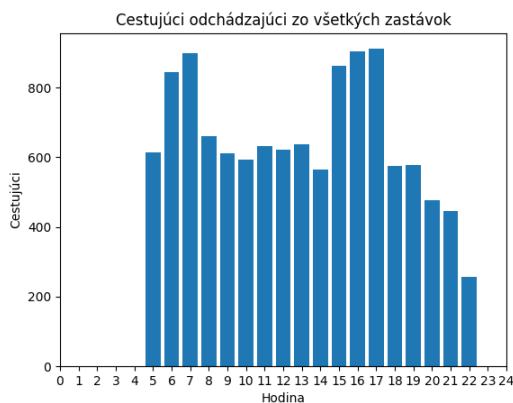
v ranných a poobedných hodinách je tento počet výrazne vyšší ako počas dňa. V týchto časoch by malo chodiť viac spojov.



Obr. 4.4: Počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku v jednotlivých hodinách

### Počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke v jednotlivých hodinách

Ide o rovnaký údaj ako bol počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke za celý deň, ale rozdelený na jednotlivé hodiny dňa. Je vidieť, že graf 4.5 má podobný tvar ako graf 4.4. To je správne, pretože počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke by mal byť rovnaký ako počet cestujúcich, ktorí prišli na zastávku. Mohlo by sa stať, že tieto dve hodnoty by sa líšili, v prípade, že ostatnú cestujúcich, ktorí sa v priebehu dňa nezmestili do žiadneho vozidla.

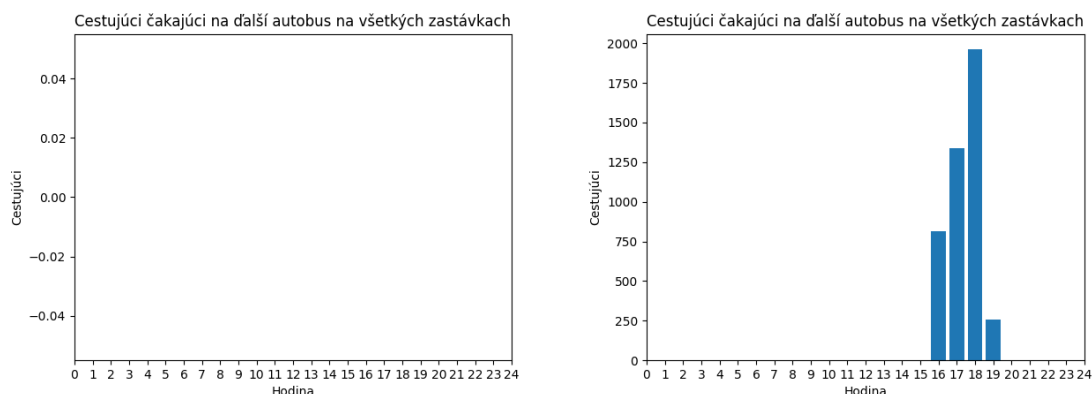


Obr. 4.5: Počet cestujúcich, ktorí vystúpili na zastávke v jednotlivých hodinách

### Počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj v jednotlivých hodinách

Na ľavej strane grafu 4.6 je vidieť, že v priebehu dňa žiaden z cestujúcich nemusel čakať na ďalší spoj. Toto je ideálny stav. Na pravej strane grafu 4.6 je vidieť, že v priebehu dňa sa počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj mení. Ráno a okolo obeda nemusel na

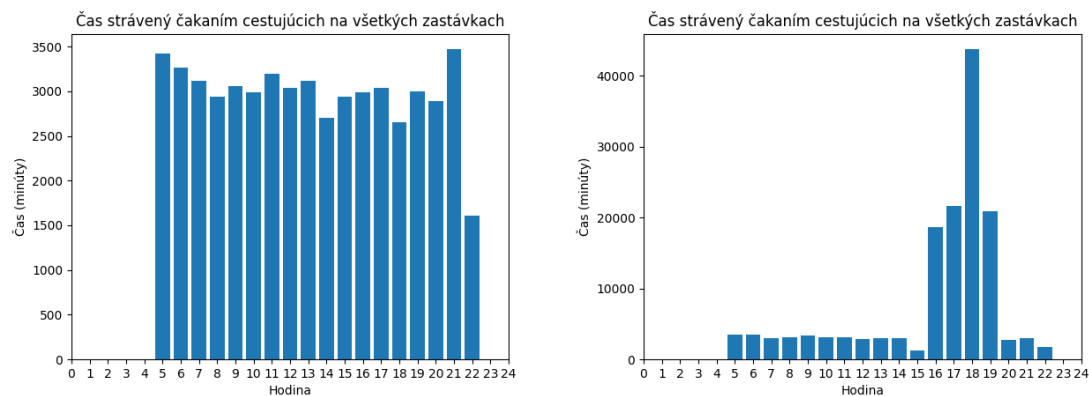
ďalší spoj čakať nikto, ale v poobednej špičke je vidieť zjavný nedostatok spojov, pretože cestujúci musia čakať na ďalší spoj.



