



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 A ŘÍZENÍ SVĚTELNÉ  
KŘÍŽOVATKY POMOCÍ PETRIHO SÍTÍ  
SIMULATION AND CONTROL TRAFFIC LIGHT CROSSING BY PETRI NET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Matyáš Zbranek

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Ladislav Dobrovský

BRNO 2022



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	<b>Matyáš Zbranek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ladislav Dobrovský</b>
Akademický rok:	2021/22

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 A ŘÍZENÍ SILNIČNÍHO PROVOZU POMOCÍ PETRIHO SÍTÍ

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Křižovatky vybavené světelným signalizačním zařízením lze modelovat jako diskrétní deterministické systémy s různou mírou flexibility a inteligentnosti řešení (změna režimu podle počtu vozidel, priorit vozidel záchranné služby a hasičů, atd.). Samotný provoz lze modelovat jako stochastický diskrétní systém. Pro oboje je možno využít Petriho sítě a nad simulačními scénáři vyhodnotit různé statistiky a možné problémy. Jelikož je Petriho síť poměrně abstraktní, je vhodné řešení doplnit o názorné vizualizace.

### Cíle bakalářské práce:

- rešerše současného využití Petriho sítí v silniční a železniční dopravě,
- namodelování světelně řízené křižovatky pomocí Petriho sítí,
- měření chování reálné křižovatky v terénu,
- analýza scénářů (vytížení křižovatky, parametry modelu)
- vizualizace.

### Seznam doporučené literatury:

BAUSE, Falko a Pieter S, KRITZINGER: Stochastic Petri Nets - An Introduction to the Theory. Vieweg, 2002, ISBN 3-528-15535-3.

ZÍTEK, Pavel.: Simulace dynamických systémů. Praha: SNTL, první vydání, 1990, ISBN 80-0300330-x.



ŠŤASTNÝ, Jiří, JEŽEK, Michal, STANĚK Kamil: Simulace dynamických systémů. Elektronická studijní opora. VUT Brno, 2020.

ĎURIŠ, Anton. Simulace distribuovaných systémů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 79 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

DOBROVSKÝ, Ladislav: Simulační nástroj PetNetSim, dostupné z <https://github.com/karna48/petnetsim>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá modelováním, simulováním a řízením reálné světelné křižovatky pomocí Petriho sítí. V dnešní době, kdy mnoho lidí vlastní automobil, se silniční provoz a čas strávený na cestách stává důležitou součástí života. Křižovatky jsou často kritickými místy, kde se provoz zpomaluje, případně i zastavuje. V teoretické části jsou představeny Petriho sítě, některé systémy řízení provozu a studie, které řešily dopravní situace pomocí Petriho sítí. Praktická část se opírá o měření provozu na křižovatce. Je popsán model semaforu, odbavování automobilů a model celé křižovatky. Aby byl provoz v simulaci co nejbližší reálnému chování, jsou použity stochasticky časované Petriho sítě. Dále jsou navrženy možné sekvence řízení a provedeny jejich simulace s odlišnými intenzitami provozu. Nakonec jsou všechna data vyhodnocena a návrhy porovnány. Pro vytváření modelů byl použit editor knihovny PetNetSim.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the modelling, simulation and control of a real traffic light intersection using Petri nets. Nowadays, when many people own a car, road traffic and time spent on the road becomes an important part of life. Intersections are often critical places where traffic slows down or even stops. The theoretical part introduces Petri nets, some traffic management systems and studies that have solved traffic situations using Petri nets. The practical part relies on traffic measurements at the intersection. The traffic light model, car clearance and the model of the whole intersection are described. In order to make the traffic in the simulation as close as possible to the real behaviour, stochastically timed Petri nets are used. Furthermore, possible control sequences are proposed and simulated with different traffic volumes. Finally, all data are evaluated and the designs are compared. The PetNetSim library editor was used to generate the models.



## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Petriho sítě, časované Petriho sítě, PetNetSim, světelná křižovatka, doprava, simulace

## **KEYWORDS**

Petri nets, timed Petri Nets, PetNetSim, traffic light intersection, traffic, simulation



2022

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZBRANEK, Matyáš. *Simulace a řízení silničního provozu pomocí Petriho sítí*. Brno, 2022, 51 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139982>.  
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 vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Dobrovskému za přínosné rady a čas, který mi věnoval. Velký dík také patří mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejen při psaní této práce, ale po celé mé studium.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že, 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 c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2022

.....

Matyáš Zbranek



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PETRIHO SÍŤE.....</b>	<b>17</b>
2.1	Historie .....	17
2.2	Grafické znázornění.....	17
2.3	Formální definice P/T .....	18
2.4	Možné propojení částí .....	18
2.5	Aktivace přechodů.....	18
2.6	Konfliktní přechody.....	19
2.7	Prioritní přechody .....	19
2.8	Druhy Petriho sítí.....	19
2.9	Časované Petriho sítě.....	20
2.9.1	Druhy časovaných sítí .....	20
2.9.2	Trvání dějů.....	21
<b>3</b>	<b>SYSTÉMY ŘÍZENÍ PROVOZU.....</b>	<b>22</b>
3.1	Dopravní telematika .....	22
3.2	Telematická architektura města.....	22
3.3	Řízení dopravy ve městech.....	23
3.3.1	Systém MOTION .....	24
3.3.2	Systém TASS.....	24
3.4	Městská hromadná doprava .....	24
3.5	Detekce hustoty provozu .....	25
3.6	Petriho síť v silniční a železniční dopravě .....	25
3.6.1	Koordinaci linek MHD pomocí Petriho sítí .....	25
3.6.2	Signalizace podzemní dráhy .....	26
3.6.3	Řízení železničního provozu ve stanici .....	27
<b>4</b>	<b>SVĚTELNÁ KŘÍŽOVATKA.....</b>	<b>30</b>
4.1	Podoba křižovatky .....	30
4.2	Měření provozu.....	30
4.3	Současná konfigurace .....	32
<b>5</b>	<b>MODEL ŘÍZENÍ PROVOZU.....</b>	<b>33</b>
5.1	PetNetSim.....	33
5.2	Cyklus semaforu .....	33
5.3	Přepínání semaforů .....	35
5.4	Model příjezdu a odbavení vozidel .....	36
5.5	Kompletní model .....	37
5.6	PTV Vissim 2022 .....	38
5.7	Grafická simulace.....	39
5.8	Návrhy možných nových scénářů.....	40
5.8.1	Návrh č. 1 .....	40
5.8.2	Návrh č. 2 .....	40
5.8.3	Návrh č. 3 .....	41
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>42</b>
6.1	Výsledky simulací .....	42
6.2	Zhodnocení výsledků.....	45

<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>49</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>51</b>

# 1 ÚVOD

Rozvoj mobility je důsledkem zvýšení zájmu o možnost individuální dopravy. Na počátku 20. století si automobil mohl dovolit jen movitý člověk. Avšak od roku 1908 automobilka Ford začíná se sériovou výrobou vozidla Ford model T, které se stalo prvním cenově dostupným pro střední třídu obyvatel. Tímto milníkem začíná světový zájem a následně rozmach individuální dopravy. I v současné době počty automobilů na silnicích rostou. V Evropské unii bylo k 5. listopadu 2021 628 osobních automobilů na 1000 obyvatel. K tomuto počtu je nutné přičíst také vozidla hromadné a nákladní dopravy. Díky tomu dochází ke zpomalování nebo zastavování vozidel na komunikacích, které vedou ke vzniku kongescí. Ty jsou příčinou extrémního znečištění ovzduší. Nejkritičtějšími místy jsou pak křižovatky a jejich blízké okolí.

Tato práce se nejprve zabývá Petriho sítěmi jako takovými. Dojde k vymezení základních pojmů a funkcí. Následně budou představeny časované Petriho sítě, které jsou důležité pro další postup. Třetí kapitola je věnována některým řídicím systémům využívaných v silniční dopravě. Některé postupy těchto systémů budou využity i při modelování. Následuje řešerše využití Petriho sítí v silniční a železniční dopravě. Praktická část je věnována samotnému řízení světelné křižovatky ve Vsetíně pomocí Petriho sítí. Popsáno bude pozorování křižovatky, dále měření provozu a jeho výsledky. Další kapitola je zaměřena na návrh modelu pro řízení v editoru *PetNetSim*. Tvorba tohoto modelu je rozdělena na dvě fáze. Nejprve jsou vytvořeny semaforey s variantou pevného řízení, a poté odbavování vozidel, které poslouží při počítání propustnosti celého systému. Protože jsou Petriho sítě relativně abstraktní, je přidána grafická simulace. Je vytvořeno i několik odlišných návrhů, které jsou poté simulovány, a nakonec mezi sebou porovnány.





## 2 PETRIHO SÍTĚ

V roce 1962 Carl Adam Petri ve své disertační práci definoval formalismus pro popis souběžných synchronních distribučních systémů. Jedná se o grafickou reprezentaci struktury distribuovaného systému jako bipartitního grafu s ohodnocením.

### 2.1 Historie

Pojem Petriho sítě byl v průběhu času rozšiřován a zobecňován tak, aby jeho modely vyhovovaly praktickým potřebám. Z počátku se objevovaly dva zásadní nedostatky. Jedním z nich byla absence datového konceptu. Modely dosahovaly velmi velkých rozměrů, protože všechny datové operace se musely provádět na struktuře sítě. Druhý problém byl jednoúrovňový způsob modelování. Chybělo jakékoliv hierarchické uspořádání. [1]

V 80. letech začal vývoj sítí vyšší úrovně, které odstraňovaly tyto problémy. K. Jensenem byly vytvořeny barevné Petriho sítě, ve kterých byly černé tokeny nahrazeny barevnými, což představuje zavedení typů do těchto sítí. Jensen rovněž rozšiřuje sítě o proměnné, strážce, akce přechodů, inskripční výrazy hran a deklarace typů. [2]

### 2.2 Grafické znázornění

Grafická reprezentace Petriho sítí se vyznačuje svou jednoduchostí, přehledností a schopností modelování dynamiky systémů. Petriho sítě se skládají z následujících základních komponentů:

- **Místa** (places) – Jsou znázorněny kružnicemi. Obsahují stavovou informaci v podobě značek (tokenů). To se také může nazývat označením. Mohou obsahovat libovolný počet těchto značek. Ve speciálních případech může mít místo omezenou kapacitu.



Obrázek 1: Znak místa

- **Tečky** (tokens) – V práci bude dále používán přejatý anglický výraz token. Jsou znázorněny tečkou. Vyjadřují pravdivost jednotlivých podmínek (0 – token se v dané podmínce nenachází, podmínka není splněna, 1 – token se v dané podmínce nachází, podmínka je splněna).



Obrázek 2: Znak tokenu

- **Přechody** (transitions) – Jsou znázorněny obdélníky. Vyjadřují možné změny stavů. Při jejich aktivaci nastane změna hodnoty podmínky. Kromě okamžitých, existují také typy časované, prioritní nebo pravděpodobnostní.



Obrázek 3: Znak okamžitého přechodu

- **Orientované hrany** (arcs) – Jsou znázorněny šipkou. Určují logické vazby.



