



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**SIMULACE KOLAPSU DOPRAVNÍ SÍTĚ S PETRIHO  
SÍTĚMI**

GRIDLOCK SIMULATIONS WITH PETRI NETS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Dofek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Dobrovský

BRNO 2023



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	<b>Ondřej Dofek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ladislav Dobrovský</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Simulace kolapsu dopravní sítě s Petriho sítěmi

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při velkých dopravních zácpách (kongesci) dochází k postupnému zablokování a kolapsu celé sítě (gridlock). Ve velkých městech typicky po jednotlivých blocích.

Petriho sítě jsou jedním z vhodných nástrojů pro simulaci stochastických jevů, kterými může být pohyb vozidel mezi křižovatkami na komunikacích s omezenou kapacitou. Na FSI ÚAI již byly prováděny simulace jednotlivých křižovatek pomocí různých metod a je motivace ve vývoji pokračovat směrem ke komplexnějším modelům skládaných z již prostudovaných bloků.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše aplikace stochastických Petriho sítí v dopravě a knihovny PetNetSim.

Navázání na předchozí vývoj simulace křižovatek na ÚAI; úprava modelů pro použití jako stavebních prvků a vytvoření knihovny.

Modul pro sestavování parametrizovaných dopravních sítí z knihoven křižovatek s uložením ve formátu JSON.

Převod sítě křižovatek s parametry do Petriho sítě v PetNetSim.

Report výsledků simulace vztažený k dopravní síti.

Jednoduché uživatelské rozhraní pro výrobu dopravních sítí.

Uvolnění výsledného SW v rámci projektu PetNetSim na platformě GitHub pod svobodnou licencí.

### Seznam doporučené literatury:

DEGOND, Pierre a Marcello DELITALA. Modelling and simulation of vehicular traffic jam formation. Kinetic & Related Models [online]. 2008, 1(2), 279-293 [cit. 2022-10-23]. ISSN 1937-5077. Dostupné z: doi:10.3934/krm.2008.1.279

NG, Kok Mun, Mamun Bin Ibne REAZ a Mohd Alauddin Mohd ALI. A Review on the Applicationsof Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of Urban Traffic. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems [online]. 2013, 14(2), 858-870 [cit. 2022-10-23]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2013.2246153

PECINOVSKÝ, Rudolf. Python: kompletní příručka jazyka pro verzi 3.10. Praha: Grada Publishing, 2021. Knihovna programátora (Grada). ISBN 978-80-271-3442-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Dopravní zácpy jsou jevem, s nímž se každodenně musí potýkat většina řidičů ve velkých městech. V krajních případech mohou vést ke kolapsu celé dopravní sítě, když je kolona aut čekající před křižovatkou tak dlouhá, že znemožní výjezd z předchozí křižovatky. Tato práce se zabývá simulací tohoto kolapsu dopravní sítě pomocí Petriho sítí, které jsou v posledních letech hojně využívány pro modelování dopravních sítí a jsou posané v teoretické části této práce. V praktické část byla psaná v programovacím jazyce Python. Jednalo se vytvoření knihovny křižovatek a jejich následné propojení a vytvoření sítě za pomoci knihovny PetNetSim. Bylo vytvořeno i uživatelské rozhraní pro simulaci kolapsu dopravní sítě. V tomto modelu byly simulovány některé faktory, které mohou vést ke kolapsu dopravní sítě.

## **ABSTRACT**

Traffic jams are a phenomenon that most drivers in big cities have to deal with on a daily basis. In extreme cases, they can lead to the collapse of the entire transport network, when the queue of cars waiting in front of the intersection is so long that it becomes impossible to exit from the previous intersection. This work deals with the simulation of this collapse of the transport network using Petri nets, which have been widely used in recent years for modeling transport networks and are discussed in the theoretical part of this work. The practical part was written in the Python programming language. It was the creation of a library of intersections and their subsequent connection and creation of a network with the help of the PetNetSim library. A user interface was also created to simulate the collapse of the transport network. In this model, some factors that can lead to the collapse of the transport network have been simulated.

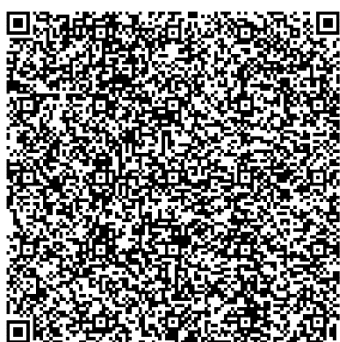
## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Petriho sítě, simulace, dopravní sítě, kolaps dopravní sítě, PetNetSim, křižovatky, dopravní zácpa

## **KEYWORDS**

Petri nets, simulation, traffic, gridlock, PetNetSim, intersections, traffic congestion





2023

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DOFEK, Ondřej. *Simulace kolapsu dopravní sítě s Petriho sítěmi*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149746>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ladislav Dobrovský.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat své rodině, a hlavně mým rodičům, za podporu při psaní této práce i při celém mém studiu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Dobrovskému za cenné rady a trpělivost.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 26. 5. 2023

.....

Ondřej Dofek



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>VZNIK DOPRAVNÍHO KOLAPSU .....</b>	<b>17</b>
2.1	Matematický model .....	17
<b>3</b>	<b>PETRIHO SÍŤ.....</b>	<b>19</b>
3.1	Historie .....	19
3.2	Základní pojmy .....	19
3.3	Typy Petriho sítí .....	20
3.3.1	Petriho síť s přechodovými hranami (P/T Petriho síť) .....	20
3.3.2	P/T Petriho síť s inhibičními hranami .....	21
3.3.3	Petriho síť s prioritami.....	21
3.3.4	Stochastické Petriho síť .....	22
3.3.5	Časované Petriho síť.....	22
3.3.6	Barevné Petriho síť.....	22
3.4	Petriho síť v dopravě .....	23
3.4.1	Mikroskopický model.....	23
3.4.2	Makroskopický model .....	23
3.4.3	Mezoskopický model.....	23
3.4.4	Jiné možnosti simulace dopravních sítí .....	23
<b>4</b>	<b>VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>25</b>
4.1	PetNetSim .....	25
4.2	Tvorba křižovatek.....	25
4.3	Dopravní předpisy .....	26
4.4	Spojení křižovatek .....	28
4.5	Uživatelské rozhraní .....	28
<b>5</b>	<b>SIMULACE KOLAPSU SÍŤE .....</b>	<b>30</b>
5.1	Nevhodné typy křižovatek.....	30
5.2	Nepříznivé počasí .....	32
<b>6</b>	<b>HODNOCENÍ VÝSLDEKŮ SIMULACE.....</b>	<b>34</b>
6.1	Simulace se nevhodnými typy křižovatek .....	34
6.2	Simulace za nepříznivého počasí.....	36
6.3	Závěr.....	37
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>39</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>43</b>



# 1 ÚVOD

I když to může občas z médií vypadat, že ke kolapsu dopravní sítě nastává v České republice několikrát do týdne, tak dopravní situace v našich největších městech není zdaleka tak špatná. Nizozemský výrobce navigačních přístrojů a navigačních softwarů TomTom dělá každoročně svůj TomTom Traffic Index, ve kterém hodnotí 390 měst v 56 zemích podle doby jízdy, nákladů na palivo a emisí CO<sub>2</sub>. Praha je na 137. místě s průměrnou dobou jízdy 16 min 20 s na 10 km, Brno je na tom o něco lépe, na 240. místě s 13 min 20 s na 10 km. Nejhůře je na tom Londýn s průměrnou dobou jízdy 36 min 20 s na 10 km. [1] V těchto situacích se vozidla pohybují pomalu, ale stále mají možnost se hýbat, nenastává tedy kolaps dopravní sítě.

