

# FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Technická zpráva k projektu IMS

2.12.2017

Vích Štěpán    xvichs00  
Rešovský Martin    xresov00

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
1.1	Dělbba práce . . . . .	2
1.2	Odborná literatura . . . . .	2
1.3	Validita modelu . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Rozbor tématu a použitých metod</b>	<b>2</b>
2.1	Použité postupy . . . . .	2
2.2	Zdroje informací . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Koncepce simulátoru</b>	<b>3</b>
3.1	Konceptuální model . . . . .	3
3.2	Přechodová funkce . . . . .	4
3.3	Módy semaforů . . . . .	5
3.4	Metriky modelu . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Architektura simulátoru</b>	<b>6</b>
4.1	Mapování modelu na simulátor . . . . .	6
4.2	Spouštění simulátoru . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Experimentování</b>	<b>6</b>
5.1	Postup experimentování . . . . .	6
5.2	Dokumentace experimentů . . . . .	6
5.2.1	Experiment č. 1 . . . . .	6
5.2.2	Experiment č. 2 . . . . .	7
5.2.3	Experiment č. 3 . . . . .	8
5.2.4	Experiment č. 4 . . . . .	9
5.2.5	Experiment č. 5 . . . . .	10
5.2.6	Experiment č. 6 . . . . .	11
5.3	Závěry experimentů . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>12</b>

# 1 Úvod

Tato práce je založena na článku Optimizing Traffic Lights in a Cellular Automaton Model for City Traffic[3], která popisuje netriviální problematiku optimalizace doby přepínání světelných semaforů pomocí 2D celulárního automatu[9]. Cílem práce je validovat[7] a implementovat model[4] publikovaný v článku. Dále najít souvislosti mezi jednotlivými parametry modelu jako je perioda přepínání světél, strategie přepínání světél, počtu křižovatek  $N$  v systému[6], průměrné rychlosti a průměrného toku v systému a dalších parametrů které budou představeny v této zprávě. Těchto cílů dosáhneme pomocí experimentů[5], kdy zjistíme chování jednotlivých strategií přepínání světél v závislosti na periodě přepínání světél  $T$ , hustotě dopravy  $\rho$  v systému, počtu křižovatek v systému  $N$  a dalších parametrech představených dále. Dokumentace je vysázena v systému  $\text{\LaTeX}$ .

## 1.1 Dělb práce

Práce byla rozdělena mezi dvoučlenný tým následovně. První člen (xvichs00) pracoval na hledání vhodného článku pro základ modelu, tvorbu výsledného modelu a implementaci modelu. Druhý člen týmu (xreskov00) pracoval na experimentování s modelem, tvorbě experimentů a tvorbě dokumentace.

## 1.2 Odborná literatura

Celý model a experimentování je založeno na článku[3] o optimalizaci dopravní sítě, publikovaného v roce 2008. Tento článek spojuje modely NS[1][12] a BML[2], publikované dříve a vytváří komplexnější 2D celulární automat, který popisuje síť dopravních cest, křižovatek se semaforey a pohyb automobilů na těchto silnicích a křižovatkách.

## 1.3 Validita modelu

Můžeme říci, že model je validní[7], pokud se výsledky experimentů, alespoň z části shodují s výsledky publikované v článku[3], ze kterého vychází tento projekt. Toto dokážeme při provedení a analýze výsledků z prvních dvou experimentů z kapitol 5.2.1 a 5.2.2. Také se na systém můžeme podívat pomocí velmi zjednodušené simulace[8] (spustíme příkazem `make run`) a vidíme, že i po několika tisících iteracích je průměrná rychlost automobilů stále přijatelná a v rozumných mezích.

# 2 Rozbor tématu a použitých metod

Systém, který modelujeme se v realitě skládá z automobilů, cest a křižovatek se světly, které tyto cesty spojují. Mezi další fakta patří to, že každý automobil má svou aktuální rychlost (nejčastěji vyjádřenou pomocí jednotky  $km/h$ ), rychlost průměrnou a rychlost maximální (ta je dána v Českých městech zákonem na  $50km/h$ ). Na silnici se také vyskytují chodci, kteří do ní vstupují buďto přímo a nebo více "solistikovaněji" přes přechody pro chodce. Jednotlivé křižovatky jsou od sebe vzdáleny přibližně 500 až 800 metrů, pokud se jedná o systém na sebe napojených křižovatek (jinak je v systému jen jedna křižovatka). V realitě jezdí automobily po silnici ve dvou směrech a na křižovatkách mohou měnit směry. Ve výjimečných případech dochází k nehodám a kolizím mezi automobily. Automobily také nejezdí v konstantních rychlostech, ale dochází k zpomalování a zrychlování, buďto kvůli semaforům, nebo kvůli náhodným či výše popsaným událostem.

Semaforey se přepínají v časových intervalech popřípadě dynamicky kdy systém sbírá data z různých senzorů a podle získaných informací mění světelné značení. Mezi oznamovací barvy systému patří červená (stání), oranžová (rozjíždění) a zelená (volno, křižovatka je průjezdná).

## 2.1 Použité postupy

Pro implementaci jsme použili programovací jazyk C++, standard c++11. Pro zobrazení grafů z dat jsme využili shellový nástroj gnuplot.