Obr. 4.6: Počet cestujúcich, ktorí museli čakať na ďalší spoj v jednotlivých hodinách

### Čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke v jednotlivých hodinách

Čas strávený čakaním na zastávke by mal byť počas celého dňa približne rovnaký. Na ľavej strane grafu 4.7 je tento optimálny stav vidieť. Bez ohľadu na to, kedy cestujúci prídu na zastávku, čakajú na spoj rovnako dlho. Naopak na pravej strane grafu 4.7, ktorý je výstupom rovnakej simulácie ako pravá strana grafu 4.6, je zrejmé, že čas čakania na zastávke sa v poobedných hodinách výrazne zvýšil práve kvôli tomu, že cestujúci museli čakať na ďalší spoj.



Obr. 4.7: Čas, ktorý cestujúci strávili čakaním na zastávke v jednotlivých hodinách

### Kapacita vozidla

Tento parameter je dôležitý, pretože na základe neho sa rozhoduje, koľko cestujúcich môže nastúpiť do vozidla. Zároveň slúži pre výpočet naplnenosti vozidla v percentách. Príliš malá alebo príliš veľká naplnenosť vozidla môže byť nežiaduca. Na ohodnotenie toho, ako moc je vozidlo naplnené teda treba poznať aj jeho kapacitu.

## Priemerná naplnenosť vozidla

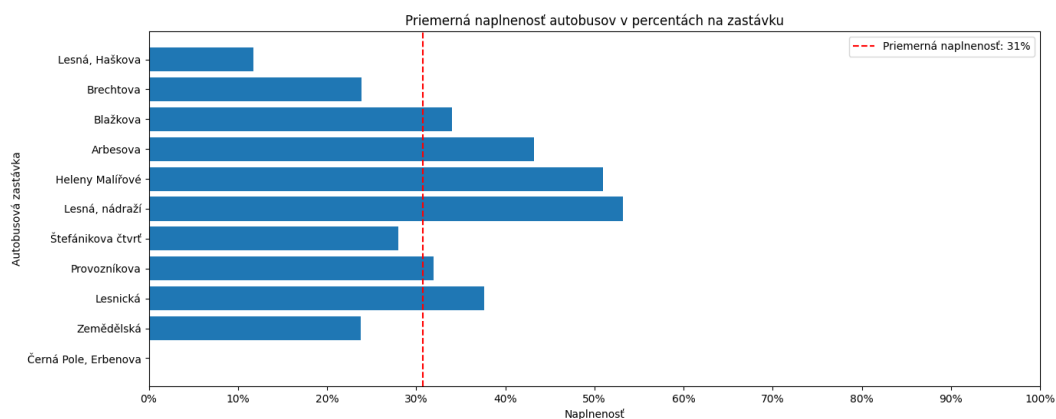
Priemerná naplnenosť vozidla je dôležitý parameter, ktorý nám hovorí, ako moc sú vozidlá využívané. Z pohľadu cestujúcich je lepšie, ak je vozidlo prázdnejšie, ale z pohľadu dopravného podniku je to nevyužitý potenciál. Preto je potrebné nájsť kompromis medzi týmito dvoma požiadavkami. To aká naplnenosť je optimálna je už úlohou analytika, ktorý bude tento program využívať. Povedzme, že sa rozhodne pre naplnenosť 70%. Potom čím ďalej bude priemerná naplnenosť vozidiel od tejto hodnoty, tým horšie bude rozpis ohodnotený.

## Celkový počet prevezených cestujúcich

Celkový počet prevezených cestujúcich závisí od toho, koľko cestujúcich prišlo na jednotlivé zastávky a či sa im podarilo nastúpiť do vozidiel. V ideálnom prípade sa tento počet bude rovnať počtu cestujúcich, ktorí prišli na zastávky. V extrémnych prípadoch sa môže stať, že niektorí cestujúci zostanú na zastávkach a nezoberie ich žiadne vozidlo. V prípade štatistiky jednotlivých vozidiel, môže byť tento počet použitý na ich porovnanie. Počas dňa by mali všetky vozidlá prepraviť približne rovnaký počet cestujúcich. Ak tomu tak nie je a sú vyťažené nerovnomerne, rozpis by sa mal ohodnotiť negatívne.

## Naplnenosť vozidla na jednotlivých zastávkach

Na grafe 4.8 je znázornené ako sa naplnenosť vozidiel mení počas ich jazdy. Konkrétne sa jedná o linku 46 v Brne. Naplnenosť sa postupne zvyšuje až kým nepríde na jednu z hlavných prestupných zastávok, Štefánikova čtvrt. Tu vystúpi veľké množstvo cestujúcich a naplnenosť vozidla sa zníži. Pokiaľ má linka príliš veľké výkivy v naplnenosti vozidiel naprieč svojou trasou, môže to byť znakom toho, že je potrebné trasu na určitých úsekoch posilniť inou linkou.



Obr. 4.8: Priemerná naplnenosť vozidla na jednotlivých zastávkach

## Kapitola 5

# Optimalizácia časového rozpisu linky mestskej hromadnej dopravy

- 5.1 Vstupné obmedzenia zo strany používateľa
- 5.2 Implementácia genetického algoritmu
- 5.3 Výsledky optimalizácie

## Kapitola 6

# Užívateľské rozhranie analytického nástroja

6.1 Návrh užívateľského rozhrania

6.2 Implementácia užívateľského rozhrania

## Kapitola 7

# Testovanie

- 7.1 Testovanie ohodnocovania jednotlivých rozpisov
- 7.2 Testovanie optimalizácie jedného rozpisu
- 7.3 Testovanie užívateľského rozhrania
- 7.4 Spätná väzba od analytika



## Kapitola 8

## Záver

# Literatúra

**Príloha A**

**Programová dokumentácia**