Kolaps dopravní sítě neboli anglicky „gridlock“ je jeden z nejhorších scénářů, co může v dopravě nastat. Často se může zaměňovat se slovem dopravní zácpa, v odborných textech též označována jako dopravní kongesce, kde se ovšem nejedná o úplné zablokování, ale pouze o silnější provoz, než je kapacita cesty, obvykle vlivem dopravní nehody, prací na silnici nebo nevhodně nastavených signalizačních zařízení. Opravdový kolaps nastává až v momentě, kdy jsou protínající se ulice úplně zablokovány ve všech směrech a auta se nemohou posunout vpřed ani couvat nebo se otočit. Ve městech k zablokování průjezdu křižovatkou nastává v momentu, kdy řidiči vjíždí do křižovatky, když mají přednost nebo na semaforu v jejich směru svítí zelená, ale na druhé straně křižovatky není dostatek místa, a tak zůstávají stát v křižovatce a blokují tím průjezd v příčném směru. Toto chování lze popsat i jako příklad věžňova dilematu z teorie her. [2] Věžňovo dilema vyvinuli v roce 1950 matematici Merrill Flood a Melvin Dresher. Označuje paradox v rozhodovací analýze, kde jedinci mají motivaci jednat ve svém zájmu, což nevede k optimálnímu výsledku pro celou skupinu. Optimálního výsledku lze dosáhnout při spolupráci celé skupiny. [3]

Dalším místem, kde může nastat úplné zablokování dopravy, jsou dálnice. K jejich zablokování nastává většinou z důvodu prací na silnici, dopravních nehod nebo vlivem povětrnostních podmínek. Často kombinací několika těchto faktorů. K největšímu kolapsu dopravní sítě došlo v Číně v roce 2010 na dálnici 110. Byla to opakující se zácpa, která trvala 12 dní a táhla se více než 100 km. Řidiči se průměrně posunuli o 1 km za den a někteří v ní byli uvězněni i pět dnů. Místní obyvatelé prodávali uvězněným řidičům jídlo, vodu a cigarety za několikanásobek běžné ceny. Příčinou zablokování byla o 60 % větší intenzita dopravy, než jaká byla projektovaná kapacita, To bylo způsobeno mimo jiné i zvýšením produkce uhlí a jeho přepravy do Pekingu. Jedním z největších kolapsů dopravy v Evropě, nezpůsobeným přírodními podmínkami, je situace z Německa z roku 1990, kdy padla berlínská zeď. Miliony lidí se chtěly po letech vidět se svými příbuznými nebo kamarády, kteří bydleli na opačné straně zdi. [4]

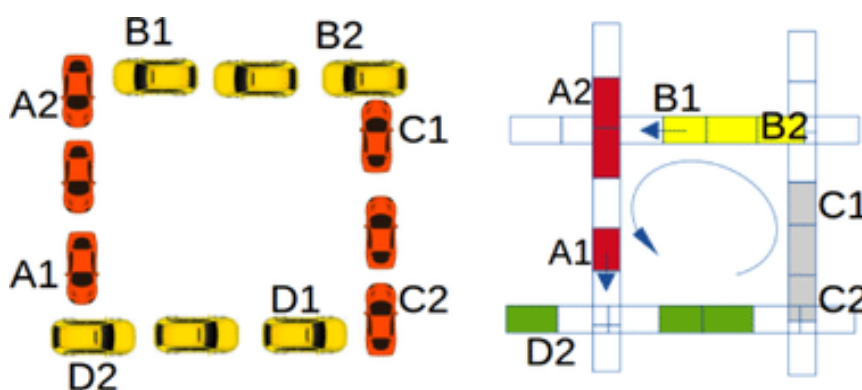
Tato práce se zabývá řešerší Petriho sítí a jejich aplikací v městské dopravní síti. Vytvořením knihovny křižovatek v Petriho síti v jazyce Python. Křižovatky jsou uloženy ve formátu JSON, aby se s nimi mohlo dále pracovat v knihovně PetNetSim, která slouží

k tvoření a simulaci Petriho sítí. Uložené křižovatky jsou základními prvky dopravní Petriho sítě, která se skládá z uložených křižovatek a z jejich propojení pomocí přechodů a míst s kapacitou. Celá síť má jednoduché uživatelské rozhraní, ve kterém lze vybírat různé typy křižovatek a nastavovat parametry, jako například počet kroků, které má síť vykonat, čas generování tokenů do sítě nebo kapacita spojovacích míst. Na vytvořeném modelu dopravní sítě jsou poté simulovány dva různé scénáře vedoucí ke kolapsu dopravní sítě.



## 2 VZNIK DOPRAVNÍHO KOLAPSU

Kolaps dopravní sítě ve městech nastává, když řada vozidel je tak dlouhá, že zablokuje i kolmé směry, a tím se zácpa bude šířit po celé síti a vytvoří fronty prstencového typu, které indikují kolaps dopravní sítě (gridlock). Model gridlocku je na obrázku 1. Zablokování nastává, když vozidlo A2 blokuje B1, B2 blokuje C1, C2 blokuje D1 a nakonec D2 zablokuje A1. Na pravé části obrázku k zablokování nedojde, když se vozidlo D2 zastaví před křižovatkou a počká, až bude moci křižovátku celou projet a nezůstane stát uvnitř. Ke vzniku gridlocku zpravidla přispívá špatné nastavení semaforů a krátký čas mezi zelenou a červenou signalizací. Dalším faktorem může být nepříznivé počasí, kdy se průměrná rychlost vozidel výrazně snižuje. [2]



Obrázek 1 Formace zablokování, převzato z [5]

### 2.1 Matematický model

Ve vědecké literatuře lze nalézt tři základní způsoby modelování silniční dopravy, které se od sebe rozlišují způsobem pozorování. Jsou to mikroskopické modely tzv. „Follow to leader“, kinetické modely (modely buněčných automatů) a makroskopické fluidní modely.

Silniční dopravu lze popsat pomocí Aw-Rascle modelu. Jedná se o model s konstantní maximální hustotou bez zrychlení, zkráceně MAR. (1)

$$\begin{aligned}
 \partial_t n + \partial_x(nu) &= 0, \\
 \partial_t n + u\partial_x u &= np'(n)\partial_x u, \\
 p(n) &= \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n^*}\right)^{-\gamma}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Kde  $n = n(t, x)$  je hustota vozidel,  $u = u(t, x)$  je střední rychlost,  $p(n)$  je tlakový člen,  $n^*$  je maximální hustota a  $\gamma$  je kladný parametr.

Model lze i rozšířit přidáním členu zrychlení  $\eta$ . Řidiči mohou zrychlit, pokud je před nimi místo. Zrychlení je konstantní, dokud nedosáhne maximální rychlosti, která je

pro všechna vozidla stejná. Z modelu MAR (1) se přidáním členu zrychlení stává Aw-Rascle model s maximální hustotou závislou na zrychlení. Tzv. MARA (2)

$$\begin{aligned}\partial_t n + \partial_x(nu) &= 0, \\ \partial_t n + u\partial_x u &= n\partial_n p(n, u)\partial_x u + \eta H(u_M - u), \\ p = p(n, u) &= \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n^*(u)}\right)^{-\gamma}\end{aligned}\quad (2)$$

$H$  je Heavisideova funkce. Tlakový člen  $p$  závisí na hustotě i rychlosti.[5]

## 3 PETRIHO SÍTĚ

Petriho sítě (PS) jsou jedním z nejrozšířenějších matematických modelů paralelních a distribuovaných systémů, s mnoha aplikacemi v širokém spektru oborů. Vznikly rozšířením modelovacích možností konečných automatů. Základním prostředkem popisu změny v PS je stav a přechod mezi stavy.[6]

### 3.1 Historie

Petriho síť vytvořil německý matematik Carl Adam Petri v roce 1962. Publikoval ji ve své doktorské disertační práci „Kommunikation mit Automaten“ jako grafický a matematický model, který by mohl popsat paralelní a distribuované systémy. Jeho původní záměr byl vytvořit formalismus, který by sloužil k analýze chemických reakcí. Inspiroval se přitom výzkumem biochemie, který sledoval v dílech svého otce, biochemika. Brzy se ale ukázalo, že je všestranný a lze ho tak použít v různých oblastech, jako je modelování softwarových systémů, výrobních procesů, řízení projektů a dalších.