## 2.2 Zdroje informací

Původem těchto informací je především vědecký článek, ze kterého vychází tato práce a poté další zdroje[1][2]. Dále jsou to křižovatky v jakémkoliv městě, které jsou od sebe vzdáleny několik set metrů a poskytují dobré místo pro sledování průměrného času přepínání světla v křižovatce. Pro nástroj gnuplot jsme se rozhodli jelikož je nainstalován na serveru merlin a dovoluje zobrazit naměřená data ve 2D grafu, jednoduchým způsobem.

## 3 Koncepce simulátoru

V této části je podáno vysvětlení, které části reality zanedbáváme a které nikoliv. Jsou zde popsány parametry modelu, popsání stavů buněk celulárního automatu a popsání přechodové funkce[10] 2D celulárního automatu.

Mezi reálné faktory ovlivňující model, které zanedbáváme je jízda automobilů ve dvou směrech a jejich odbočování do více směrů. Automobily jezdí stále rovně v jednom směru. Dále jsou všechny pravděpodobnosti události sloučeny do jednoho pravděpodobnostního koeficientu  $R$ , který určuje míru událostí, které zpomalují dopravu. Tento koeficient je zahrnut v přechodové funkci automatu (konkrétně pravidlo 3.) Každému automobilu zůstane jeho aktuální rychlost která je reprezentovaná celočíselnou hodnotou  $vN$ . Tato hodnota je omezena intervalem od 0 do maximální rychlosti  $vMax$ . Vzdálenost mezi křižovatkami je dána celočíselným parametrem  $D$  a směr jednotlivých cest je vyjádřen osou  $x$  a osou  $y$ . Křížení těchto cest poté vytvoří křižovatky, kde se křížují auta a je nutno nasadit semaforey pro kontrolu dopravy. U semaforu se vypouští oranžová barva a rozjíždění a zpomalování před semaforem nebo jiným autem je nahrazeno přechodovým pravidlem 1. a 2. v přechodové funkci automatu. Jelikož se zde nenachází žádné procesy a systém lze zobrazit z ptací perspektivy, bez ztráty informací je nejvhodnější pro vymodelování použít 2D celulární automat s čtvercovým typem buňky.

### 3.1 Konceptuální model

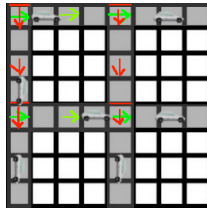
Náš 2D celulární automat je tvořen buňkami[11], které mají několik vlastností, tyto vlastnosti tvoří dohromady jeden z konečného počtu stavů buňky. Nejdůležitější z vlastností je určení zda buňka reprezentuje automobil nebo křižovatku. V našem modelu se na křižovatce může v jednom časovém okamžiku vyskytovat pouze jeden automobil, proto může být buňka jak automobil, tak křižovatka naráz. Pokud je buňka automobil, je důležité ukládat směr cesty automobilu. Automobil se může v našem modelu pohybovat zleva doprava, nebo shora dolů, jiným směrem ne. Pokud přejede okraj automatu, objeví se na druhé straně. Tímto je zajištěna konzistence automobilů v modelu a během simulací.

Mezi další důležité parametry modelu patří:

- $N$  Parametr značící počet silnic v jednom směru 2D automatu. Počet křižovatek v modelu se poté vypočte pomocí vzorce  $N * N$ . Vychází z toho, že v automatu je  $N$  silnic a  $N * N$ . Minimální hodnota tohoto parametru je 1.
- $D$  Udává počet buněk mezi jednotlivými křižovatkami, přičemž započítává do počtu i samotnou křižovatku od které se vzdálenost počítá. Minimální hodnota tohoto parametru je 1. Pokud je hodnota 1 je model redukován na jednoduchý BML model[2].
- $L$  Udává rozměr automatu. Vypočte se jako  $L = N * D$ . Již při malých hodnotách  $N$  a  $D$  dostáváme poměrně velké 2D automaty. Celkový počet buněk v automatu je pak  $L^2$ .
- $\rho$  Značí hustotu provozu v systému. Nabývá desetinných hodnot od 0 do 1. Od této proměnné se vypočítává počet automobilů v systému  $Nv$ .
- $Nv$  Počet automobilů v systému. Vypočte se podle vztahu  $Nv = (N * N * (2 * D - 1)) * \rho$ . Tyto automobily se poté rovnoměrně rozprostou na jednotlivé silnice. První činitel vzorce představuje počet buněk v systému, které reprezentují silnice. Druhý činitel tento počet zmenší na požadovanou velikost hustoty automobilů v systému.
- $Nx$  Počet automobilů v systému, které se pohybují zleva doprava. Jedná se o polovinu  $Nv$ . Pokud je  $Nv$  liché je zbylý automobil přidán do osy  $y$ .
- $Ny$  Počet automobilů v systému, které se pohybují shora dolů. Jedná se o polovinu  $Nv$ . Pokud je  $Nv$  liché je zbylý automobil přidán do tohoto směru (osy).