Obrázek 4: Znak orientované hrany

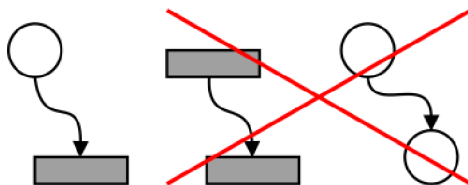
### 2.3 Formální definice P/T

Formálně je P/T Petriho síť definována jako šestice:  $\Sigma = (P, T, F, W, C, M_0)$  kde [3]:

- P je množina míst
- T je množina přechodů,  $P \cap T = \emptyset$
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  je incidenční relace
- $W: F \rightarrow \{1, 2, \dots\}$  je váhová funkce
- Kapacity míst:  $C: P \rightarrow \mathbb{N}$
- $M_0$  počáteční značení,  $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$  (M se nazývá značení Petriho sítí)

### 2.4 Možné propojení částí

Orientovaná hrana může spojovat pouze místo s přechodem nebo naopak. Nikdy nemůže nastat situace, kdy by bylo hranou spojeno místo s místem nebo přechod s přechodem.

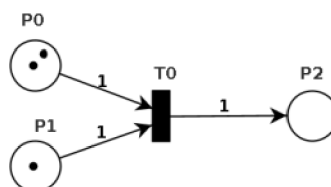


Obrázek 5: Možné propojení částí [3]

### 2.5 Aktivace přechodů

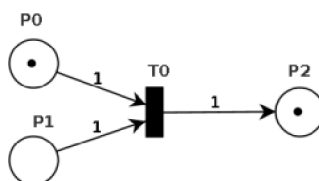
Proces uskutečnění přechodu má dvě části. Nejprve proběhne kontrola, je-li aktivace vůbec možná. Po úspěšné kontrole dochází k odpálení přechodu.

**Umožnění přechodu** – Přechod je možný, když všechna vstupní místa obsahují alespoň jeden token. [4] V síti na obrázku níže je možný přechod T0. Po odpálení, které je na obrázku 7, už přechod T0 kvůli nulovému počtu tokenů v místě P1 není možný.



Obrázek 6: Umožnění přechodu [4]

**Odpálení přechodu** – Přechod, který byl umožněn, může být odpálen. Následuje odebrání jednoho tokenu z každého vstupního místa a přidá se jeden token do každého výstupního místa. [4] Na obrázku 7 lze vidět odebrání tokenů z míst P0 a P1 a přidání tokenu do místa P2.



Obrázek 7: Odpálení přechodu [5]

## 2.6 Konfliktní přechody

Konfliktní přechody se objevují v situacích, kdy je umožněno odpálit více přechodů. Přechody mohou být nezávislé, tzn. že se navzájem neovlivňují a odpalování probíhá v libovolném pořadí. Když nastane možnost, že přechod znemožní odpálení jiného, hovoří se o konfliktu.

„Konfliktní přechody modelují soupeření o zdroje a vzájemnou vylučnost dvou událostí. Nezávislé přechody modelují asynchronnost a paralelismus.“ [3]

## 2.7 Prioritní přechody

V mnoha Petriho sítích nastává situace, kdy je v jeden okamžik možné odpálit více než jeden přechod. Proto se přechodům dává priorita  $p_t \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ , kde vyšší číslo znamená vyšší prioritu. Přechody s prioritou jsou povoleny, když jsou umožněny v obyčejné Petriho síti bez priorit a zároveň žádné další přechody nemají vyšší prioritu. [6]

## 2.8 Druhy Petriho sítí

Od zveřejnění prvního typu C/E vzniklo v průběhu času několik dalších druhů. Jsou to tyto druhy [6]:

- **Obyčejné**
  - C/E (Condition/Event) Petriho síť – Model je složen z podmínek, událostí, tokenů a orientovaných hran. Jedná se o nejjednodušší

variantu. Kapacita místa a násobnost hran je rovna 1. Tento typ byl později rozšířen na model P/T.

- *P/T (Place/Transitions) Petriho sítě* – Podmínky jsou nahrazeny místy a události přechody. Kapacita míst a násobnost hran již není omezena.
- *P/T Petriho sítě s inhibičními hranami* – Inhibiční hrana je speciální orientovaná hrana, která směřuje z místa k přechodu. Má jiné značení než obyčejná hrana. Šipku nahrazuje kružnice. Inhibiční hrany používají převrácenou logiku vstupního místa. Jestliže na vstupním místě je nižší počet tokenů než je deklarováno, aktivuje se přechod.
- *P/T Petriho sítě s prioritami* – Ke každému přechodu je přiřazeno nezáporné celé číslo, které udává prioritu přechodu. Přechod je proveden, jestliže žádný jiný přechod nemá vyšší prioritu. Současně jsou provedeny pouze přechody se stejnou prioritou.

Přidáním priorit nebo inhibičních hran se síť stává Turingovsky úplnou. [1]

- **Časované**
  - *TPN<sup>1</sup> Časované Petriho sítě* – Tento typ umožní definovat čas, ve kterém se aktivuje přechod. To je důležité při modelování stochastických systémů.
- **Sítě vyšší úrovně**
  - *CPN<sup>2</sup> Barevné Petriho sítě* – Tokeny mají různé vlastnosti, které vyjadřují různé barvy.
  - *HPN<sup>3</sup> Hierarchické Petriho sítě* – Umožňuje rozklad modelu na menší části, se kterými se pracuje odděleně a společně tvoří celý systém.
  - *OOPN<sup>4</sup> Objektové Petriho sítě* – Je možná úplná integrace objektově orientovaných vlastností jako jsou polymorfismus a dědičnost. [5]

## 2.9 Časované Petriho sítě

Základní Petriho sítě pro analýzu stochastických systémů nejsou vhodné, protože nezahrnují čas, který je jedním z důležitých systémových parametrů. Je důležité modelovat čas, ve kterém nastane událost nebo čas, po který je zachován daný stav. Zaváděním času se zásadně mění chování Petriho sítí.

### 2.9.1 Druhy časovaných sítí

Časování může být spojeno s:

- **přechody** – Tyto sítě nazýváme TTPN<sup>5</sup>. K odpálení přechodu dochází po uplynutí definované doby. Tento typ lze rozdělit na další dvě varianty. [4]

<sup>1</sup> TPN – Timed Petri Net

<sup>2</sup> CPN – Coloured Petri Net

<sup>3</sup> HPN – Hierarchical Petri Net

<sup>4</sup> OOPN – Object Oriented Petri Net

<sup>5</sup> TTPN – Timed Transition Petri Net

- *modely s předběžným výběrem* – Po umožnění přechodu se tokeny rezervují pro tento přechod. Tím se pro ostatní přechody stanou nedostupnými.
- *závodní modely* – Tokeny nejsou rezervovány jedním přechodem  $t$ . Jsou dostupné pro všechny přechody z místa  $p$ . Jestliže je  $t$  umožněn po uplynutí daného času, je odpálen. To znamená, že všechny umožněné přechody mohou soutěžit o tokeny místa  $p$ . Přechod, který je odpálen nejrychleji, znemožní odpálení ostatních přechodů.
- *místa* – Síť se nazývá TPPN<sup>6</sup>. Token, který byl odpálen přechodem a nyní se dostal do místa, je držen v tomto místě po definovaný čas. Tím se stává nedostupným pro všechny přechody vázané na toto místo. Po uplynutí času se stává opět dostupným a může být odpálen. [5]
- *hranami* – Přesun po hraně probíhá za konečné rychlosti a trvá předem definovaný čas.
- *tokeny* – Přechod v síti je odpálen okamžitě, ale token, který tento přechod opustí, je opatřen časovým razítkem. Časové razítko určuje, kdy může být token opět použit. Hodnota časového razítka odpovídá globálnímu času v okamžiku provedení přechodu zvětšené o dobu trvání přechodu. [5]

### 2.9.2 Trvání dějů

Dobu odpálení přechodů lze charakterizovat jedním z následujících způsobů:

- *deterministicky* – V tomto případě se hovoří o časovaných Petriho sítích (TPN). Doba odpalování je konstantní.
- *stochasticky* – V tomto případě hovoříme o stochastických Petriho sítích (SPN<sup>7</sup>). Doby odpalování jsou náhodné, většinou s exponenciálním rozdělením.
- *kombinovaně* – V tomto případě hovoříme o zobecněných stochastických Petriho sítích (GSPN<sup>8</sup>). Stanovené časy jsou pro některé přechody konstantní, pro jiné přechody jsou to náhodné veličiny.

<sup>6</sup> TPPN – Timed Place Petri Net

<sup>7</sup> SPN – Stochastic Petri Net

<sup>8</sup> GSPN – Generalized Stochastic Petri Net

## 3 SYSTÉMY ŘÍZENÍ PROVOZU

V této kapitole budou představeny nejdůležitější a nejpoužívanější řešení a systémy řízení silničního provozu ve městech, včetně několika řešení pomocí Petriho sítí jak pro silniční, tak pro železniční dopravu.

V šedesátých letech 20. století začínají některé země používat systémy vyšší úrovně, které jsou nadstavbou obvyklých dopravních systémů, například obyčejné semaforey na křižovatkách. Inteligentní dopravní systémy – ITS<sup>9</sup> zvyšují efektivitu, komfort a bezpečnost dopravy dispečerům i cestujícím. Název ITS se používá spíše v USA a Japonsku. V Evropě se častěji setkáme s názvem dopravní telematika nebo telematika v dopravě. [7]

### 3.1 Dopravní telematika

Slovo telematika vzniklo spojením **tele**komunikace a **informatika** a vyjadřuje souvislost těchto dvou oborů. Využíváním je dosaženo snížení negativních vlivů dopravy na životní prostředí, zvýšení bezpečnosti, lepší využití ekonomických prostředků a většího komfortu pro cestující.

**Definice:** „Dopravní telematika integruje informační a telekomunikační technologie s dopravním inženýrstvím tak, aby se pro stávající infrastrukturu komunikací zvýšily přepravní výkony, stoupla bezpečnost a zvýšila se psychická pohoda cestujících a komfort přepravy.“ [8]

Dopravní telematiku a ITS lze rozdělit do několika subsystémů [7]:

- Služby pro cestující a řidiče
- Služby pro správce infrastruktury
- Služby pro provozovatele dopravy
- Služby pro státní a veřejnou správu
- Služby pro bezpečnostní a záchranný systém

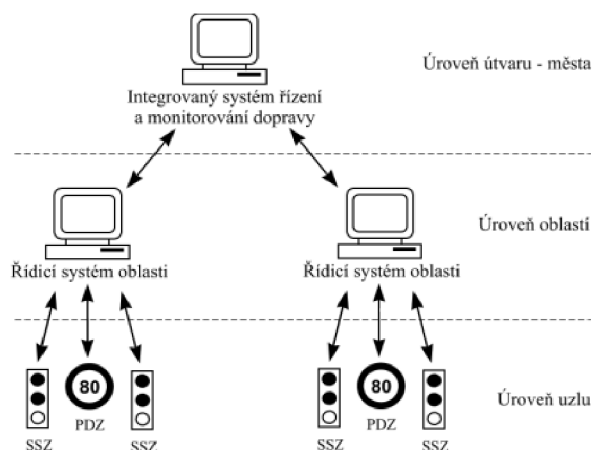
### 3.2 Telematická architektura města

Hlavními úkoly telematiky jsou optimalizace, řízení sítí, preferování městské hromadné dopravy a zajišťování návazností jiných systémů.