Od svého vzniku se Petriho síť stala populárním nástrojem v oblasti paralelního a distribuovaného zpracování. Petriho práce ovlivnila vývoj paralelních a distribuovaných algoritmů a přispěla k rozvoji teorie systémů a formálních metod. V průběhu let byly vyvinuty různé varianty Petriho sítí a rozšíření původního modelu, aby bylo možné modelovat složitější systémy. Petriho sítě se staly důležitým nástrojem pro modelování, analýzu a simulaci paralelních a distribuovaných systémů a nacházejí široké uplatnění v různých oblastech informatiky, systémového inženýrství a dalších příbuzných disciplín. [6]

### 3.2 Základní pojmy

Petriho sítě se skládají ze tří základních prvků:

#### Místa (places)

Místa znázorňují stav systému. Značí se kolečkem a uvnitř se uchovávají a akumulují tokeny, které reprezentují jednotky informace nebo stavy systému. Místa mohou obsahovat určitý počet tokenů, které udávají aktuální stav nebo dostupnost prostředků v daném místě. Místa mohou mít také omezenou kapacitu pro počet tokenů.



Obrázek 2: Značka místa bez tokenu a se dvěma tokeny

### Přechody (transitions)

Dalším prvkem PS jsou přechody, které ovlivňují pohyb tokenů. Aby se token mohl přemístit z jednoho místa do druhého, je potřeba přejít přes přechod. V PS se přechody značí plným obdélníkem a jsou spojeny s místy pomocí hran. K aktivaci přechodu dojde při dostatečném počtu tokenů ve vstupních místech a nenaplněné kapacitě výstupního místa. Přechody mohou být parametrizované, například časované, stochastické či prioritní.

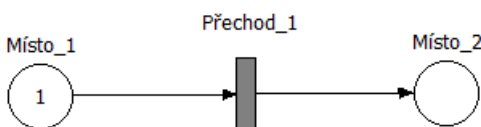
Přechod\_1



Obrázek 3: Značka přechodu

### Hrany (arcs)

Hrany v PS spojují místa a přechody a určují směr pohybu tokenů. Jsou zobrazeny jako šipka směřující z místa do přechodu nebo z přechodu do místa. Hranou nelze spojit dvě místa nebo dva přechody. Hranám může být přidělena hodnota množství tokenů, které přes ně může přejít.



Obrázek 4 Značení vstupní a výstupní hrany

## 3.3 Typy Petriho sítí

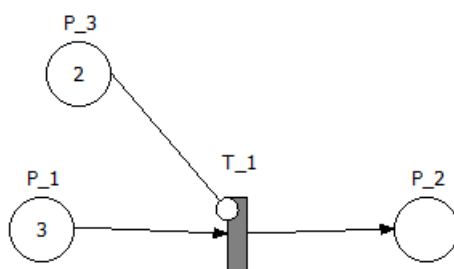
Existuje několik různých druhů Petriho sítí, které byly vyvinuty s cílem modelovat a analyzovat různé typy systémů. Některé systémy lze pospat kombinací následujících typů PS.

### 3.3.1 Petriho síť s přechodovými hranami (P/T Petriho síť)

Tato forma Petriho sítě je základním a nejběžnějším typem. Místa jsou propojena s přechody pomocí hran a tokeny se pohybují mezi místy a přechody. Viz *Obrázek 4*.

### 3.3.2 P/T Petriho sítě s inhibičními hranami

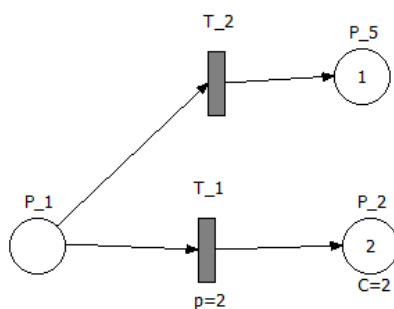
Petriho sítě s inhibičními hranami jsou rozšířením klasických Petriho sítí, které umožňují modelovat inhibiční podmínky pro aktivaci přechodů. Inhibitor je speciální druh hrany, která směřuje vždy z místa do hrany, na jejím konci je většinou místo šipky kolečko. Přechod, ke kterému vede inhibitor, je proveditelný, pouze pokud místo, ze kterého inhibitor vychází, neobsahuje žádný token nebo obsahuje méně tokenů, než kolik činí násobnost inhibiční hrany. [7]



Obrázek 5: Petriho síť s inhibiční hranou

### 3.3.3 Petriho sítě s prioritami

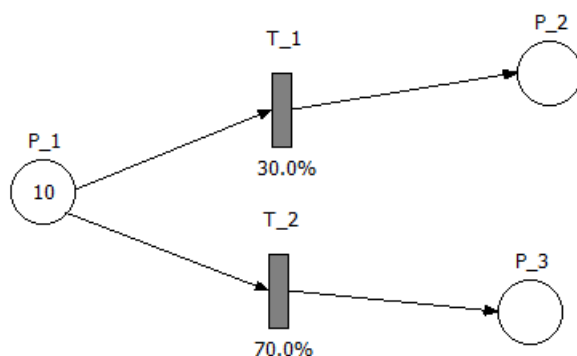
PS s prioritami je síť, ve které je každému přechodu přiřazeno celé nezáporné místo udávající prioritu přechodu. Priorita přechodu určuje, který přechod má přednost při aktivaci, pokud jsou splněny podmínky pro aktivaci více přechodů. Při aktivaci sítě jsou nejprve vyhodnoceny podmínky pro aktivaci všech přechodů. Pokud je splněna podmínka pro aktivaci více přechodů, vybere se přechod s nejvyšší prioritou a ten je aktivován. Ostatní přechody s nižší prioritou zůstávají neaktivní.



Obrázek 6: Petriho síť s prioritami

### 3.3.4 Stochastické Petriho sítě

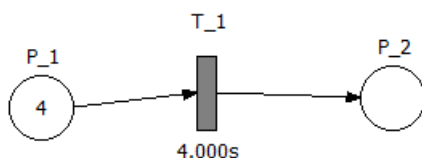
Stochastické PS umožňují modelovat náhodné nebo probabilistické chování systému. Aktivace stochastického přechodu může být dána pomocí normálního rozdělení, exponenciálního rozdělení, studentova rozdělení apod. Je-li místo spojeno s více stochastickými přechody, odpálení určitého přechodu závisí na dané pravděpodobnosti. Stochastické PS jsou vhodné k modelování systémů s náhodným chováním.



Obrázek 7: Stochastická Petriho síť

### 3.3.5 Časované Petriho sítě

Časované PS dokážou přidat do sítě časové aspekty daného děje. Časovaný přechod při splnění podmínky odpálení čeká, až bude splněna i časová podmínka. Nejsou-li časované přechody spojeny se vstupním místem, ale pouze s výstupním místem, dokážou v určitém časovém intervalu generovat tokeny. Časované PS jsou vhodné k modelu systému, kde je potřeba zohlednit časové omezení nebo synchronizovat určité děje.