- $vMax$  Maximální rychlost automobilů v systému. V této práci je maximální rychlost nastavena na hodnotu 5. Vysvětlení je v podkapitole o metrikách systému.3.4
- $T$  Perioda přepínání světel. Jedním z cílů této práce je najít optimální periodu pro přepínání světel. Nabývá celočíselných hodnot větších než 0.
- $R$  Pravděpodobnostní koeficient. Nabývá desetinných hodnot od 0 do 1. Čím větší, tím je systém více stochastický. Pokud je jeho hodnota 0, je systém naprosto deterministický.
- $i$  Počet iterací (přechodů celulárního automatu), které provedeme v simulaci. Při experimentech obvykle používáme okolo 10000 iterací na jednu simulaci.

V počátečním stavu jsou automobily rovnoměrně rozmístěny na silnici a jsou jim přiřazeny náhodné počáteční rychlosti. Automobily nejsou umístěny v počátečním stavu na křižovatky. Semaforům jsou nastaveny jejich cykly na hodnotu 0 (pro strategii Synchronized), popřípadě u strategie Green Wave na hodnotu danou vzorcem 1 (vysvětleno v kapitole 3.3) nebo náhodnou hodnotou v rozmezí od 0 do  $2 * T$  pro strategii Randomized. V počátečním stavu je průchozí směr zleva doprava. Pokud je počáteční hodnota cyklu větší než  $T$  je tento směr změněn (semafony se přepnou). Na obrázku (1) je vidět ukázka jednoduchého modelu systému kdy  $N = 2$ ,  $D = 3$  a  $\rho = 0.25$  (počet automobilů tedy bude 7).



Obrázek 1: Jednoduchý celulární automat

### 3.2 Přechodová funkce

Pro definici přechodové funkce si musíme definovat hodnoty  $dN$  a  $sN$ . Hodnota  $dN$  značí vzdálenost od následujícího auta (pokud je automobil jednu buňku před námi je vzdálenost 1). Hodnota  $sN$  značí vzdálenost k nejbližšímu semaforu (pokud stojíme před semaforem, je vzdálenost 1). Přechodová funkce celulárního automatu je pak definována následovně (pravidla se musí provádět v pevném pořadí, paralelně na všechny buňky):

- Krok 1: Akcelerace automobilu

$$vN \rightarrow \min(vN + 1, vMax)$$

- Krok 2: Brždění automobilu

- Semafor před automobilem má červenou:

$$vN \rightarrow \min(vN, dN - 1, sN - 1)$$

- Semafor před automobilem má zelenou:

Dvě následující buňky za semaforem jsou obsazeny:

$$vN \rightarrow \min(vN, dN - 1, sN - 1)$$

jinak:

$$vN \rightarrow \min(vN, dN - 1)$$

- Krok 3: Provedení kroku s pravděpodobností  $R$

$$vN \rightarrow \max(vN - 1, 0)$$

- Krok 4: Pohyb automobilu

$$xN \rightarrow xN + vN$$

- Krok 5: Zvýšení cyklu u křižovatky

- Cyklus křižovatky je menší než hodnota  $2 * T$ :

$$cyklus \rightarrow cyklus + 1$$

- Cyklus křižovatky je roven nebo je větší než hodnota  $2 * T$ :

$$cyklus \rightarrow 0$$

- Krok 6: Přepnutí světla u křižovatky

- Světlo na křižovatce je červené a hodnota cyklus je rovna 0 nebo T:

$$svetlo \rightarrow zelena$$

- Světlo na křižovatce je zelené a hodnota cyklus je rovna 0 nebo T:

$$cyklus \rightarrow cervena$$

Druhý krok je rozšířen o kontrolu proti gridlocku[14], tedy situaci kdy by se automobil nemohl dostat z křižovatky a bránil by vjezdu dalších automobilů. O přepínání semaforů se starají pravidla č. 5 a 6, která v původním modelu nebyla napsána.

### 3.3 Módy semaforů

V této práci budeme rozebírat a experimentovat s třemi módy synchronizace světelných křižovatek. První je kompletní synchronizace kdy se každý semafor každé křižovatky přepíná ve stejný okamžik. Tento mód se nazývá synchronní (označení strategie SYNCHRONIZED). V dalším módu se všech nastaví opoždění přepnutí od původního cyklu. Při správném nastavení opoždění lze dosáhnout efektu "zelené vlny", kdy se jednotlivé pohybující automobily mohou přesouvat ve vlnách značící zelenou na semaforu po celém systému bez zastavení (označení strategie GREEN\_WAVE). Budeme také zkoumat systém ve kterém je opoždění semaforu rozděleno každé křižovatce náhodně v intervalu  $2T$  (označení strategie RANDOMIZED). Implementace všech strategií je velmi jednoduchá, stačí v počátečním stavu nastavit hodnotu aktuálního cyklu semaforu na hodnotu posunutí. Posunutí semaforu u strategie GREEN\_WAVE je realizováno pomocí vzorce

$$posun = ((i + j) \frac{D}{vMax - 1}) \bmod (2T) \quad (1)$$

kde  $i$  a  $j$  představují indexy řádků a sloupců a ostatní proměnné parametry modelu.