Strukturu architektury města nejčastěji tvoří tři vrstvy. Na nejnižší úrovni, tj. uzlu, je řadič světelného zařízení nebo ovládání tunelů. Tato úroveň přímo zasahuje do dopravních situací. Vyšší úrovně oblastí jsou uzavřené celky s minimální vazbou na okolí. Jsou řídicím systémem pro danou oblast. Nejvyšší úroveň je úroveň města, která monitoruje dopravu celého města či aglomerace. [7, 9]

---

<sup>9</sup> ITS – Intelligent traffic system



Obrázek 8: Telematická architektura města [7]

### 3.3 Řízení dopravy ve městech

Systémy řízení lze rozdělit do dvou skupin:

- **Pevné** – Principem je neměnné řízení v určitém časovém období. Předpokládá se konstantní intenzita provozu, kdy jsou změny pouze dlouhodobé. Reakce na rychle se měnící provoz téměř neexistují. Výhodou jsou nižší náklady oproti dynamickému řízení.
- **Dynamické** – Reaguje na okamžité změny a přizpůsobuje tak řízení signalizačních zařízení. Technicky se jedná o náročnější metodu, která je však velmi účinná ve velkých městech.

Prvky jednotlivých metod se mohou kombinovat. Pevné řízení je doporučeno samostatně používat pouze v lokalitách, kde dynamické řízení nemá žádný přínos. [10]

Dynamické řízení je možné dále členit na tyto dvě metody:

- **Centralizovaná inteligence řízení** – Vyhodnocuje všechny detektory v oblasti a optimalizuje výpočet šíření vozidel. Na základě těchto výpočtů může změnit parametry řízení. Tato metoda je nákladná a technicky náročná. Příkladem jsou systémy SCOOT<sup>10</sup> v některých městech Velké Británie nebo ve Spojených arabských emirátech. V Sydney je používán systém SCATS<sup>11</sup>. [9]
- **Decentralizovaná inteligence řízení** – Dopravní uzel je schopen okamžitě reagovat na aktuální situaci. Vyšší úroveň je počítač, který má funkci koordinátora jednotlivých uzlů. Toto řízení sbírá data všech detekčních zařízení a následně mění řídicí parametry. Nejpoužívanější systémy jsou MOTION<sup>12</sup> a TASS<sup>13</sup>, které jsou implementovány především v německých a rakouských městech. [7]

<sup>10</sup> SCOOT – Split, Cycle and Offset Optimization Technique

<sup>11</sup> SCATS – Sydney Coordinated Adaptive Traffic System

<sup>12</sup> MOTION – Method for the Optimisation of Traffic Signals In On-line controlled Networks

<sup>13</sup> TASS – Traffic Actuated Signal plan Selection

### 3.3.1 Systém MOTION

Je to makroskopický modulární řídicí systém. Kombinuje výhody účinného modelu dopravní sítě s možností okamžité reakce na změnu dopravní situace. Na základě analýzy se jednotlivé části signálního programu optimalizují pro všechny křižovatky v síti a vytvářejí se nové signální programy. [9]

V České republice se stále používají nejjednodušší systémy řízení oblastí. Avšak v Praze v oblasti Smíchova byla v letech 2003-2007 implementována metoda řízení MOTION. [11]

Tento systém pracuje na třech úrovních [11]:

- **Strategická úroveň** – Aktualizace probíhá každých 10-15 minut. Je určována doba cyklu, rozdělení zelených, základní sled fází a parametry koordinace.
- **Taktická úroveň** – Aktualizace probíhá každých 60-90 sekund. Na této úrovni lze ovlivnit základní sled fází metodou místního řízení pro danou délku cyklu. Toho lze docílit např. vložením speciální fáze pro preferování veřejné hromadné dopravy.
- **Operační úroveň** – Aktualizuje se každou sekundu. Tato úroveň je schopna reagovat na jednotlivá vozidla, především MHD.

Při neočekávaných situacích jako jsou nehody lze aktivovat modul CIM<sup>14</sup>.

### 3.3.2 Systém TASS

Aktuální dopravní situace je vyhodnocována na základě získaných dat uložených v systému pomocí seznamu podmínek. Následně je s využitím rozhodovacích tabulek vybrán rozhodovací plán. Systém TASS pracuje na dvou úrovních [9]:

- **Strategická úroveň** – Detekování dopravní situace v řízené oblasti a jejím okolí. Pro každou situaci existuje alespoň jeden základní plán.
- **Taktická úroveň** – Pro skupinu řadičů v dostatečné vzdálenosti před oblastí je vybírán signální plán. Cílem této úrovně je rychlá reakce na měnící se situaci v řízené oblasti. Vybere se alternativní signální plán, jehož základní charakteristiky by měly korespondovat se základním signálním plánem. Díky tomu nedochází k poruchám systému.

## 3.4 Městská hromadná doprava

Městská hromadná doprava byla v minulosti nejjednodušší a nejrychlejší možností přesunu. Dnes je ale lidmi častěji využíván osobní automobil. Kvůli tomu je MHD potlačována a zvyšuje se také dopad na životní prostředí. V centrech měst tyto dva druhy dopravy nelze úplně oddělit, a proto se hledají systémy, které by umožnily hromadné dopravě využít prioritní preference. Existují dva způsoby udělování priorit [7]:

- **pasivní preference** – Tuto možnost používají převážně trolejbusy, které využívají smyčkové detektory a tramvaje pomocí trolejových kontaktů.

---

<sup>14</sup> CIM – Congestion and Incident Management



- **aktivní preference** – U tohoto způsobu se využívá bezdrátové detekce a přihlášení do řadiče křižovatky. Palubní počítač po přihlášení vyhodnotí polohu vozidla. Poté počítač vyšle informaci o lince, vzdálenosti a směru do řadiče. Informace je řadičem vyhodnocena a cyklus světelných zařízení je přizpůsoben vozidlu.

### 3.5 Detekce hustoty provozu

Aby mohl být provoz efektivně dynamicky řízen, je nutné znát jeho intenzitu. K tomu se využívá několik druhů detektorů umístěných na semaforech nebo pod povrchem vozovky.

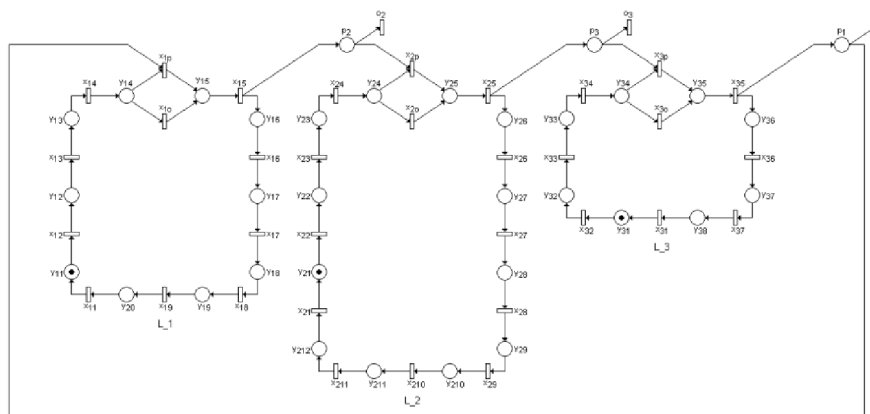
Nejprve se objevily pokusy o měření pomocí šíření zvuku, přerušení paprsků světla nebo geomagnetické detektory. Byly ale velmi náročné na údržbu, proto se hledal nový způsob. V 60. letech 20. století se začaly využívat indukční smyčky namontované pod silnicí. V České republice byly kombinovány i s pneumatickou detekcí. Dnes jsou hojně rozšířené magnetické a video detektory. Při snímání obrazu však hraje velkou roli počasí. Problémy nastávají při zhoršené viditelnosti způsobené například mlhou.

### 3.6 Petriho sítě v silniční a železniční dopravě

V průběhu času vzniklo množství studií, které s pomocí Petriho sítí zkoumaly faktory ovlivňující provoz na železnici, a to především bezpečnost. Několik studií se například věnovalo aplikacím CPN v oblasti funkčnosti a výkonnosti drážních systémů (Janczura, 1998, Jansen a kol., 1998, Fantí a kol., 2006), bezpečnosti provozu nebo zařízením na silničních přejezdech (Einer a kol., 2000). Také lidské chování na přejezdech bylo předmětem zkoumání, a to pomocí rozšířených deterministických a stochastických Petriho sítí (Slovak a kol., 2007).

#### 3.6.1 Koordinaci linek MHD pomocí Petriho sítí

Následující model vychází ze systému tří linek s jednou přestupní zastávkou. V celé síti se nachází 25 zastávek. Linka č. 1 jich má 9, linka č. 2 11 a linka č. 3 7. Každá linka se skládá z daného počtu přechodů a míst. Zastávky jsou symbolizovány přechody. Každá linka má svou výchozí zastávku a zastávky s číslem 5 jsou přestupní. Dvě přestupní zastávky jsou vždy propojeny dalšími dvěma přechody. Pohyb vozidel je vyjádřen místy. V celém systému existují dvě speciální místa, která propojují linky. Díky nim je možné vytvořit model přestupujících cestujících. Tokeny zde mají dva významy. Znázorňují pohyb vozidel a přestupující skupiny.



Obrázek 9: Model Petriho sítě MHD [12]

V případě požadavku na přestup mezi linkami, bude token setrvávat ve vstupním místě  $p_i$ . To znamená, bude-li token v druhém vstupním místě  $y_{i4}$ , přechod  $x_{ip}$  bude umožněn a dojde k odpálení tokenů určených cestujícím i vozidlům. Tím je zajištěno provázání přestupu s odjezdem dopravního prostředku. Přechod  $o_i$  bude umožněn tehdy, když cestující nebudou chtít přestoupit. Následně může být aktivován přechod  $x_{io}$ , protože token se nachází pouze v místě  $y_{i4}$ . [12]

### 3.6.2 Signalizace podzemní dráhy

Signalizace metra i železniční tratě pod zemí funguje na stejném principu jako na dráze nad zemí. Linka je rozdělena do bloků a každý blok je na začátku opatřen signalizačním zařízením. Metro bývá rozděleno do podstatně kratších bloků kvůli vysokému počtu vlaků jedoucích blízko od sebe a je tak větší nárok na spolehlivost a plynulost provozu. [13]

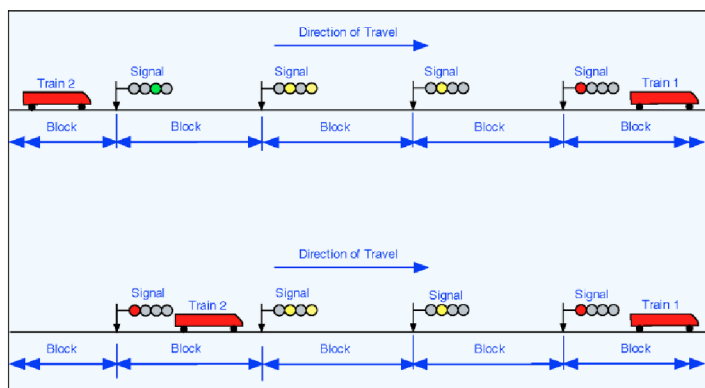
Původně se signalizace skládala jen ze signálů volno a stůj. Žluté signály byly přidávány později s rozvojem elektronických zařízení. Ovládání každého semaforu zvláště bylo neefektivní a nebezpečné. Proto se vyvinul systém známý jako automatický vlakový zabezpečovač ATP<sup>15</sup>. V minulosti převládala mechanická varianta, která se dnes již nepoužívá a nahradila ji elektronická verze. [14]

- **mechanický ATP** – Signalizační zařízení tvoří ocelové rameno namontované podél trati, které je spojeno se samotným signálem. Pokud je cesta volná, rameno je v dolní poloze a vlak může projet. Jestliže je signál stůj, rameno je v horní poloze. Projede-li vlak kolem signálu a nezastaví, udeří do spouštěcího kohoutku a aktivují se brzdy.
- **elektronický ATP** – Zahrnuje přenos informací ze semaforu do vlaku a tím je dosaženo eliminace chyb strojvedoucího. Probíhá kontrola signálů i rychlosti. [13]

Ve skutečnosti nejsou signalizační zařízení umístěna na začátku nového bloku. Přejede-li vlak signál červená, začne brzdít a je nemožné, aby zastavil okamžitě. Vzdálenost mezi zahájením brzdění a zastavením se nazývá bezpečná brzdná vzdálenost. Proto je mezi semaforem a novým blokem vždy vypočítaný volný prostor – přesah.