Obrázek 8: Časovaná Petriho síť

### 3.3.6 Barevné Petriho sítě

V barevných PS je možné pracovat s více typy tokenů. Každému typu tokenu je přiřazena určitá třída (barva). Každé místo má pak přiřazenou určitou třídu (barvu) tokenů, která se v něm může nacházet. Jednomu místu může být přiřazeno i více tříd. Stejně tak přechody mají své podmínky, tvořené z konstant a proměnných, které po vyhodnocení dávají pravdivostní tabulku, zda se může přechod odpálit. Hrany mají

také podmínky, které po vyhodnocení představují multimnožinu tokenů, z těch tříd, které jsou přiřazeny vstupnímu místu. [7]

### **3.4 Petriho síť v dopravě**

Městský dopravní systém má systémové stavy, které jsou distribuované, paralelní, deterministické, stochastické, diskrétní a spojité. Díky komplexnosti PS jsou už přes 20 let využívány pro analýzu výkonu a k inteligentnímu a optimalizovanému řízení provozu. Jejich výhodou je poskytování vizuální prezentace a schopnost simulace souběžných dynamických činností v systému. Dopravní situace lze pomocí PS simulovat rychleji než v reálném čase.[8]

#### **3.4.1 Mikroskopický model**

Mikroskopický model dopravní sítě zkoumá chování každého jednotlivého vozidla pohybujícího se v dopravní síti. Vozidlo je v síti reprezentováno tokenem. Model od autorů Febbrara a Giglia se skládá z deterministicky časované PS. Lépe lze ovšem model popsat pomocí stochasticky časovaných PS. Obě varianty ale nejsou schopny popsat vlastnosti a parametry každého vozidla pohybujícího se v síti. Barevné PS tento nedostatek nemají. Různé atributy chování vozidel reprezentují barevné tokeny.[8]

#### **3.4.2 Makroskopický model**

Makroskopické modely nepopisují dopravní situaci na úrovni jednotlivých aut. Používají proměnné jako dopravní proud, hustota provozu nebo průměrná rychlost. Zkoumá se chování více vozidel najednou. [8]

#### **3.4.3 Mezoskopický model**

Mezoskopické modely kombinují vlastnosti mikroskopických a makroskopických modelů. Zkoumanou veličinou jsou jednotlivá vozidla, ale jejich interakce a chování jsou založeny na makroskopických parametrech. [8]

#### **3.4.4 Jiné možnosti simulace dopravních sítí**

Kromě PS existují i další modely, zabývající se simulací provozu. Jedním z nich je model LWR (Lighthill, Whitham, Richards), který je založen na rovnici kontinuity. [9] Dalším modelem je teorie front nebo též teorie hromadné obsluhy, od dánského inženýra Agnera Krarua Erlanga. Nebo třeba neuronové sítě, které se používají na predikci hustoty provozu na základě dat z předešlých let. [8, 10]





## 4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

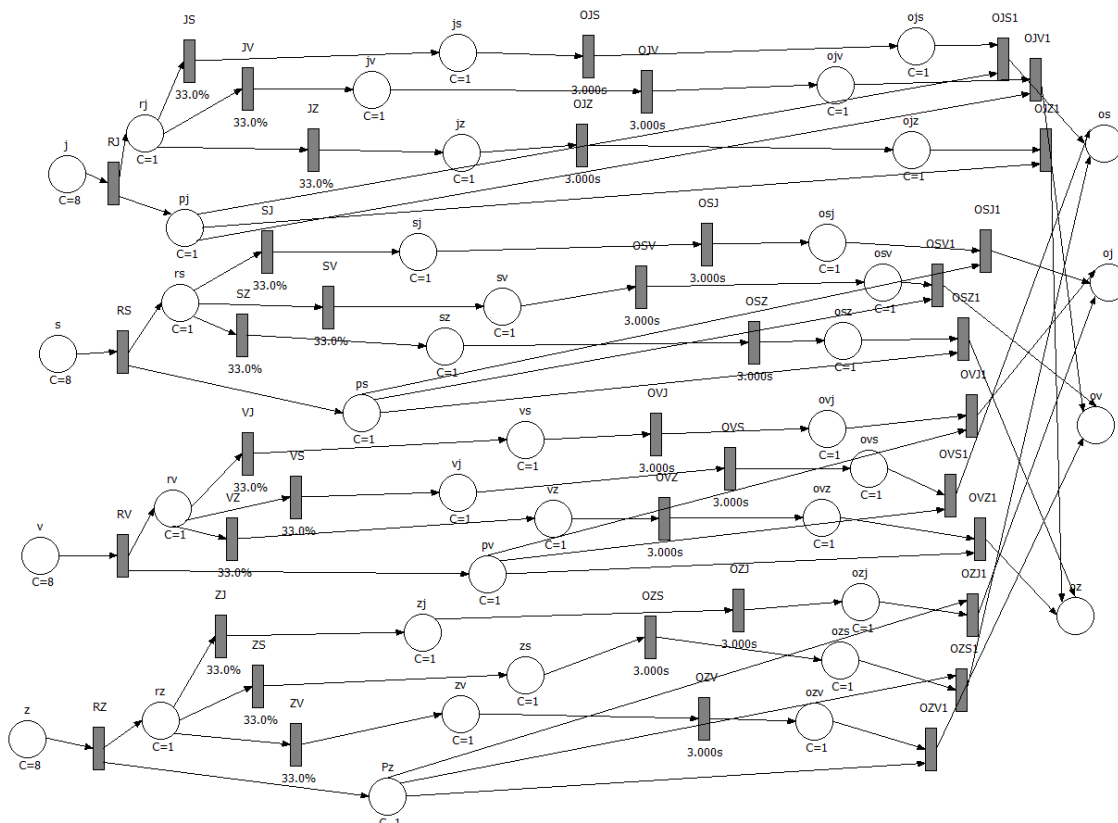
### 4.1 PetNetSim

PetNetsim je knihovna vytvořená pro tvorbu a simulaci PS. Mimo knihovnu má PetNetSim i grafický editor. Knihovna PetNetSim umožňuje pracovat s prioritními, časovanými a stochastickými PS.

### 4.2 Tvorba křižovatek

Model křižovatky je časovaně stochastická PS. Principiální schéma křižovatky je na obrázku 9. Všechny křižovatky se skládají ze stejných vstupních míst ( $s, j, v, z$ ) reprezentující světovou stranu, ze které přijíždí auta. Vstupní místa představují auta čekající před křižovatkou, mají tedy určitou kapacitu. Následuje pomocný přechod ( $RJ, RS, RV, RZ$ ) a rozhodovací místo ( $rs, rj, rv, rz$ ). Na ty navazují stochastické přechody, které určují, do kterého směru auto pojedí (pro směr ze severu na jih  $SJ$ , obdobně i pro ostatní směry). Rozhodovací přechod je ještě spojen s místem, které indikuje, že je auto v křižovatce ( $pj, ps, pz, pv$ ). Tyto místa mají nastavenou kapacitu na jeden token, což indikuje, že v křižovatce smí být z jednoho směru pouze jedno auto. Následuje další místo ( $sj$  pro směr ze severu na jih a podobně i pro ostatní směry). Dále navazuje časovaný přechod (pro směr ze severu na jih  $OJS$ , podobně pro ostatní směry), který určuje dobu průjezdu křižovatkou. Na konci jsou místa ( $ojs$ , podobně pro další směry) a přechody ( $OJSI$ , podobně pro další směry), kterými auta opouští křižovátku. Tyto přechody se mohou odpálit pouze za splnění podmínky, že je token v místě indikujícím auto v křižovatce a token v místě ( $ojsI$  apod.). Na výstupu jsou místa ( $os, oj, ov, oz$ ) reprezentující stranu výjezdu. Křižovatka se může ještě modulovat například přidáním odbočovacího pruhu nebo zákazu odbočení do určeného směru. Ovšem vstupní a výstupní místa zůstávají u všech typů křižovatek stejná, stejně tak jako značení míst malými písmeny a přechodů velkými.

Pro vytvoření knihovny křižovatek je potřeba každou síť (křižovátku) uložit do formátu, ze kterého bude moci být znovu načtena. Síť se ukládají ve formátu JSON (JavaScriptObjectNotation).