### 3.4 Metriky modelu

V modelu odpovídá jedna buňka přibližně 7.5 metrům. Jeden časový okamžik (jedna časová simulace) odpovídá zhruba 2 sekundám a jedna jednotka rychlosti odpovídá zhruba  $10km/h$ . Při parametru  $vMax$  nastavený na hodnotu 5, odpovídá parametr maximální rychlosti  $50km/h$ , což je maximální rychlost ve všech českých městech. V práci se také zmiňuje pojem průměrná rychlost a průměrný tok v systému, které se značí postupně  $vMean$  a  $J$ . Průměrná rychlost se vypočítá triviálně součtem všech rychlostí automobilů v systému a vydělení této hodnoty počtem automobilů v systému. Průměrný tok je pak hodnota která do tohoto průměru započítává i rychlosti buněk které auty nejsou auty a představují silnice, mají tedy hodnotu rychlosti 0. Průměrný tok se také vypočte podle vzorce:

$$J = vMean * \rho \quad (2)$$

kde  $vMean$  je průměrná rychlost v systému. Simulace, která provede 1000 iterací pak svou celkovou průměrnou rychlost a rychlost toku, vypočte průměrem průměrných rychlostí v těchto iteracích. Obdobně to platí pro průměrný tok všech iterací, který se ale může vypočítat z průměrné rychlosti všech iterací vynásobením hustotou systému  $\rho$ . Tyto průměry pak vrací jedna simulace.

## 4 Architektura simulátoru

Implementace celulárního automatu je triviální záležitost a proto zde není rozebírána dopodrobna. Pro implementaci modelu byl použit jazyk C++, standard c++11. Implementační jazyk C++ byl zvolen proto, protože umožňuje tvorbu tříd a jednodušší práci s pamětí, na rozdíl od jazyku C. Třídy se hodí pro zapouzdření hodnot každé jedné buňky celulárního automatu a operací, které nad těmito hodnotami provádíme. Implementační jazyk byl navíc pevně zadán v zadání projektu a mohli jsme volit pouze mezi jazyky C/C++ a jejich standardy. 2D celulární automat je realizován pomocí dvourozměrného pole, u kterého dynamicky alokujeme paměť. Každá buňka pole je datového typu `Cell`. Tento datový typ je definován pomocí třídy `Cell` v souboru `cell.cpp`.

### 4.1 Mapování modelu na simulátor

Za zmínku stojí které vlastnosti buněk jsou namapovány na které vlastnosti třídy `Cell`. Jedná se o vlastnost určující zda je buňka automobil. Ta je namapována na vlastnost `isCar` datového typu `bool`. Podobně je namapována vlastnost určující zda je buňka křižovatkou na vlastnost `isIntersection` datového typu `bool` a vlastnosti určující směr vozidla. Pokud se auto pohybuje ve směru zleva doprava je nastavena vlastnost `xDirection` na hodnotu `true`. Pokud ve směru shora dolů je nastavena na hodnotu `true` vlastnost `yDirection`. Rychlost automobilu a aktuální cyklus semaforu jsou uloženy v proměnných `speed` a `cycle` datového typu `bool`. U semaforu je hodnota aktuální světelné značky na semaforu uložena v proměnné `xFree` s datovým typem `bool`, kdy hodnota `true` reprezentuje zelenou barvu ve směru zleva doprava a zároveň červenou pro směr shora dolů. Hodnota `false` poté reprezentuje červenou barvu pro směr zleva doprava a zelenou barvu pro směr shora dolů. Všechny vlastnosti třídy jsou veřejně přístupné (`public`).

### 4.2 Spouštění simulátoru

Simulátor lze spouštět příkazem `./sim` po překladi programu příkazem `make`. Flag `-h` vypisuje nápovědu s jakými parametry program spouštět. Soubor `Makefile` obsahuje cíle pro spuštění předpřipravených experimentů. Pokud je nastaven parametr `-V` při spuštění simulace, je nastaven verbose flag na hodnotu `true`, a vypisují se pomocné výpisy. Pokud není, tak simulátor vrací průměrný tok v systému. Při nastavení flagu `-S`, se vrací průměrná rychlost v systému napříč iteracemi.

## 5 Experimentování

V této části se nachází všechny experimenty, které byli provedeny s vytvořeným modelem. Každý experiment se skládá ze simulací, které mají nastavené stejné parametry a vyvolávají se z různě nastavenou periodou přepínání světél semaforů. Každá podkapitola experimentů obsahuje postup, dokumentaci i závěry jednotlivých experimentů.

### 5.1 Postup experimentování

Experimenty zahájíme pomocí souboru `Makefile` a příkazu `make exp(cislo_experimentu)(c_podexperimentu)`. Výsledky experimentů (výpisu jednotlivých simulací) jsou uloženy v souborech `vysledky`. Tvorba grafů se vytváří pomocí nástroje `gnuplot`. Experimenty jsou poměrně časově náročné (podle typu experimentu od 1 do 20 min), jelikož spouštějí simulaci, pokaždé s jinou hodnotou  $T$  a to v rozmezí od  $T = 0$  do  $T = 150$ . V každé z těchto simulací poté probíhá několik tisíc iterací (záleží na experimentu), které spočítají průměrnou rychlost systému nebo průměrný tok v systému. U větších polí kde  $N = 10$  a  $D = 100$  je pak výsledný celulární automat větší a výpočet trvá déle.