<sup>15</sup> ATP – Automatic train protection

Ve Spojených státech amerických byl běžně využíván tzv. absolutní blok. To znamená, že mezi dvěma vlaky je vždy alespoň jeden volný blok. Tento systém byl později přejímán zbytkem světa a dnes je k vidění na většině železnic a podzemních drah.

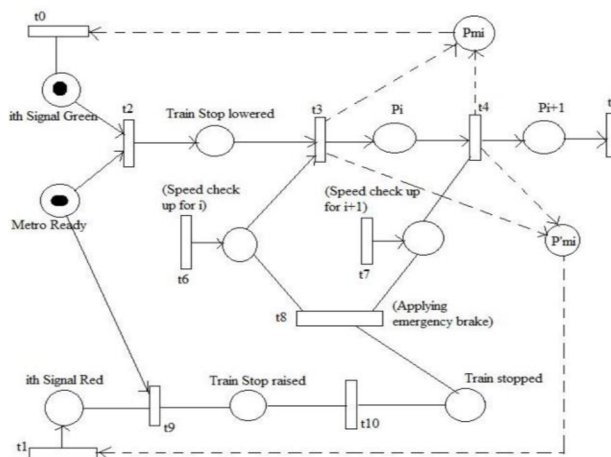


Obrázek 10: Schéma členění úseku železnice [13]

Jak bylo zmíněno, dnešní elektronické zabezpečovače kontrolují i maximální povolenou rychlost. Jestliže vlak přejede semafor na červenou nebo vyšší než dovolenou rychlostí, je zastaven.

První takový systém byl zprovozněn v Londýnském metru na lince Victoria v roce 1968 a stal se tak prvním automatizovaným systémem, i když ne zcela, protože v kabině stále seděl strojvedoucí, který převážel cestující.

Na dalším obrázku je znázorněna síť pro komplexní kontrolu jak barvy signálu, tak rychlosti.



Obrázek 11: Model Petriho sítě pro ATP [14]

### 3.6.3 Řízení železničního provozu ve stanicích

Na univerzitě *Sapienza* v Římě se v oblasti dopravy více než 10 let rozvíjela výzkumná činnost formalizace železničního provozu pomocí Petriho sítí. Tyto práce dále rozvíjely návrhy obecných a rozvrhových modulů (Malavasi G a kol., 2002). Konkrétně se jednalo o řízení pro tyto nejdůležitější prvky [15]:

- podoba stanic a provoz jízdnicích řádů
- řízení přejezdů
- vypravování vlaků a jejich pravidelné monitorování

Výsledné modely jsou použitelné pro velmi velké a složité železniční systémy, a to především díky své flexibilitě. Modely vždy obsahují společný běžný modul a několik dalších přídatných modulů a jsou vloženy do nejvyšší úrovně řízení.

Všechny fyzické prvky jako jsou výhybky, jsou v běžném modulu. Tyto třídy objektů jsou vyvinuty tak, aby se stejný objekt mohl využít pro různé situace bez překreslování pro konkrétní použití. Například třídu *TrackCircuit* lze využívat pro jízdu v obou směrech, jako poslední článek nebo mezičlánek v síti. Všechny třídy objektů jsou tedy co nejvíce univerzální. [16]

Pro modelování provozu stanice a jeho běžný modul jsou důležité čtyři třídy: kolejové obvody, přepínače, blokové a pokročilé signály.

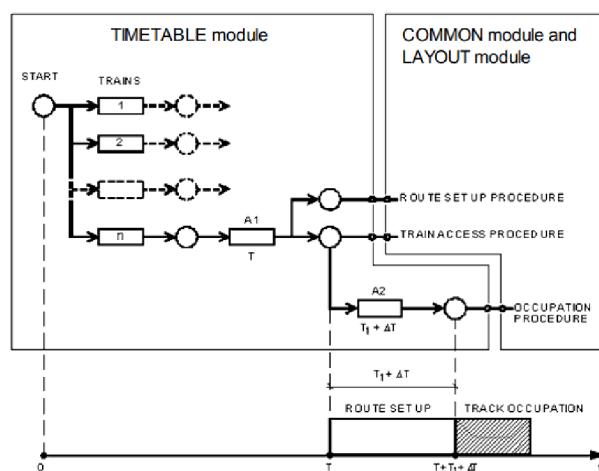
Jakékoliv rozvržení nádraží lze vytvořit sestavováním těchto tříd objektů. Objekty jsou vybaveny rozhraním pro vzájemnou komunikaci. To následně umožní průchody tokenů přes objekty, čímž se vše sjednotí do jedné sítě.

Dalším krokem je tvorba počátečních a koncových bodů tras vlaků. Tímto vzniká množství podsítí pro tyto vlaky.

Pro simulaci přiblížení a volby trasy dle jízdních řádů je nutný modul rozvrhu, který je připojen k běžnému modulu. [15,16] V tomto modulu je také možnost stochastického přidání pravidelných zpoždění a poruch. Model je schopen importovat soubor s informacemi o zpoždění, které jsou dále předány konkrétním přechodům. Ve stejném souboru jsou také informace týkající se požadované trasy. Ty jsou použity speciálním přechodem s názvem *Selektor*, který v důsledku svého naprogramování dokáže identifikovat token podle čísla jeho vlajky a vybere pro něj správnou cestu. Pokud token dorazí k danému místu na této trase, probíhá čtyřfázová kontrola [16]:

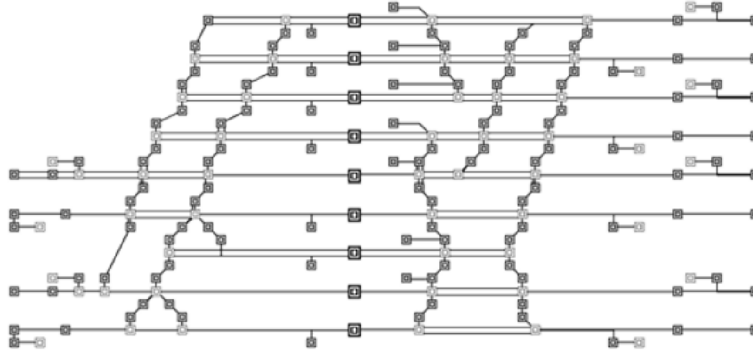
- i. záznam
- ii. blokování
- iii. kontrola existence
- iv. kontrola svobody

Pouze pokud je kontrola trasy pozitivní, pokračuje vlak dále a jeho trasa je zaznamenána pro ostatní vlaky.



Obrázek 12: Moduly řízení železniční stanice [15]

Celý model byl úspěšně testován nejprve na malých stanicích, poté na systému několika menších stanic, a nakonec na velkém nádraží Roma Ostiense. Toto nádraží má ve skutečnosti 15 kolejí, ale konečná studie proběhla na zjednodušené variantě s 9 kolejemi, 70 výhybkami, 80 okruhy a 63 možnými cestami.



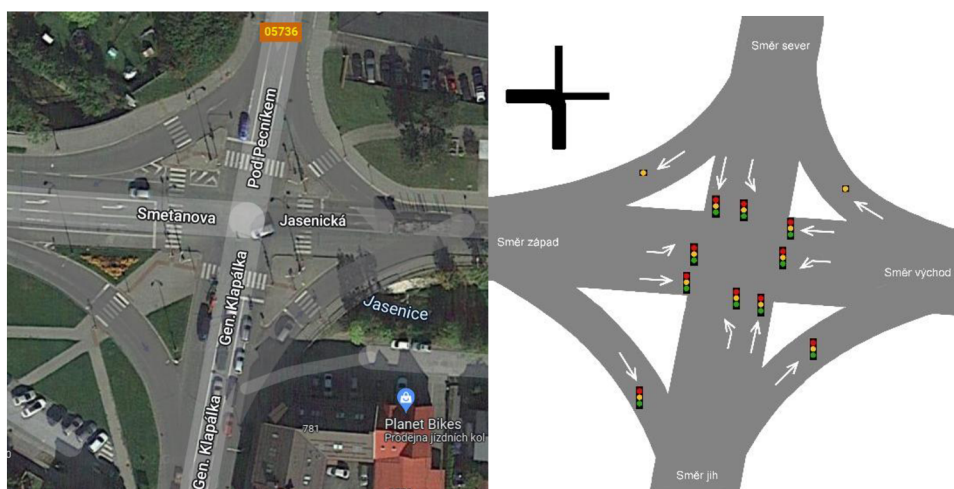
*Obrázek 13: Schéma stanice Roma Ostiense [16]*

## 4 SVĚTELNÁ KŘIŽOVATKA

Světelná křižovatka, která je použita v této práci se nachází ve Vsetíně přibližně na souřadnicích 49°20'00.6"N 18°00'10.8"E. Je jedinou světelnou křižovatkou v tomto městě a dochází zde ke křížení ulic Smetanova, Pod Pecníkem, Jasnická a Generála Klapálka.

### 4.1 Podoba křižovatky

Hlavní silnice vede ze západu na jih, toho bude využito při modelování nutných předností v jízdě. Na obrázku níže je letecký snímek a zjednodušený náčrt křižovatky. Náčrt obsahuje určení hlavní silnice a popis směrů pro lepší orientaci. Jsou zde vyznačeny všechny pruhy a světelná zařízení, která jim přísluší. Křižovatka disponuje dvěma semaforů s pouze oranžovým světlem, které provoz neřídí a deseti běžnými semaforů se třemi barvami.

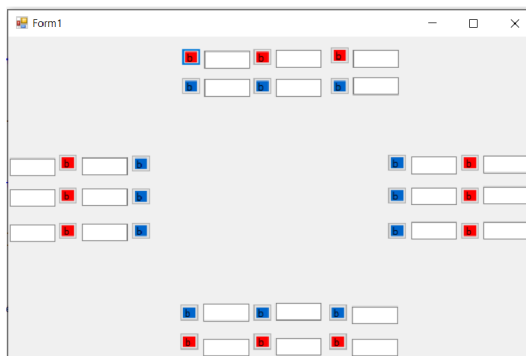


Obrázek 14: Podoba křižovatky

### 4.2 Měření provozu

Měření probíhalo pomocí webové kamery. Uskutečnilo se 15. února 2022 pro směry západ, východ a sever a 16. února 2022 pro směr jih vždy od 14:00 do 15:00.