Obrázek 9: Model křižovatky

### 4.3 Dopravní předpisy

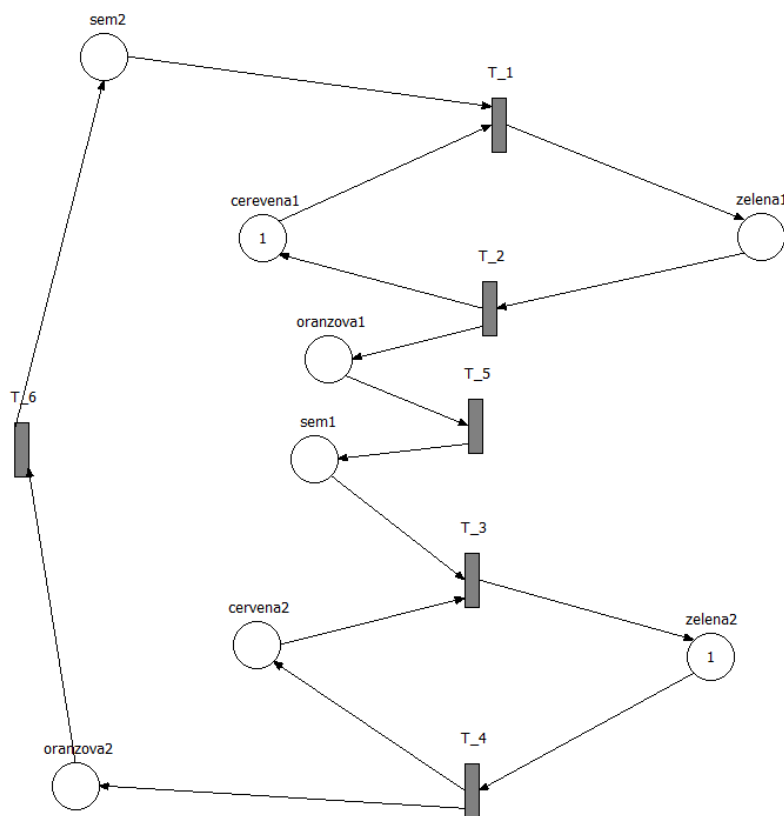
Do modelu křižovatky je důležité zahrnout i dopravní předpisy, kterými se auta budou řídit. V PS jsou dopravní předpisy prezentovány inhibitory.

Pro křižovatku bez svislého značení a bez semaforů, kde se provoz řídí pomocí předností zprava, jsou inhibitory mezi příslušnými vstupními místy, která jsou napravo od místa odkud chce auto jet a pomocným přechodem. Díky tomu nemůže být pomocný přechod odpálen, když bude ve vstupním místě token, kterému je třeba dát přednost. Další inhibitor je od místa reprezentující auto v křižovatce ( $pj$ ,  $ps$ ,  $pV$ ,  $pZ$ ), čímž zabráníme tomu, aby do křižovatky vjelo další auto v moment, kdy ji předešlé ještě neopustilo. Poslední inhibitor hlídá, aby auta odbočující vlevo dala přednost protijedoucím autům. Inhibitor je mezi místy, která jsou za stochastickým přechodem v určitém směru a časovaným přechodem. Auto už sice v křižovatce je, ale časovaný přechod se nemůže odpálit, dokud protijedoucí auto křižovatku neopustí, a tak tam musí počkat.

Křižovatky s hlavní silnicí mají obdobně umístěné inhibitory, s tím rozdílem, že inhibitory vedou od míst na hlavní silnici k pomocným přechodům na vedlejší silnici.

Inhibitory hlídající současný počet aut v křižovatce a inhibitory odbočování vlevo jsou stejné.

Křižovatky se semaforem mají navíc malou podsít' reprezentující semafor, viz *Obrázek 10*. Je to časovaná PS, zahrnující mj. místa s názvem *cervena\_1* a *cervena\_2*, od kterých vedou inhibitory do určených pomocných přechodů, které mají zrovna červenou. Na začátku simulace je token v místě *cervena\_1* a *zelena\_2*, což určuje, že jeden směr má červenou a druhý zelenou. Po uplynutí daného času se přechod *T4* odpálí a po dobu tří sekund je token v obou místech *cervena\_1* i *cervena\_2*. To je doba, za kterou jsou všechna vozidla, která se v té chvíli nacházela v křižovatce, schopna křižovatku opustit. Následuje stav, kdy jsou tokeny v místech *zelena\_1* a *cervena\_2*, což značí volný průjezd pro opačný směr. Po uplynutí určitého času se odpálí přechod *T2* a následuje opět stav, ve kterém je token po určitou dobu v místech *cervena\_1* a *zelena\_2*. Celý děj se následně periodicky opakuje.



Obrázek 10: Schéma semaforu

## 4.4 Spojení křižovatek

Každá křižovatka v knihovně začíná vstupními místy a je zakončena výstupními místy. Proto by se mohlo jejich propojení realizovat pouze jedním, resp. dvěma přechody. Jelikož je ale cílem práce simulace kolapsu dopravní sítě, musí být dána i kapacita silnice spojující křižovatky. To lze zrealizovat přidáním místa s kapacitou a dalšího přechodu. A vytvořením velké sítě skládající se z menších podsítí v podobě křižovatek spojených mezi sebou.

Dalším řešeným problémem této sítě jsou názvy jednotlivých míst a přechodů. Všechna vstupní a výstupní místa a také většina ostatních míst a přechodů se v každém typu křižovatky označují stejně. Tento problém byl vyřešen přidáním prefixu, označujícím pořadí křižovatky v síti, před název každého místa a přechodu u každé křižovatce. Díky tomu nebylo žádné jméno použito vícekrát.

## 4.5 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v Pythonu pomocí knihovny PyQt5. Skládá se z 9 bloků křižovatek, které si uživatel navolí pomocí rozbalovacího pole. Na výběr je dvanáct typů křižovatek. Přednastavena je silnice, což je mimoúrovňové křížení dvou cest. Další z voleb jsou pak křižovatka bez dopravního značení s předností zprava, křižovatky s hlavní silnicí ve všech možných směrech, křižovatky jednoproudové se semaforem a dvouproudové se semaforem ve všech směrech nebo pouze ve svislém a vodorovném směru. Po výběru křižovatky se změní ikona dané křižovatky, které jsou se svolením autora převzaty a upraveny z [11]. Na pravé straně je možnost nastavení času generování tokenů, které reprezentují jednotlivá vozidla. Další je nastavení počtu kroků, která PS má vykonat. Pod tím je tlačítko START, které spustí vlastní simulaci. Jednotlivé křižovatky jsou spojeny silnicemi, které mají určitou kapacitu, kterou lze nastavit u každého propojení. Propojení jsou znázorněny labely, které mění barvu podle počtu tokenů v propojovacích místech. Labely mění barvu podle naplnění kapacity od černé, která značí, že žádný token není v propojovacím místě až po sytě červenou, která značí plné naplnění kapacity. Vedle každého propojení je ještě číselně zobrazen počet tokenů, které jsou v propojovacím místě.