### 5.2 Dokumentace experimentů

#### 5.2.1 Experiment č. 1

Cílem tohoto experimentu je ověřit alespoň částečnou validitu modelu a správnost fungování našeho simulátoru a to srovnáním výstupů našeho simulátoru se simulátorem z článku[3].

Vstupní parametry tohoto experimentu jsou stejné jako vstupní parametry v článku:

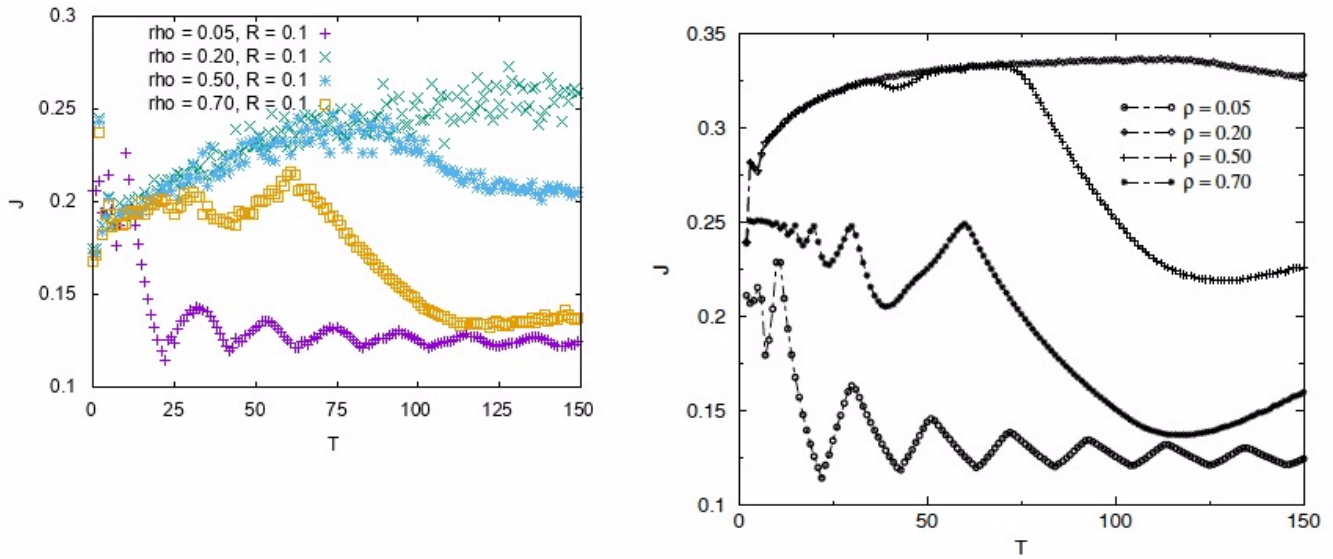
$$N = 1, D = 100$$

$$\rho = 0.05, 0.20, 0.50, 0.70$$

$$vMax = 5, R = 0.1, T \in < 0, 150 >, i = 3000$$

mod = SYNCHRONIZED

Při experimentu probíhaly 4 pod-experimenty, každý s různě nastavenou hodnotou hustoty systému. V grafu je každý pod-experiment vyznačen jinou barvou. Každý pod-experiment spouští 150 simulací, každou s jinak nastaveným parametrem  $T$ . Tyto simulace vrací průměrný tok v simulaci.



Obrázek 2: Porovnání výsledů našeho a referenčního modelu

Výsledkem experimentu jsou 4 grafy vyobrazené v levé části obrázku 2, o kterých můžeme říci, že se podobají grafům z článku[3]. Grafy z článku jsou pro přehlednost zobrazeny v pravé části obrázku 2.

### 5.2.2 Experiment č. 2

Experiment č. 2, zkoumá podobně jako experiment č. 1 validitu modelu a to kontrolou výsledků z článku[3]. Rozdílem je hodnota pravděpodobnostního koeficientu  $R$ , který je u všech simulací experimentu nastaven na hodnotu 0.5. Toto by mělo způsobit náhodnější chování systému. Vstupem do simulace je tedy:

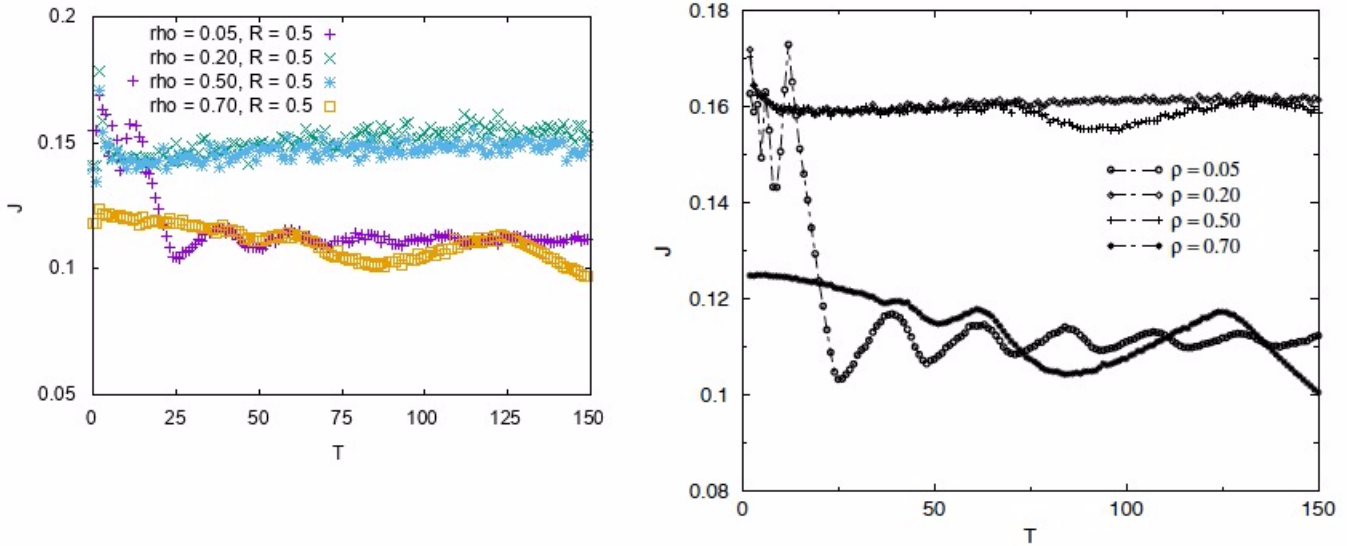
$$N = 1, D = 100$$

$$\rho = 0.05, 0.20, 0.50, 0.70$$

$$vMax = 5, R = 0.5, T \in < 0, 150 >, i = 3000$$

mod = SYNCHRONIZED





Obrázek 3: Porovnání výsledků našeho a referenčního modelu

Po zanesení hodnot výstupů simulace do grafů vidíme výsledky v levé části obrázku3. Vidíme, že hodnoty jsou si alespoň trochu podobné a prohlásíme, že model je v tomto případě validní. Rozdíly mezi vypočítanými výsledky a výsledky ze článku[3] mohou být způsobeny parametrem  $R$ .

### 5.2.3 Experiment č. 3

Tento experiment již nezkoumá validitu modelu. Jeho cílem je zjistit jaký vliv má počet křižovatek v systému na rychlost a tok v systému. Vytvoříme tedy 2 pod-experimenty, jeden s pod-simulacemi běžící pro  $N = 1$  a druhý s pod-simulacemi  $N = 5$ . Tyto pod-simulace budeme navíc spouštět s rozdílným  $T$  a výsledky zanášet do grafu. Na vodorovné ose tedy bude  $T$  a na svislé průměrný tok  $J$ . Vstupními parametry tedy budou:

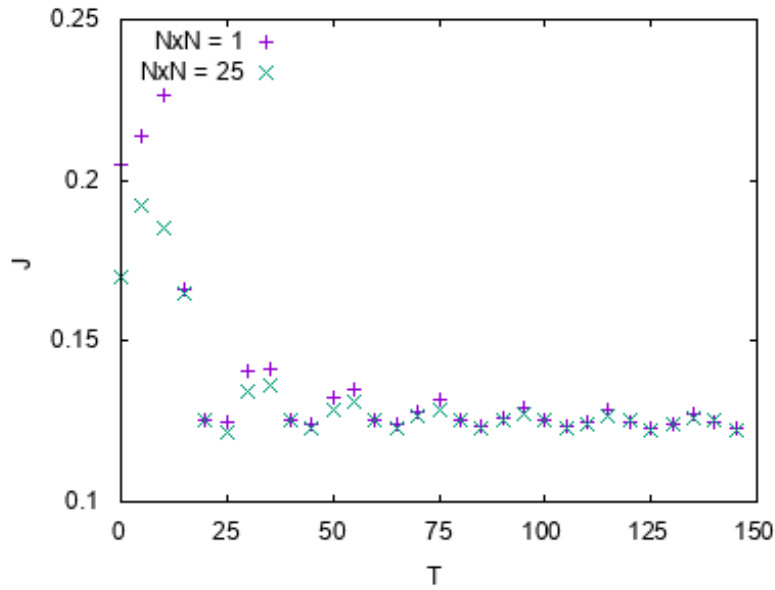
$$N = 1, D = 100$$

$$\rho = 0.05$$

$$vMax = 5, R = 0.1, T \in < 0, 150 >, i = 3000$$

$$mod = SYNCHRONIZED$$

Hodnota  $T$  je iterována s krokem o velikosti 3. (V ostatních simulacích je použit krok 1). Graf s výsledky je zobrazen na obrázku 4. Jak vidíme tak se průměrné toky téměř obou pod-experimentů neliší a shodně se kopírují. Můžeme tedy prohlásit, že průměrná rychlost  $vMean$ , ani průměrný tok nezávisí na počtu křižovatek v systému  $N$ .