K měření provozu byl použit vlastní jednoduchý software vytvořený ve *Visual Studiu 2019*. Program je napsaný v jazyce *C#*. Obsahuje několik okének, které vyjadřují počet vozidel a stejný počet barevných tlačítek. Modrá tlačítka jsou určena pro osobní automobily a červená pro autobusy a nákladní automobily. Po stisku tlačítka se počet v příslušném okénku zvýší o 1. Pro přehlednost je vše rozděleno do čtyř směrů a každý směr je rozdělen na levý, pravý a přímý pruh. Protože webová kamera snímá křižovatkou ze západního směru, je v programu vše otočeno o 90 stupňů proti směru hodin. Dole je západ, vpravo jih, nahoře východ a vlevo sever.



Obrázek 15: Vzhled pomocného programu

V tabulce níže jsou uvedeny naměřené počty vozidel z jednotlivých směrů a všech jízdních pruhů. Tyto hodnoty budou dále brány jako stoprocentní vytížení.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty provozu

	Západ		Jih		Východ		Sever	
	os.	bus	os.	bus	os.	bus	os.	bus
Vlevo	32	0	224	12	225	1	100	3
Rovně	236	4	152	1	297	9	164	1
Vpravo	356	11	108	3	195	3	32	2
Celkem	639		500		730		302	

Další parametr, který byl měřen, byla doba průjezdu vozidel křižovatkou. U osobních automobilů byl tento čas přibližně 3 sekundy. U autobusů a nákladních vozidel přibližně 6 sekund. Procentuální zastoupení autobusů a nákladních automobilů z celkového počtu je velmi malé, proto nebyly tyto dvě kategorie dále rozlišovány.

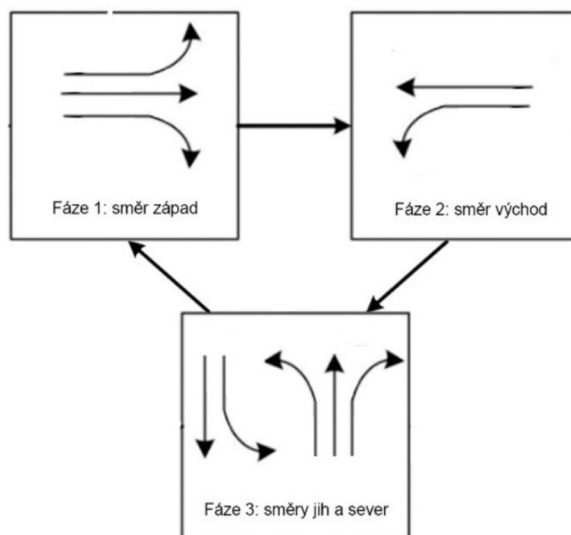
Další pozorování proběhlo 4. května 2022 přímo na místě mezi 18:00 a 18:30. To především kvůli zjištění, jestli jsou sekvence semaforů konstantní nebo se pomocí čidel řízení mění v závislosti na momentálním provozu. Doprava ze severního směru byla v některých okamžicích ve večerních hodinách intenzivnější než odpoledne. Ve chvíli, kdy čekalo na zelenou 8 vozidel a další přijížděla, interval mezi oranžovými signály byl 28 sekund. Když ovšem čekaly jen 2 vozidla a žádné další se neblížilo, čas pro průjezd se snížil na 12 sekund. Stejný přístup byl zjištěn i z ostatních směrů.

V odpoledních hodinách, kdy jsou všechny směry stále přibližně stejně vytížené, se sekvence neměnila. Proto budou všechny návrhy sítí pracovat s pevným řízením.

Světelná zařízení určená pro chodce svítí stále červeně, pouze pokud je stisknuto tlačítko pro požádání průchodu, rozsvítí se zelená. Počet přecházejících byl velmi nízký, proto chodci v modelu nejsou zahrnuti.

### 4.3 Současná konfigurace

V současnosti se řízení světelných zařízení skládá ze tří fází, které jsou graficky znázorněny na obrázku 17. V první fázi je signál zelená aktivován pouze ze západního směru pro všechny pruhy. V druhé fázi svítí zelená ve směru z východu pro pruhy rovně a vlevo, v poslední fázi je zelená rozsvícena pro směry z jihu a severu. Jak je znázorněno na obrázku 15, dva semaforey blikají pouze oranžově, tudíž provoz neovlivní a nejsou nijak řízené. Proto se s nimi v žádné s fázi npracuje.



Obrázek 16: Fáze současného řízení

Toto nastavení je pravděpodobně přizpůsobeno počtu vozidel v daných směrech, což dokládají i naměřené hodnoty v tabulce 1. Směry západ a východ jsou velmi vytížené a mohlo by docházet ke zpomalování, kdyby byly pouštěny současně. Směr jih je taktéž vytížen, naopak automobilů ze severu přijíždí velmi málo, proto tyto dva směry mohou být uvolňovány zároveň.

Celý tento cyklus je aktivní po celý den. Podle provozu se pak pouze mění časy trvání jednotlivých fází.

Tato konfigurace byla použita jako výchozí pro modelování v editoru *PetNetSim*.



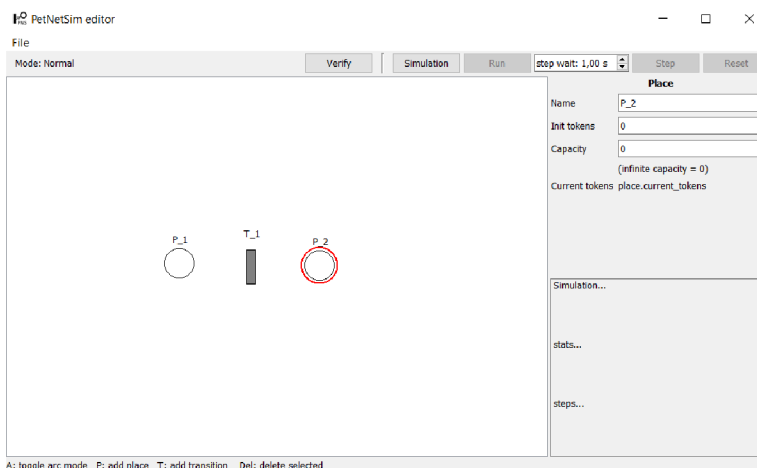
## 5 MODEL ŘÍZENÍ PROVOZU

Nejprve se tato kapitola zabývá jednotlivými částmi celého systému jako jsou semaforey, jejich cykly, příjezd a odbavování vozidel. Následně bude vše zkompletováno do funkčního modelu celé křižovatky.

Dále budou v práci pojmy jako automobil, vozidlo, řidič a token zaměňovány, protože pro potřeby modelů a simulací mají totožný význam.

### 5.1 PetNetSim

Jedná se o knihovnu napsanou v jazyce *Python* pomocí objektově orientovaného programování. Obsahuje knihovnu a grafický editor, který pro ukládání sítí používá formát *json*. Knihovna *PetNetSim* umožňuje práci jak s obyčejnými, tak i s časovanými Petriho sítěmi.



Obrázek 17: PetNetSim editor

Ovládání je velmi přehledné a jednoduché. Levou část tvoří okno, ve kterém se nachází samotný model. Stiskem klávesy P nebo T se vytvoří místo nebo přechod na současné pozici kurzoru myši. Klávesou A se zobrazí možnosti propojení orientovanými hranami.

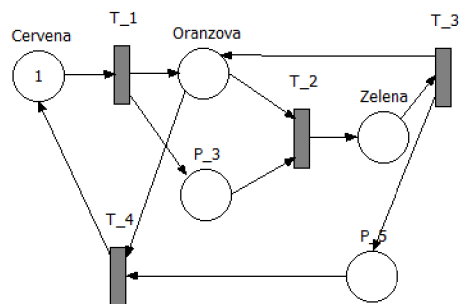
V pravé části je nastavení aktuálně vybrané části. U míst je možné nastavit inicializační tokeny a kapacitu. U přechodů lze nastavovat druh přechodu a jeho detailní parametry. U orientovaných hran lze určit počet přesouvajících se tokenů nebo zda je hrana inhibítorem. V pravé horní části se nachází parametry simulace.

### 5.2 Cyklus semaforu

První návrh, který obsahoval pouze 3 přechody a 3 místa pro zelenou, oranžovou a červenou, nebyl pro řízení vhodný. Postupným testováním a přidáváním dalších prvků

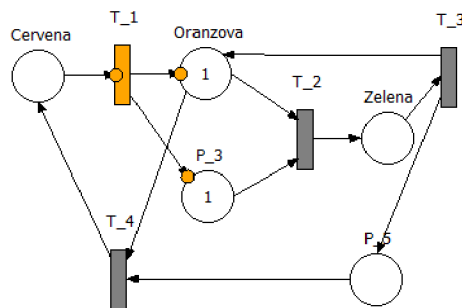
vznikl návrh, který je na obrázku níže. Skládá se z pěti míst a čtyř přechodů. Důležitá jsou místa s názvy *Cervena*, *Oranzova* a *Zelena*, která reprezentují barvy na semaforu. Místa *P\_3* a *P\_5* jsou pouze pomocná.

Celý cyklus začíná s inicializačním tokenem v místě *Cervena*. Tento token se může pochopitelně nacházet i v místě *Oranzova* nebo *Zelena*.



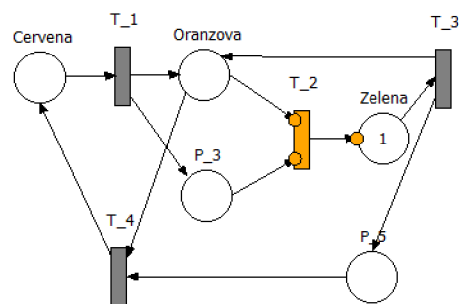
Obrázek 18.1: Cyklus semaforu

Token je uvolněn a následně přechodem  $T_1$  odpálen do míst *Oranzova* a  $P_3$ . Na semaforu se rozsvítila i oranžová.



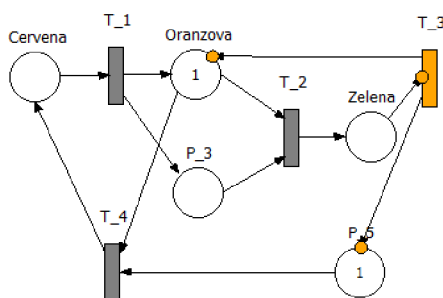
Obrázek 19.2

Dalším krokem je odpálení tokenů přechodem  $T_2$  do místa *Zelena*. V pozdější etapě bude přechod  $T_3$  nahrazen deterministicky časovaným přechodem. Stejně tak mohl být časovaný i přechod  $T_2$ , ale pro lepší představu byl zvolen  $T_3$ , protože nejdříve bude token v místě *Zelena*.



Obrázek 19.3

Dále je token odpálen přechodem  $T_3$  zpět do místa *Oranzova* a pomocného místa  $P_5$ .