Obrázek 11: Uživatelské rozhraní

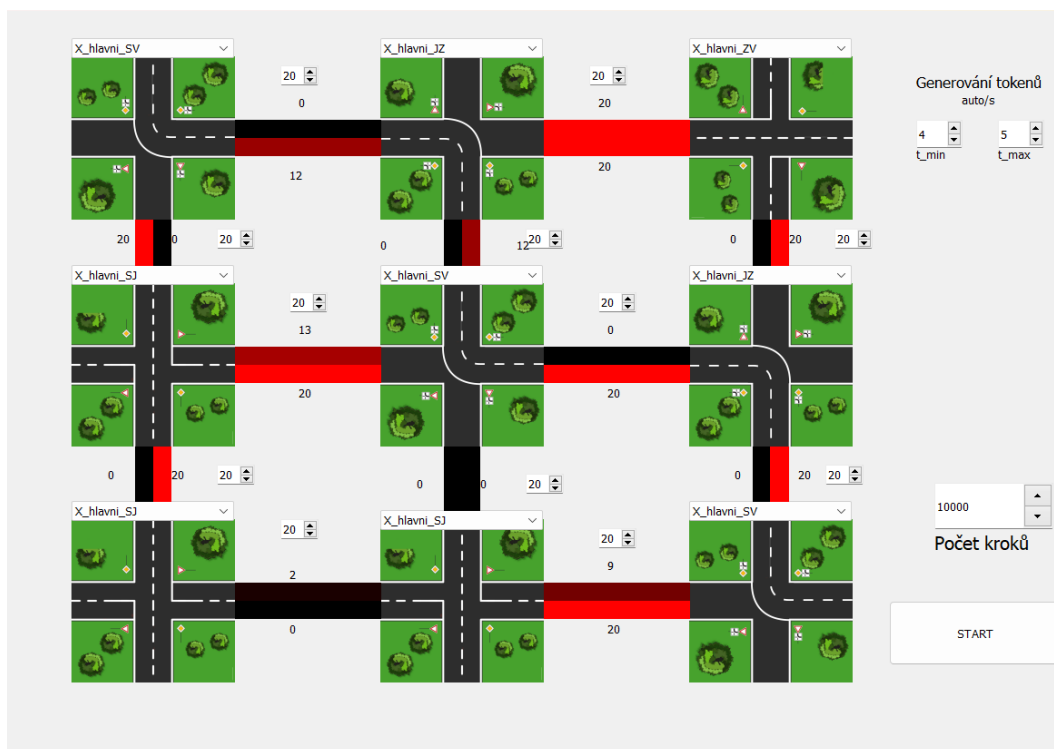
## 5 SIMULACE KOLAPSU SÍTĚ

Vznik kolapsu dopravní sítě ovlivňuje, kromě bezohlednosti řidičů, několik dalších faktorů. V této kapitole jsou simulovány tyto faktory – zařazení nevhodné křižovatky do sítě, nepříznivé počasí.

### 5.1 Nevhodné typy křižovatek

Zácpy a následný kolaps celé dopravní sítě může nastat při nevhodném nastavení hlavních a vedlejších silnic. Když hlavní frekventovaná silnice se v další křižovatce změni na vedlejší a všechna auta tak musí dát přednost těm na hlavní silnici.

Byla provedena simulace na modelu, skládajícího se pouze z hlavních a vedlejších komunikací, viz *Obrázek 12*. Z každého směru bylo nastaveno generování jedno auto za 4 až 5 sekund. Průjezd křižovatkou z hlavní silnice trvá 2 sekundy a z vedlejší 3, což simuluje, že auta přijíždějící z vedlejší silnice musí přibrzdit nebo zastavit, aby se ubezpečili, že mohou do křižovatky vjet. Kapacita silnic mezi jednotlivými křižovatkami je nastavena na 20. Stochastické přechody jsou nastaveny na pravděpodobnost 50 % pro jízdu rovnou a po 25 % na odbočení doleva nebo doprava.



Obrázek 12 Výsledek první simulace

V centrech měst, kde je frekventovaná doprava, bývají většinou všechny křižovatky světelné. Proto v další simulaci je nastavena síť devíti světelných křižovatek. Cyklus semaforu je nastaven na 20 sekund a mezi přepnutím jsou 2 sekundy zpoždění, aby mohla odjet auta, co jsou v křižovatce. Průjezd křižovatkou trvá 2 sekundy a z každého směru smí do křižovatky vjet pouze jedno auto. Platí dát přednost při odbočování doleva protijedoucím vozidlům. Do sítě je generováno jedno auto za 4 sekundy. Stochastické přechody v každé křižovatce jsou nastaveny tak, že pro směr rovně je 50 % pravděpodobnost a po 25 % pro odbočovací směry.



Obrázek 13 Výsledek druhé simulace

V další simulaci byla nahrazena světelná křižovatka uprostřed modelu křižovatkou s hlavní silnicí ve směru ze severu na jih. Všechna ostatní nastavení zůstala stejná.



Obrázek 14: Výsledek třetí simulace

## 5.2 Nepříznivé počasí

Faktory, který ovlivňují plynulost dopravy, jsou také přírodní podmínky, kdy řidiči musí přizpůsobit rychlost povětrnostním podmínkám. Simulace byla provedena na stejném modelu jako druhá simulace v předchozí podkapitole, tedy model se sítí devíti světelných křižovatek. Jediným rozdílem bylo, že se zvýšila doba průjezdu křižovatkou na tři sekundy, což by mělo celou dopravu zpomalit.