Obrázek 4: Hledání souvislosti mezi  $N$  a  $J$

#### 5.2.4 Experiment č. 4

Cílem experimentu č. 4 je zjistit závislost rychlosti v systému na parametru  $T$ . Pro tento účel je vytvořen experiment ve kterém spouštíme simulace s různou hodnotou  $T$ . Vstupy do simulace tedy jsou:

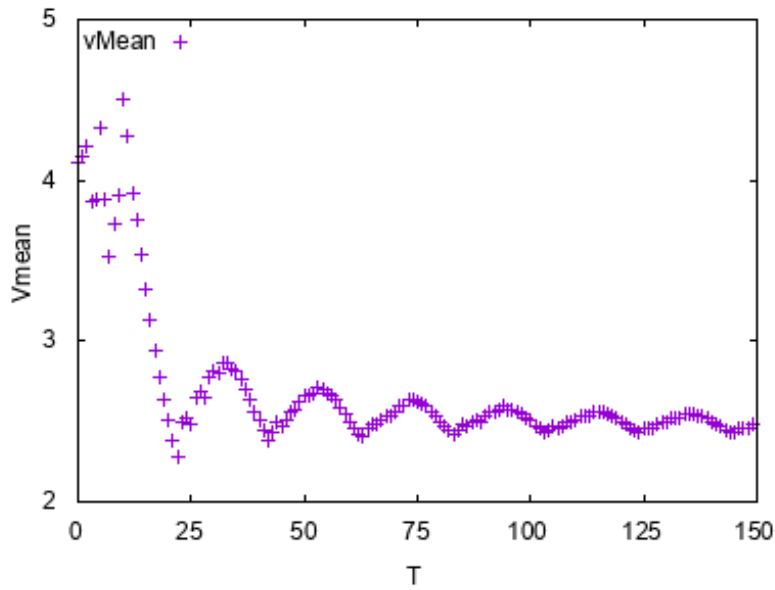
$$N = 1, D = 100$$

$$\rho = 0.05$$

$$vMax = 5, R = 0.1, T \in < 0, 150 >, i = 10000$$

mod = SYNCHRONIZED

Výsledek experimentu je zanesen na obrázek 5. Z výsledku je patrné, že průměrná rychlost je na periodě  $T$  silně závislá. Při malých hodnotách  $T$  je průměrná rychlost v nepříroze vysokých hodnotách. Čím je hodnota  $T$  vyšší, tím se průměrná rychlost více ustaluje a konverguje k určité hodnotě. Časté oscilace průměrné rychlosti jsou způsobeny pravidelnými změnami světla v daném systému křižovatek.



Obrázek 5: Graf závislosti průměrné rychlosti na periodě

### 5.2.5 Experiment č. 5

Cílem tohoto experimentu je porovnat a nalézt souvislosti mezi dvěma odlišnými strategiemi přepínání světel v systému křižovatek. První strategií je synchronizovaná strategie, kdy se světla přepínají v celém systému na jeden okamžik (detailněji popsáno v kapitole 3.3). Druhou strategií je přepínání semaforů se zpožděním a vytvoření efektu zelené vlny (GREEN\_WAVE) (viz. kapitola 3.3 Vstupem simulací tedy bude:

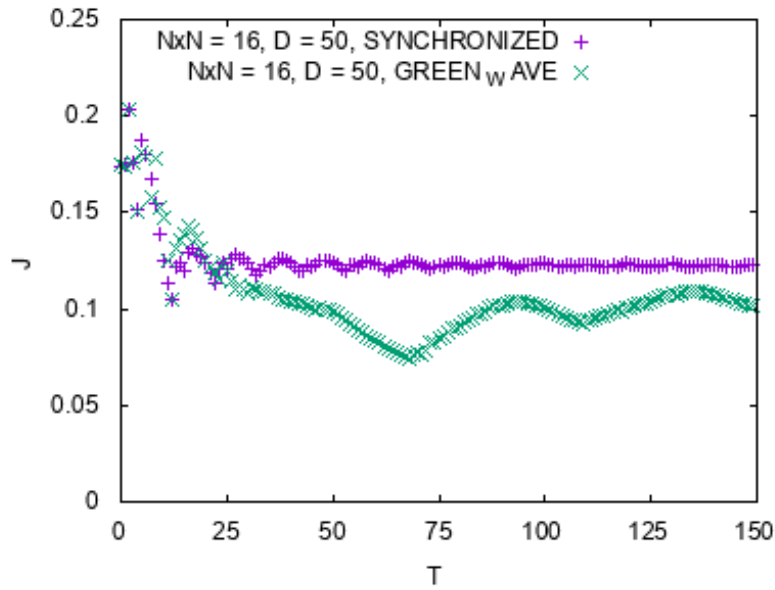
$$N = 10, D = 100$$

$$\rho = 0.05$$

$$vMax = 5, R = 0.1, T \in < 0, 150 >, i = 5000$$

$$mod = SYNCHRONIZED, GREEN\_WAVE$$

Experiment je výpočetně více náročný, díky většímu rozměru celulárního automatu. Výsledky experimentu jsou zobrazeny na obrázku 6. Z výsledků je patrné že aplikování strategie má vliv na fungování a systému. Zvýšení průtoku v systému je však sporadické a v tomto experimentu se spíše nedokázalo potvrdit.