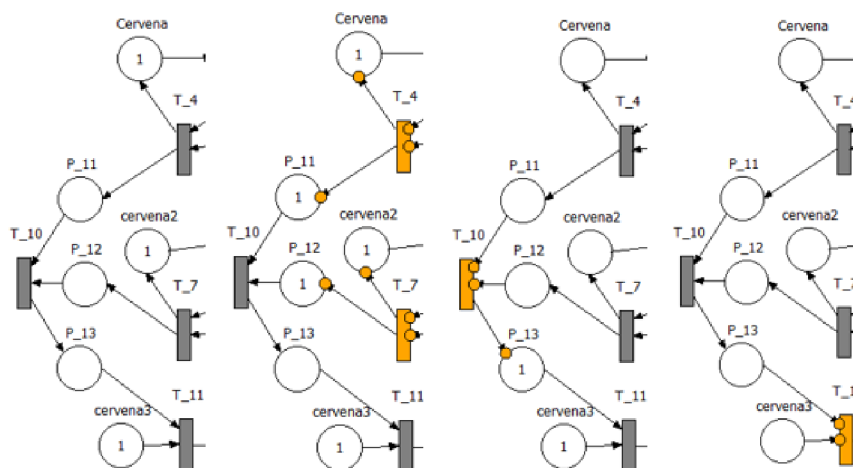
Obrázek 19.4

V posledním kroku jsou tokeny přechodem  $T_4$  odpáleny zpět do místa *Cervena* a cyklus se opakuje.

Oranžový semafor může svítit po červené i po zelené a pomocí míst  $P_3$  a  $P_5$  je tedy určen typ oranžového signálu.

### 5.3 Přepínání semaforů

Je-li cyklus na svém konci a svítí opět červená, je možné dát zelenou vozidlům v jiném směru. Avšak v některých situacích se červený signál například pro pruh vpravo rozsvítí později než pro pruh rovně a vlevo. Toto je dáno nastavením času v přechodech za místem *Zelena*. V tom případě nelze dát zelenou jinému směru, mohlo by docházet ke kolizím. Proto je nutné počkat až je celý směr zastaven a na všech semaforech svítí červená, a poté je token odpálen a další semafor zahajuje svou sekvenci.



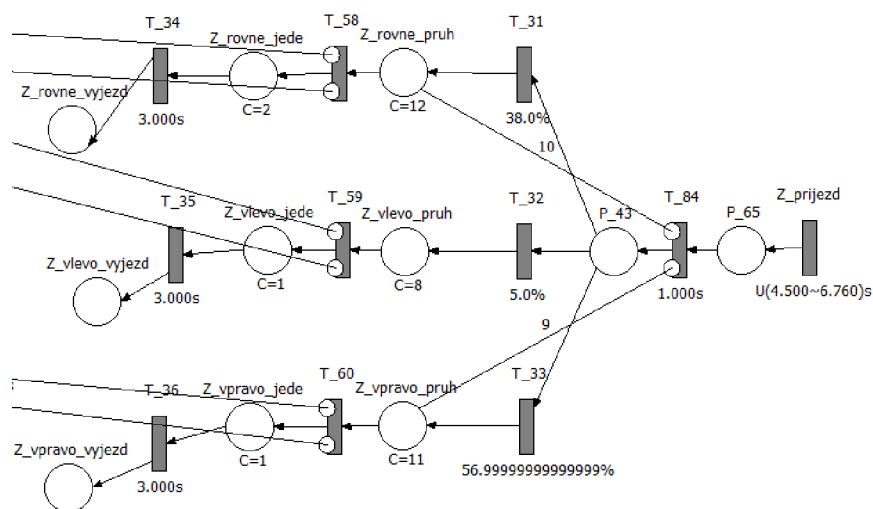
Obrázek 19: Výměna cyklů semaforů

Cykly pro místa *Cervena* a *cervena2* jsou před dokončením a tokeny v přechodech  $T_4$  a  $T_7$  budou odpáleny. Mezitím na třetím semaforu stále svítí červená. Po odpálení  $T_4$  a  $T_7$  se tokeny dostanou přes místa  $P_{11}$  a  $P_{12}$  do přechodu  $T_{10}$ . Ten je odpálen jen za předpokladu, že již svítí všude červená, a následně je dán signál do třetího semaforu, že může začít jeho cyklus. Funkce místa  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  a přechodu  $T_{10}$  sehraje v tvorbě nových scénářů důležitou roli.

V této fázi projektu byly z míst *Cervena* a *cervena2* opět uvolněny tokeny, tomu zabrání uzavření celého systému všech semaforů v pozdější fázi.

## 5.4 Model příjezdu a odbavení vozidel

Průjezd vozidel křižovatkou je znázorněn následujícím schématem. Tato část náleží konkrétně směru západ.



Obrázek 20: Model odbavení vozidel

Příjezd vozidel je simulován přechodem *Z\_prijezd*. Protože je v reálném světě nemožné, aby automobily přijížděly ve stále stejných časových rozestupech, bylo použito stochastické generování tokenů. Střed tohoto intervalu je vypočítán jako  $\frac{3600}{\text{počet vozidel v daném směru}}$ . Jeho minimální a maximální hodnota je  $\pm 20\%$  z vypočítané hodnoty.

Za místem *P\_43* v přechodech *T\_31*, *T\_32* a *T\_33* následuje rozhodování řidiče, kam chce jet. Opět byl z naměřených hodnot vypočítán poměr řidičů, kteří chtějí jet vlevo, vpravo nebo rovně. Tokeny v místech *Z\_rovne\_pruh*, *Z\_vlevo\_pruh* a *Z\_vpravo\_pruh* udávají počty čekajících vozidel, které jsou již zařazeny v pruhu. Současný vzhled křižovatky dovoluje v každém z pruhů pouze omezenou kapacitu. Tato kapacita je však v některých místech ještě upravena. Konkrétně v tomto případě je kapacita pro rovně 10, pro vlevo 9 a pro vpravo 8 tokenů. Budou-li se další vozidla chtít do některého z již zaplněných pruhů zařadit, zablokují příjezd pro další řidiče. To je také důvod, proč z těchto míst vede inhibitor k přechodu *T\_84*, který zabrání přijíždění dalších automobilů. Ty pak musejí čekat v místě *P\_65*.

Další v pořadí jsou přechody *T\_58*, *T\_59* a *T\_60*. Do každého z těchto přechodů vedou dvě inhibiční hrany z míst *cervena* a *oranzova* příslušného signalizačního zařízení. Protože, když svítí červená či oranžová nebo jinak řečeno, je-li v místě *cervena* nebo *oranzova* alespoň jeden token, nemohou řidiči jet. Jestliže svítí zelená pro daný pruh, jsou tyto přechody umožněny, odpáleny a vozidla mohou vjet do křižovatky.

Dále jsou v řetězci místa, která mají v názvu slovo *\_jede*. Pokud je v takovém místě alokován token, znamená to, že vozidlo vjelo do křižovatky. V přímých pruzích mohou vjet až dvě vozidla. To kvůli jednodušší práci s přednostmi v jízdě.

Přechody  $T_{34}$ ,  $T_{35}$  a  $T_{36}$  jsou časované deterministicky a tento čas představuje dobu průjezdu vozidel křižovatkou, který byl zjištěn pozorováním.

Poté vozidla opouštějí křižovátku. To je znázorněno alokováním do míst *\_vyjezd*. Zároveň počet tokenů v těchto místech slouží pro zjištění propustnosti celého systému.

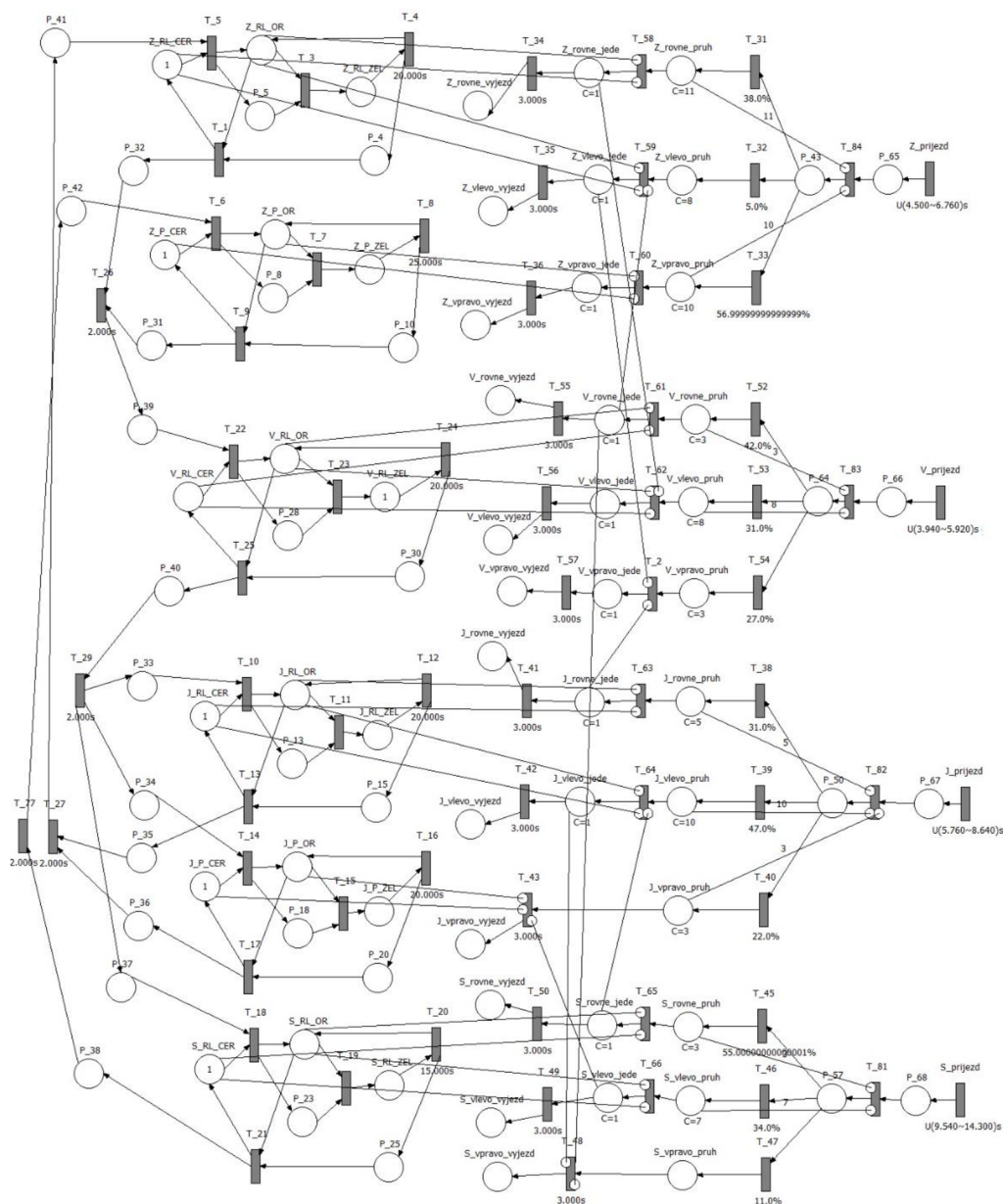
## 5.5 Kompletní model

Na obrázku níže je návrh modelu pro pevné řízení konfigurace popsané v předchozí kapitole. V levé části se nachází signalizační část. Z některých směrů byla pro zjednodušení celého modelu vytvořena společná podsíť pro dva semaforey. Na pravé straně je pak část určená pro příjezdy, čekání a odjezdy automobilů.