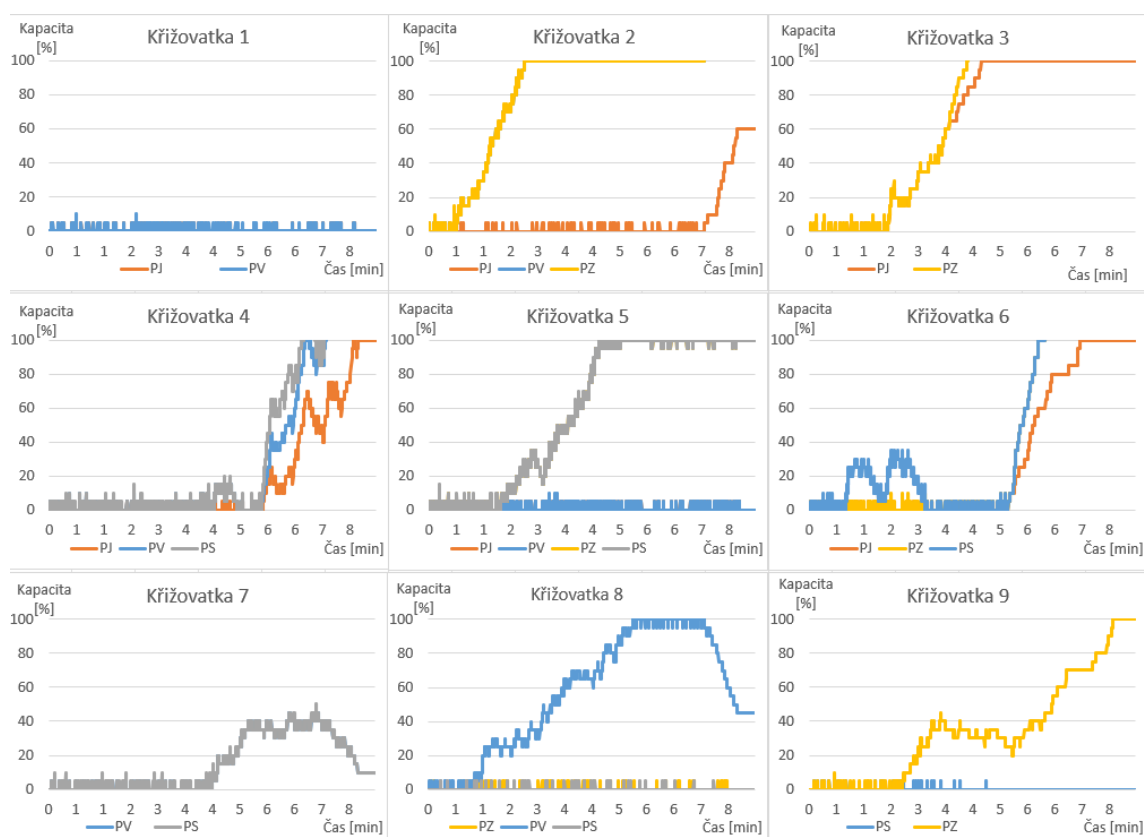


Obrázek 15 Výsledek simulace za špatného počasí

## 6 HODNOCENÍ VÝSLDEKŮ SIMULACE

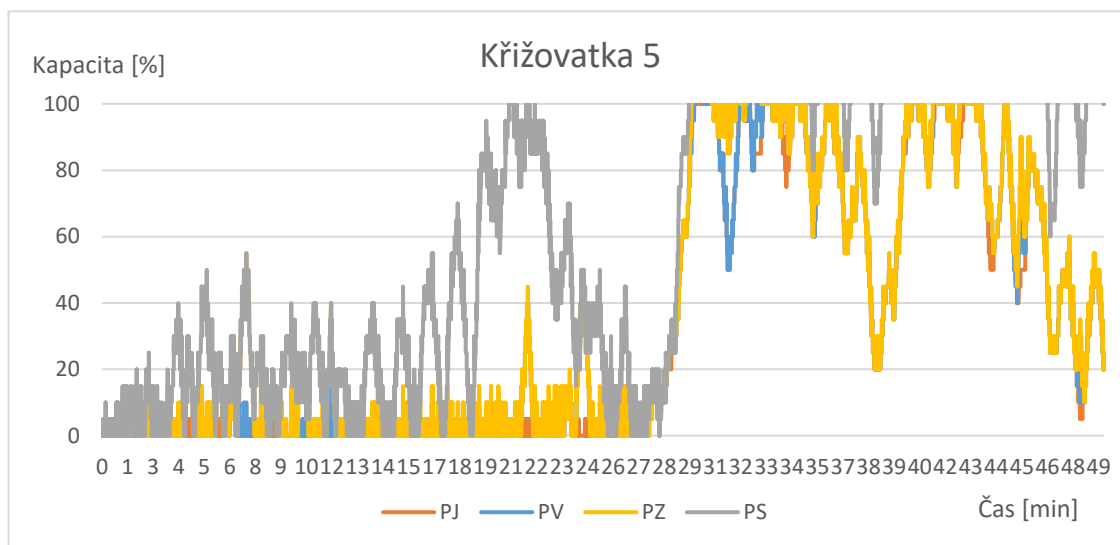
### 6.1 Simulace se nevhodnými typy křižovatek

V grafech z první simulace lze vidět zaplněnost každé z příjezdových cest ke křižovatce v čase. Při špatně nastavených hlavních silnicích nastalo zablokování nejprve na příjezdu ze západu ke druhé křižovatce, kde museli auta dávat přednost těm na hlavní silnici, jak lze vidět ve grafech. Naplněním kapacity silnice mezi druhou a třetí křižovatkou se zablokovala přibližně po dvou minutách i křižovatka číslo tři. Po dalších dvou, respektive třech minutách se postupně zablokovaly i křižovatky číslo 5 a 6, která jsou napojeny na křižovatky 2 a 3, protože auta jedoucí tím směrem nemohla z křižovatky odjet. Následovalo zablokování křižovatky 4. Dolní řada křižovatek byla nadále průjezdná, jelikož auta s největší pravděpodobností jezdí rovně a neodbočují. Z této simulace tedy vyplývá, že při křížení frekventovaných cest je vhodnější světelná křižovatka.



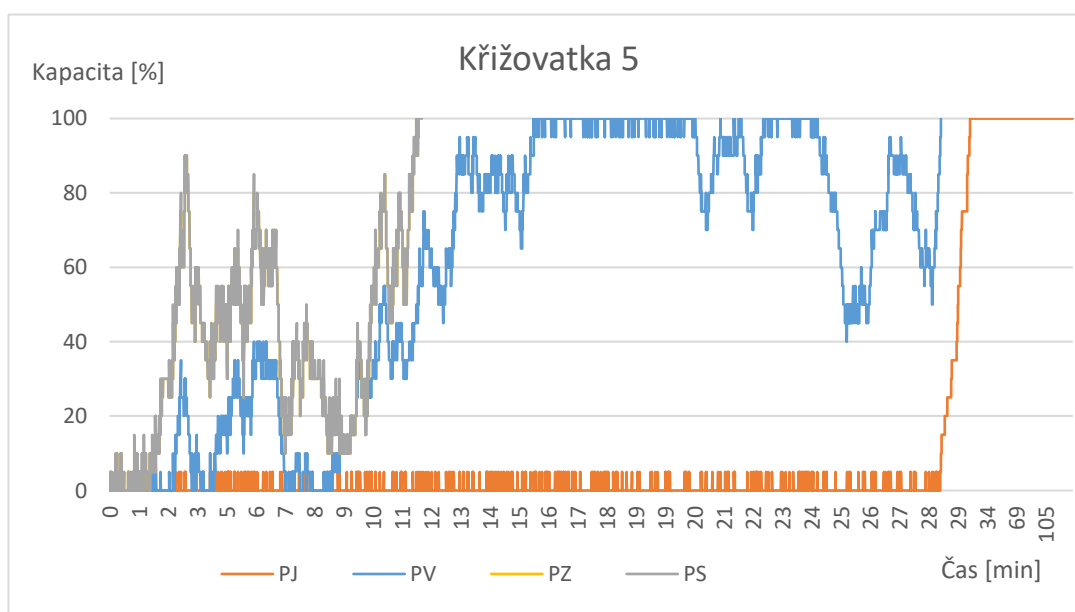
Graf 1: Naplnění kapacity příjezdových cest

Při druhé simulaci k zablokování nedošlo, několikrát byly příjezdy ke křižovatce číslo 5 plně zaplněny, avšak odjezdy byly vždy volné. Světelné křižovatky jsou tedy vhodné na křížení frekventovaných silnic.



Graf 2: Naplněnost příjezdových cest ke křižovatce 5

U třetí simulace byla světelná křižovatka č.5 nahrazena křižovatkou s hlavní silnicí ve směru ze severu na jih. K zablokování příjezdových směrů z východu a západu, tedy z vedlejších silnic, došlo v cca 28. minutě, a tím se také zablokovaly výjezdy z křižovatek 4 a 6. Tím došlo ke kolapsu celé dopravní sítě, kdy byl alespoň jeden výjezd z každé křižovatky blokován. K zablokování celé dopravní sítě může tedy vést i jedna nevhodně zvolená křižovatka.