Obrázek 6: Experiment č.5

### 5.2.6 Experiment č. 6

Tento experiment provádí srovnání strategií přepínání světél a to strategie Synchronized a strategie Randomized (viz. kapitola 3.3). U strategie Randomized je posun přepínání světél v čase nastaven náhodně. Vstupem simulace tedy budou hodnoty:

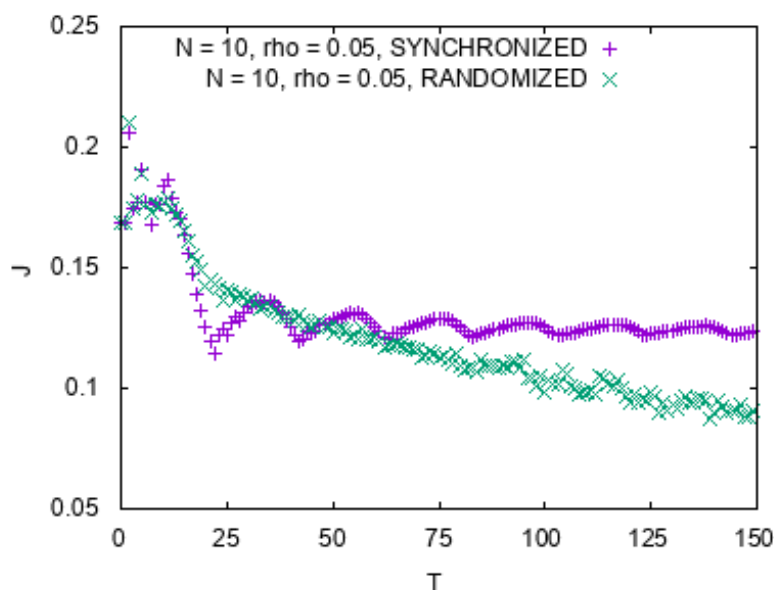
$$N = 10, D = 100$$

$$\rho = 0.05$$

$$vMax = 5, R = 0.1, T \in \langle 0, 150 \rangle, i = 3000$$

$$mod = SYNCHRONIZED, RANDOMIZED$$

Výsledky jsou viditelné na obrázku 7. Říkají nám, že strategie Randomized sice odstranila oscilace v průměrném toku oproti strategii Synchronized, ale zvýšení celkového toku, je opět sporadické. Zrušení oscilací je výhodné, jelikož snižuje závislost na parametru periody  $T$  a drží průměrnou rychlost v konstantní hodnotě.



Obrázek 7: Experiment č.6

### 5.3 Závěry experimentů

Bylo provedeno 6. experimentů. Při experimentech byla potvrzena validita modelu (experimenty č. 1 a 2). Bylo potvrzeno že rychlost a tok v systému nezávisí na počtu křižovatek  $N$  (experiment č. 3). Bylo zjištěno že průměrná rychlost výrazně závisí na nastavené periodě  $T$  simulace (experiment č. 4.). Bylo zjištěno že strategie přepínání světel Green Wave výrazně nezvyšuje rychlost v síti oproti strategii Synchronized (experiment č. 5). Bylo zjištěno že strategie Randomized ruší oscilace, které vznikají u základní strategie přepínání světel Synchronized, ale nijak nezvyšuje průměrnou rychlost v síti (experiment č. 6).

## 6 Závěr

Simulační studie popisuje model dopravy, řízené pomocí světelných křižovatek. Pomocí experimentů, jsme zjistili že vytvořený model je validní s modelem ze článku [3]. Dalšími experimenty jsme pozorovali závislosti jednotlivých parametrů simulačního modelu. Experimenty jsme zjistili, že počet křižovatek v systému nijak neovlivní průměrnou rychlost a průměrný tok v systému. Dalšími experimenty jsme zjistili, že systém dopravy je velmi citlivý na změny periody přepínání světel a to především systém synchronní. U strategie přepínání světel Green Wave se nepodařilo experimenty prokázat její výrazné zvýšení rychlosti oproti synchronní strategii přepínání světel. U strategie Randomized se dokázalo prokázat vyrušení oscilací a menší závislost na periodě přepínání světel.

V rámci projektu byl implementován simulační nástroj simulující chování dopravy v soustavě křižovatek řízenými semaforem v jazyce C++. Simulační nástroj vychází z článku [3].

## Reference

- [1] Nagel, K.; Schreckenberg, M.: *A cellular automaton model for freeway traffic*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/24/66/97/PDF/ajp-jp1v2p2221.pdf>
- [2] Biham, Ofer; Middleton, A. Alan; Levine, Dov : *Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models*. (November 1992). <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9206001>
- [3] E. Brockfeld, R. Barlovic, A. Schadschneider: *Optimizing Traffic Lights in a Cellular Automaton Model for City Traffic*. (February 1, 2008). <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0107056>

- [4] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 8.* (15. září 2017).
- [5] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 8.* (15. září 2017).
- [6] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 8.* (15. září 2017).
- [7] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 37.* (15. září 2017).
- [8] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 33.* (15. září 2017).
- [9] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 316.* (15. září 2017).
- [10] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 317.* (15. září 2017).
- [11] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 317.* (15. září 2017).
- [12] P. Peringer, M. Hrubý: *Slidy z předmětu IMS, slide 326.* (15. září 2017).
- [13] *Traffic light control and coordination.* (1. Prosinec 2017).  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic\\_light\\_control\\_and\\_coordination](https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_light_control_and_coordination)
- [14] *Gridlock.* (6. Prosinec 2017).  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Gridlock>