Ze směrů jih, východ a sever platí omezení pro odbočení vpravo, kvůli již zmíněné podobě a nedovoluje zařazení do těchto pruhů, pokud v přímém pruhu již čeká určitý počet vozidel. To je vyřešeno inhibičními hranami s daným koeficientem. Dále jsou pomocí inhibitorů ošetřeny také přednosti v jízdě, které jsou dány směrem hlavní silnice. Tyto přednosti jsou však při současném nastavení sekvencí semaforů téměř nevyužity. Budou ale důležité při návrzích jiných scénářů.

Přechody  $T_{26}$ ,  $T_{27}$ ,  $T_{29}$  a  $T_{77}$  mají deterministicky nastavený čas 2 sekundy. To znamená, že již svítí červená, ale čeká se tento čas, aby mohla všechna vozidla bezpečně opustit křižovátku. Stejně přechody budou později využívány v jiných konfiguracích. Budou ale spojeny orientovanými hranami s jinými místy, tím se docílí změn v přepínání semaforů.

Nejdůležitější částí pro řízení celé sítě je její levá polovina, která může být použita i pro jiné křižovatky s provedením pouze minimálních změn.



Obrázek 21: Kompletní model

## 5.6 PTV Vissim 2022

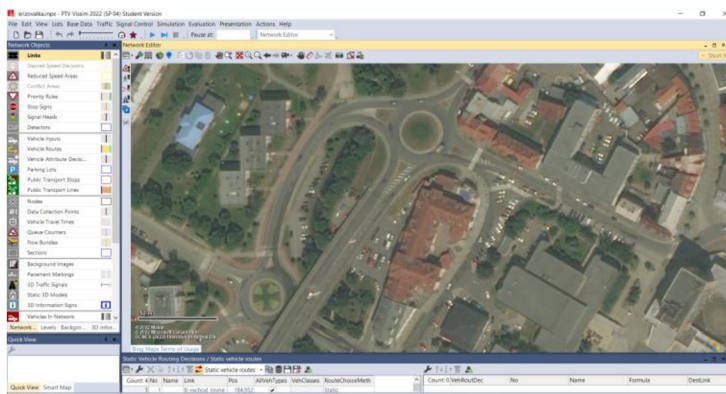
Jedná se o mikroskopický multi-modální software pro simulaci toku dopravy vyvinutý německou společností *PTV Planung Transport Verkehr AG* v roce 1992. [22] Dnes patří k předním simulačním programům pro dopravní řešení. Pro tuto práci byl program vybrán pro svou komplexnost a jednoduchost. Na následujícím obrázku je vidět pracovní prostředí.

Velkou výhodou je, že při vytváření simulace lze pracovat s normální i leteckou mapou. Obě mapy mají totožné měřítko se všemi prvky, které lze přidávat, takže vše lze modelovat s velkou přesností.

V levé nabídce je seznam všech dostupných nástrojů, které lze využívat. V této práci jsou důležité jen některé, které budou popsány níže.

- **Links** – Umisťování cest jednoho směru táhnutím myši. Mohou být jednoproudé i dvouproudé. Jejich šířka je volitelná. Mohou být spojovány konektory.
- **Conflict areas** – Pokud se dvě cesty kříží, nazývá se to konfliktní zóna. Pomocí tohoto nástroje lze tato místa jednoduše najít a určit v nich přednosti v jízdě.
- **Signal heads** – Slouží k umístění semaforu na zvolené místo.
- **Vehicle inputs** – Místa, která generují nastavený počet vozidel.
- **Vehicle routes** – Nadefinované cesty, kterými mohou automobily jezdit. V základním nastavení všechna vozidla jedou jen rovně a neodbočují.

V horní liště se nachází detailní nastavení použitých komponent. Nejdůležitější je pro tuto práci nabídka *Signal Control*, kde je možno nastavovat parametry všech signalizačních zařízení. Nabízí se možnosti spojování semaforů do skupin. Lze také ovlivnit jejich druh, a tím v jakém pořadí budou barvy svítit, případně lze nastavit blikání. Pro jednotlivé skupiny lze nastavovat časy sekvencí.



Obrázek 22: Prostředí PTV Vissim 2022

## 5.7 Grafická simulace

Po nastavení všech parametrů tak, aby se shodovaly s modelem Petriho sítí, může být spuštěna simulace.

Na obrázku 24 je zachycen jeden okamžik z této simulace. Šedé čáry jsou cestami. Pro větší přehlednost jsou umístěny dále od sebe. Barevné ovály jsou pohybující se vozidla. Zelené a červené čáry blízko středu představují semaforey. Šipky na cestách jsou pouze orientační pro člověka pracujícího s programem a nemají žádný vliv na provoz.



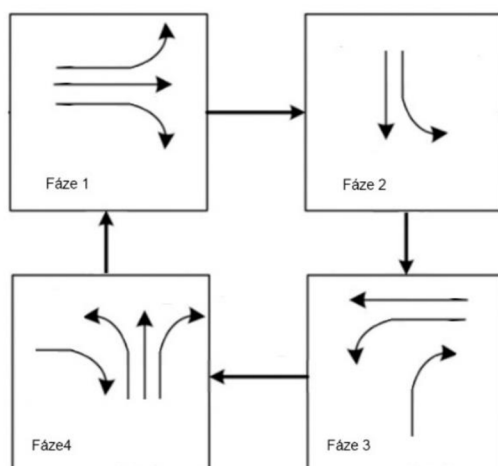
Obrázek 23: Snímek z grafické simulace

## 5.8 Návrhy možných nových scénářů

Tato kapitola obsahuje tři navržené alternativní scénáře pro řízení, které pracují s dostupnými signalizačními zařízeními. Všechny návrhy byly nejdříve v programu *PetNetSim* odsimulovány s naměřenými počty přijíždějících vozidel. Později s intenzitami provozu 120 % a 150 %. První důvod je takový, že při větší vytiženosti jsou lépe rozpoznatelná kritická místa, kde se tvoří dlouhé fronty. Druhým je pak ověření, zda je daný návrh schopen zvládnout i vyšší nápor vozidel. Následně byla navržená řešení vyhodnocena a jejich výsledky byly porovnány. Všechny simulace trvaly 1980 sekund.

### 5.8.1 Návrh č. 1

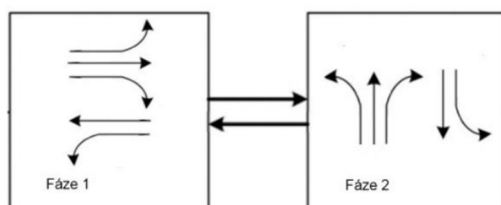
Toto řešení pracuje s možností prodloužením intervalů zelené pro odbočování vpravo i do fází pro jiné směry. Tím je docíleno více zelených signálů v jeden okamžik při zachování bezpečnosti.



Obrázek 24: Fáze řešení č. 1

### 5.8.2 Návrh č. 2

V tomto scénáři se rozsvěcuje zelená vždy protilehlým směřům a mezi červenými signály je prostor 4 sekundy. Dojde tak k razantnímu zkrácení celého cyklu. Zároveň je ale nutné podotknout, že najednou vjíždí mnohem více vozidel do křižovatky. S tím přichází vyšší nárok na obezřetnost řidičů.



Obrázek 25: Fáze návrhu č. 2



### **5.8.3 Návrh č. 3**

Zde je zachován původní sled fází. Mění se pouze intervaly, kdy jsou aktivní. Směry východ a jih jsou prodlouženy na 30 sekund, to zároveň dává možnost prodloužit i odbočování vpravo ze západu na 35 sekund.

## 6 VYHODNOCENÍ

V této kapitole budou představeny výsledky simulací všech vytvořených variant a budou mezi sebou porovnány. Vždy každému řešení přísluší jedna tabulka, která obsahuje výsledky simulace se změřenými hodnotami provozu a také tabulka s daty pro vyšší hustoty dopravy, kde čísla 1,2 a 1,5 reprezentují 120 %, respektive 150 % počtu naměřených vozidel.

Propustnost bude uváděna v procentech, neboť se stochastickým generováním vozidel není možné vždy docílit jejich stejného množství. Údaje v závorkách značí počty vygenerovaných a čekajících ale neodbavených automobilů.

### 6.1 Výsledky simulací

Tabulka 2: *Výsledky původního řešení s běžným provozem*

	Západ	Jih	Východ (2)	Sever
Vlevo	13	142(1)	118(3)	62(2)
Rovně	117	71	175(2)	82(3)
Vpravo	216	63(1)	103	15
Celkem	346	272(2)	396(7)	162(5)

Tabulka 3: *Výsledky původního řešení s intenzivním provozem*

	Západ		Jih		Východ		Sever	
	1,2	1,5	1,2(2)	1,5(76)	1,2(3)	1,5(95)	1,2	1,5
Vlevo	18	25	148(5)	147(10)	146(3)	148(3)	65	80(3)
Rovně	155(2)	212(1)	105(3)	95(2)	208(2)	202(3)	108(2)	133(1)
Vpravo	243	280(5)	63	85	110	148	25	27
Celkem	416(2)	517(6)	316(10)	327(88)	464(8)	498(101)	198(2)	240(4)

S naměřenými hodnotami bylo současné nastavení schopné odbavit téměř všechna vozidla. Propustnost je 1176 z 1188 a 98,99 %.

S koeficientem provozu 1,2 docházelo k tvorbě menších front z východu a jihu. Celková propustnost je 1394 z 1416 a 98,44 %.

Intenzita provozu 150 % původních hodnot zapříčinila potíže z východního i jižního směru. Fronty se tvořily téměř od počátku a tato sekvence je nebyla schopna zmenšit. Propustnost v tomto případě je 1582 z 1781, to je 88,82 %.

Tabulka 4: Výsledky prvního návrhu řešení s běžným provozem

	Západ	Jih	Východ (4)	Sever
Vlevo	14	121	128(3)	62(2)
Rovně	116	86(1)	166(2)	88(2)
Vpravo	217	67	99	12
Celkem	347	274(1)	393(9)	162(4)

Tabulka 5: Výsledky prvního návrhu řešení s intenzivním provozem

	Západ		Jih		Východ		Sever	
	1,2	1,5	1,2	1,5(14)	1,2(42)	1,5(162)	1,2(1)	1,5(3)
Vlevo	25	22	151(1)	192(9)	124(7)	131(2)	64(3)	87(1)
Rovně	152(1)	193(6)	97(1)	127	181(1)	179(2)	104(3)	127(3)
Vpravo	245(2)	301(3)	81(1)	73	125	121	25	27
Celkem	422(3)	516(9)	329(3)	392(23)	430(50)	431(164)	193(7)	241(7)

Při naměřených hodnotách provozu probíhalo vše bez komplikací. Díky změně sekvenci docházelo k tvorbě menších front z jihu a pro odbočování vpravo ze západu. Kvůli prodloužení celého cyklu se tvořily větší fronty z východu, avšak kromě jednoho okamžiku, kdy čekalo 14 řidičů, tyto fronty nepředstavovaly problém. Propustnost je 1176 z 1190 a 98,82 %.

Při intenzitě provozu 120 % docházelo k hromadění řidičů z východu, kteří nebyli odbaveni. Propustnost v tomto případě je 1374 z 1437, to je 95,62 %.