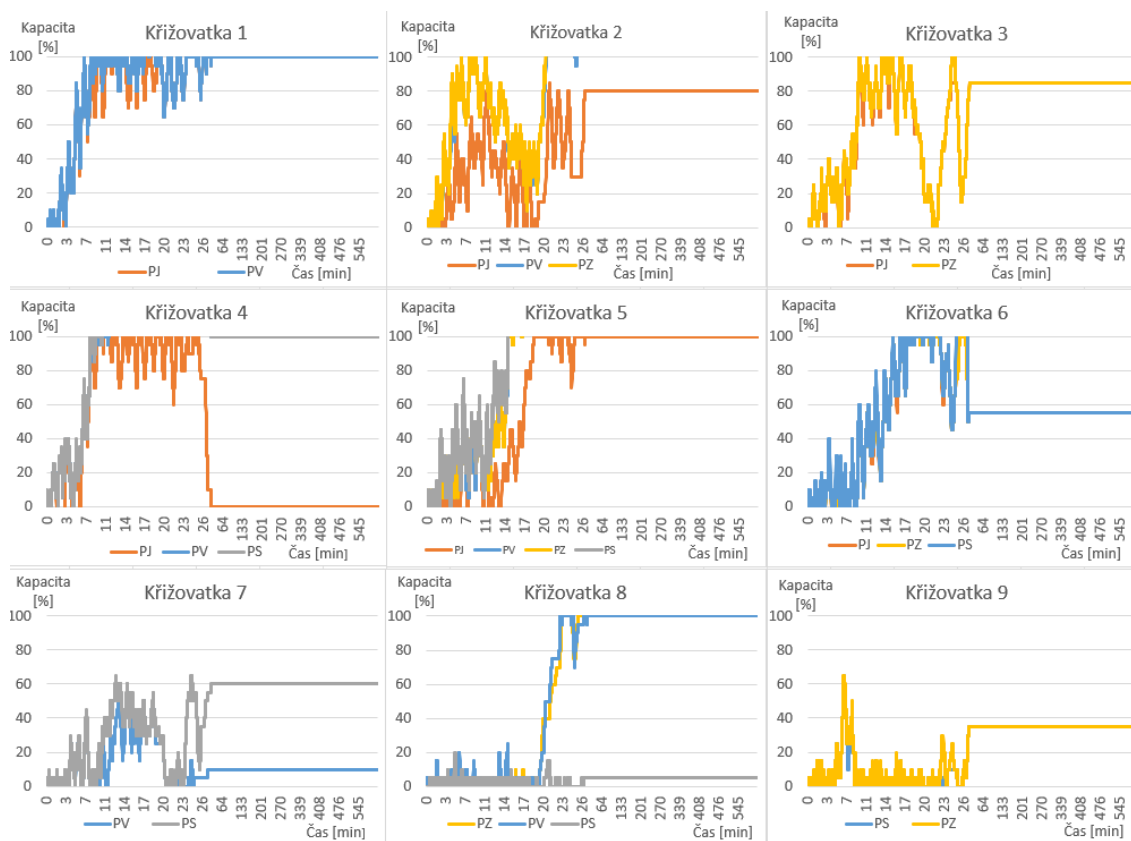


Graf 3: Naplněnost příjezdových cest ke křižovatce 5

## 6.2 Simulace za nepříznivého počasí

Při simulaci za špatného počasí a tím snížené rychlosti opět došlo k zablokování některých příjezdových cest a k celkovému zablokování dopravní sítě. Při snížení rychlosti průjezdu křižovatkou ze 2 sekund na 3 se sníží počet aut, které projedou křižovatkou z 10 na cca 7 a to v situaci, kdy nikdo nechce odbočovat vlevo a nemusí tedy čekat a dávat přednost protijedoucím autům. Jako první byla zablokována křižovatka číslo 1 přibližně po 5 minutách a postupně křižovatka číslo 4 a 2 až po úplné zablokování sítě.

Snížení rychlosti o třetinu vedlo k rychlému zablokování první křižovatky přibližně po 5 minutách. Zhoršené počasí má tedy velký vliv na dopravu a její plynulost. Při zhoršeném počasí je i větší pravděpodobnost nehodovosti, se kterou simulace nepočítá, ale v realitě dopravu velmi ovlivňuje.



Graf 4: Napnění kapacity příjezdových cest v čase

### 6.3 Závěr

Petriho sítě jsou vhodným nástrojem pro simulaci dopravního provozu a předcházením kolapsu dopravních sítí. Druhá simulace ukázala, že PS dokážou odhalit i malé detaily, jako je jedna nevhodně zvolená křižovatka, kvůli které se může celá síť zablokovat. Další výhodou je i čas simulace. V poslední simulaci bylo simulováno 9 hodin reálného času a simulace trvala přibližně minutu.

Simulované scénáře ukazují schopnost vytvořeného modelu zachytit místo, kde dojde k prvnímu zablokování a následnému rozšíření zácpy do dalších směrů a zablokování dalších křižovatek. Tento jev lze pozorovat na měnicích se barvách spojujících silnic. Zároveň program vypisuje v každém kroku počet tokenů v jednotlivých místech. Knihovna obsahuje 12 základních typů křižovatek, které lze dále rozšířit o další neobvyklé křižovatky. Podmínkou je zachování stejně pojmenovaných vstupních a výstupních míst. Model je v současné době složen pouze z devíti křižovatek a není tedy vhodný pro simulaci větších dopravních sítí.

Možnou odchylkou simulace od reality je také stejná rychlost jízdy všech vozidel. To je způsobeno tím, že model je stochastická PS. Tento nedostatek lze vyřešit přidáním parametrů a vlastností každému tokenu a vytvořením barevné PS. Knihovna PetNetSim ovšem v současné době neumožňuje s barevnými PS pracovat.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Traffic Index ranking | TomTom Traffic Index. *Traffic Index ranking | TomTom Traffic Index* [online]. [vid. 2023-05-19].  
Dostupné z: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>
- [2] QI, Hongsheng, Yi YU, Qing TANG a Xianbiao HU. Intersection traffic deadlock formation and its probability: A petri net-based modeling approach. *IET Intelligent Transport Systems* [online]. 2022, **16**, n/a-n/a. Dostupné z: doi:10.1049/itr2.12210
- [3] What Is the Prisoner's Dilemma and How Does It Work? *Investopedia* [online]. [vid. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/p/prisoners-dilemma.asp>
- [4] GORZELANY, Jim. The Worst Traffic Jams In History. *Forbes* [online]. [vid. 2023-05-19].  
Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/jimgorzelany/2013/05/21/the-worst-traffic-jams-in-history/>
- [5] DEGOND, Pierre a Marcello DELITALA. Modelling and simulation of vehicular traffic jam formation. *Kinet. Relat. Models* [online]. 2008, **1**, 279–293.  
Dostupné z: doi:10.3934/krm.2008.1.279
- [6] ČEŠKA, Milan. *Petriho síť: úvod do teorie a nástroj pro aplikaci Petriho sítí*. 1994. vyd. Brno: CERM, nedatováno. ISBN 80-85867-35-4.
- [7] DORDA, Michal. Úvod do Petriho sítí. nedatováno.
- [8] NG, Kok Mun, Mamun Bin Ibne REAZ a Mohd Alauddin Mohd ALI. A Review on the Applications of Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of Urban Traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. 2013, **14**(2), 858–870. ISSN 1558-0016. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2013.2246153
- [9] LEVEQUE, Randall J. *Traffic\_flow* [online]. [vid. 2023-05-23]. Dostupné z: [http://faculty.washington.edu/rjl/riemann\\_book/Traffic\\_flow.html](http://faculty.washington.edu/rjl/riemann_book/Traffic_flow.html)
- [10] WEI, Hao. Build your first Graph Neural Network model to predict traffic speed in 20 minutes. *Medium* [online]. 26. říjen 2021 [vid. 2023-05-23].  
Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/build-your-first-graph-neural-network-model-to-predict-traffic-speed-in-20-minutes-b593f8f838e5>
- [11] Online učebnice autoškoly - Nauč se řídit. *Naucseridit.cz* [online]. 10. leden 2023 [vid. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.naucseridit.cz/>





## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1 Formace zablokování, převzato z [5].....	17
Obrázek 2: Značka místa bez tokenu a se dvěma tokeny .....	19
Obrázek 3: Značka přechodu.....	20
Obrázek 4 Značení vstupní a výstupní hrany .....	20
Obrázek 5: Petriho síť s inhibiční hranou.....	21
Obrázek 6: Petriho síť s prioritami .....	21
Obrázek 7: Stochastická Petriho síť .....	22
Obrázek 8: Časovaná Petriho síť .....	22
Obrázek 9: Model křižovatky .....	26
Obrázek 10: Schéma semaforu .....	27
Obrázek 11: Uživatelské rozhraní .....	29
Obrázek 12 Výsledek první simulace.....	30
Obrázek 13 Výsledek druhé simulace .....	31
Obrázek 14: Výsledek třetí simulace.....	32
Obrázek 15 Výsledek simulace za špatného počasí .....	33
Graf 1: Naplnění kapacity příjezdových cest .....	34
Graf 2: Naplněnost příjezdových cest ke křižovatce 5 .....	35
Graf 3: Naplněnost příjezdových cest ke křižovatce 5 .....	35
Graf 4: Naplnění kapacity příjezdových cest v čase .....	36



# SEZNAM PŘÍLOH

Odevzdáno elektronicky: BP\_Dofek\_Onfrej\_2023.zip