U hustoty dopravy s multiplikátorem 1,5 nastaly vážné potíže z východního směru. Již od počátku docházelo k tvorbě fronty, která se v průběhu času stále zvětšovala až dosáhla počtu 164 vozidel. I když tato varianta umožňuje vozidlům z jihu průjezd bez dávání předností, také se zde tvořily řady. Naopak ze směrů západ a sever byla odbavena téměř všechna vozidla. Celková propustnost činí 1580 z 1783, to je 88,61 %.

Z dat je patrné, že již při mírně zvýšené intenzitě dopravy bylo dosaženo maximální průjezdnosti z východu pro toto řešení.

Tabulka 6: Výsledky druhého návrhu řešení s běžným provozem

	Západ	Jih	Východ (3)	Sever
Vlevo	17	134	113	48
Rovně	119(2)	83	179(2)	96(1)
Vpravo	215(1)	56	103	18
Celkem	351(3)	273	395(5)	162(1)

Tabulka 7: Výsledky druhého návrhu řešení s intenzivním provozem

	Západ		Jih		Východ		Sever	
	1,2	1,5	1,2(1)	1,5	1,2	1,5(2)	1,2	1,5
Vlevo	25	24	167	181	139(1)	173(1)	59	95(1)
Rovně	162	197	98(1)	140	202(1)	275(2)	117(1)	126(1)
Vpravo	236	297(3)	61(2)	89	130	145	26	23
Celkem	423	518(3)	326(3)	410	471(2)	593(3)	202(1)	244(2)

Tento návrh dokázal čas celého cyklu zkrátit na 48 sekund. Díky tomu řidiči čekali krátce a v pruzích se tvořily jen velmi malé fronty. Propustnost při nejnižším provozu je 1181 z 1190 a tedy 99,24 %. Při koeficientu provozu 1,2 je pak odbaveno 1422 z 1427, to je 99,65 %.

Při hustém provozu se netvořily příliš dlouhé fronty a počty čekajících nepřesáhly 20. Důvodem tohoto počtu je dávání předností řidičů, kteří jedou z východu vpravo, řidičům, kteří jedou ze západu rovně. Nakonec byla většina vozidel odbavena. Propustnost je 1765 z 1773, v procentech potom 99,54 %.

V čase simulace 528 sekund řešení č. 3 při provozu s multiplikátorem 1,2 byly naměřeny tyto hodnoty propustností v Petriho sítích: východ 96,03 %, západ 96,43 %, jih 98,84 %, sever 98,07 % a ve vizualizačním programu: východ 95,96 %, západ 95,44 %, jih 98,88 %, sever 98,21 %. Lze vidět, že obě simulace jsou téměř totožné. Malé rozdíly jsou dány stochastickým generováním vozidel.

Tabulka 8: Výsledky třetího návrhu řešení s běžným provozem

	Západ	Jih	Východ (6)	Sever (1)
Vlevo	19	126(3)	115	65
Rovně	142	86	172(2)	86(3)
Vpravo	190(1)	59(1)	104	14
Celkem	351(1)	271(4)	391(8)	165(1)

Tabulka 9: Výsledky třetího návrhu řešení s intenzivním provozem

	Západ		Jih		Východ		Sever	
	1,2	1,5(12)	1,2(4)	1,5(25)	1,2(8)	1,5(52)	1,2	1,5(11)
Vlevo	19	23(3)	140(9)	177(8)	147(4)	165(2)	84(2)	90
Rovně	166	191(8)	99	126(2)	196(1)	224(3)	93(2)	122(4)
Vpravo	231	280(10)	75	68(1)	124	150	18	23
Celkem	416	494(33)	314(13)	371(36)	467(13)	539(57)	195(4)	235(15)

Tento návrh dokázal oproti původnímu řešení zmenšit fronty z jihu i východu. Naopak více čekajících se objevovalo ze západu a severu. Odbaveno bylo 1178 z 1192 automobilů, v procentech vyjádřeno je to 98,83 %.

Při zvýšené intenzitě 120 % v jeden okamžik ze severu čekalo až 26 vozidel. Důvodem je prodloužení celého cyklu a zároveň pro ně svítila zelená jen 15 sekund. Nakonec však byla většina odbavena. Propustnost činí 1392 z 1422, to je 97,89 %.

Celková propustnost s multiplikátorem provozu 1,5 je 1639 z 1780, vyjádřeno procenty 92,08 %.

## 6.2 Zhodnocení výsledků

Nejlepších výsledků dosáhl návrh č. 2, který byl schopen se všemi intenzitami provozů mít propustnost vyšší než 99 %. Největším problémem tohoto řešení je jeho bezpečnost. V jednu chvíli vjíždí do křižovatky velké množství automobilů a po řidičích je tak vyžadována extrémní opatrnost a pozornost.

Současná konfigurace dosáhla také dobrých výsledků. S běžným provozem byla propustnost téměř 99 % a i s vyšší intenzitou dopravy byla tato sekvence schopná odbavit přes 98 % vozidel. S koeficientem provozu 1,5 již nastaly problémy a dva směry se staly pomalu průjezdnými s celkovou propustností 88,82 %.

Druhá navržená sekvence dosáhla velmi podobných výsledků jako původní nastavení. Pouze při velmi intenzivním provozu dosáhlo toto řešení vyšší propustnosti. Rozdíl byl také v tom, že tento návrh byl schopen rozložit počty čekajících více rovnoměrně do všech směrů.

První návrh v porovnání s ostatními dopadl nejhůře. Při běžném provozu dosahoval jen minimálně horších výsledků. Problém nastal při zhuštění dopravy. Již při hustotě provozu s multiplikátorem 1,2 se utvořila fronta a bylo dosaženo maximální propustnosti ze směru východ. Při hustém provozu se fronty tvořily již od počátku a na konci dosáhla čekající řada z východu počtu 164. V této situaci byla propustnost nejnižší ze všech měření, konkrétně dosáhla jen 88,61 %.



## 7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem modelu řízení a simulací světelné křižovatky ve Vsetíně. V úvodu byly představeny Petriho sítě, jejich základní komponenty a principy. Důležitou součástí navrhování v této práci byly časované Petriho sítě. Další kapitola se zabývala dopravní telematikou, která je dnes často využívaným pojmem v řízení dopravních situací. Dále byl vysvětlen pojem dopravní architektura města a jeho jednotlivé vrstvy. Byly nastíněny koncepty TASS a MOTION. Druhý jmenovaný byl implementován i na pražském Smíchově. Část práce se také zmínila o návrzích Petriho sítí pro několik dopravních problémů.

Čtvrtá kapitola byla zaměřena na křižovatku a následné měření provozu na ní. Měření probíhalo pomocí webkamery a vlastního softwaru. Poté i přímo na místě z důvodu ověření některých informací. Všechna data byla dále využívána v práci.

Pro tvorbu sítí byl použit editor knihovny *PetNetSim*. Dále přišlo na řadu představení návrhu semaforu. Následovala tvorba předávacího mechanismu tokenů mezi těmito semaforu, až nakonec došlo k vytvoření sítě pro řízení celé křižovatky. Další kroky vedly k tvorbě sítě pro příjezd a odbavení vozidel, která byla důležitá při vyhodnocování efektivity celého návrhu řízení. Síť semaforů a vozidel byly spojeny a vznikl komplexní model celého systému.

Pro lepší představivost byl využit program *PTV Vissim* a v něm vytvořená grafická simulace korespondující s modelem Petriho sítě.

Poslední část práce se zabývala hledáním lepších řešení pro řízení zkoumané křižovatky. Byly vytvořeny tři návrhy, které pracovaly s dostupnými světelnými zařízeními, tak aby nebylo nutných fyzických úprav přímo na místě. Návrhy byly podrobeny simulacím s naměřenými hodnotami provozu, s intenzitou 120 % a poté 150 %. Následně byly výsledky simulací vyhodnoceny. Současná konfigurace dosáhla velmi dobrých výsledků. Z nově vytvořených scénářů dosahoval výrazně lepších hodnot pouze jeden, konkrétně druhý návrh řešení. Avšak s přihlédnutím k bezpečnosti, nebyl nejlepší volbou pro řízení.





## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCHANÍČKOVÁ M. *Petriho síť*, Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra informatiky, Olomouc 2008, 69s
- [2] JENSEN, K. *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use*, Berlin: Springer, 1992, 234 s. ISBN 3-540-55597-8.
- [3] ŠTASTNÝ, Jiří, JEŽEK, Michal, STANĚK Kamil: *Simulace dynamických systémů*. Elektronická studijní opora. VUT Brno, 2020.
- [4] BAUSE, Falko a Pieter S, KRITZINGER: *Stochastic Petri Nets - An Introduction to the Theory*. Vieweg, 2002, ISBN 3-528-15535-3.
- [5] ĎURIŠ, Anton. *Simulace distribuovaných systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 79 s.
- [6] Šárka Voráčová; Pěnička, M.; Veselý, J.: *Úvod do modelování procesů Petriho sítěmi*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, vyd. 1 vydání, 2008, ISBN 9788001039793.
- [7] TICHÝ, Tomáš: *Řídicí systémy dopravy – dopravní telematika*. Učební text. ČVUT Praha, 2004, dostupné z [http://www.lss.fd.cvut.cz/Members/tichy/dokumenty-k-vyuze/ITS/at\\_download/file](http://www.lss.fd.cvut.cz/Members/tichy/dokumenty-k-vyuze/ITS/at_download/file).
- [8] PŘIBYL, Pavel a Miroslav SVÍTEK. *Inteligentní dopravní systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2001, 543 s. : il., tab., grafy. ISBN 80-7300-029-6.
- [9] Inteligentní systém řízení dopravy v městské oblasti, dostupné z <https://www.eltodo.cz/wp-content/themes/twentytwelve/produktove-listy/doprava-is-rizenidopravy.pdf>.
- [10] *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích*, schváleno Ministerstvem dopravy č. j. 122/2015-120-TN/2 ze dne 21. října 2015 s účinností od 15. prosince 2015, dostupné z [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_81.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_81.pdf).
- [11] NĚMEC, Martin. *Optimalizace a řízení osobní automobilové dopravy ve městě*. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009, 84s, dostupné z <https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/33868/N%C4%9Bmec%20Martin%20-Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] TUREK, Richard, *Koordinace linek mhd s využitím Petriho sítí*, OSSConf2010, 2010, dostupné z <https://www.sospreskoly.org/files/OSSConf2010/ossconf2010-RTurek.pdf>
- [13] BANIK, Mandira a Sudeep GHOSH. *Railway Network Modelling Using Petri Nets*. *International Journal of Science, Engineering and Computer Technology* [online]. 2013, 3(7), 249-249 [cit. 2022-05-13]. ISSN 2231-508X.
- [14] *The Railway Technical Website* [Online], 2019, dostupné z <http://www.railway-technical.com/signalling/>
- [15] MALAVASI, G a S RICCI. *Railway Traffic Simulation By Means Of A Petri Net Model*. *WIT Transactions on the Built Environment* [online]. Southampton: W I T Press, 2002, 61 [cit. 2022-05-10]. ISSN 1746-4498. Dostupné z [https://www.researchgate.net/publication/352368199\\_Railway\\_traffic\\_simulation\\_by\\_means\\_of\\_a\\_Petri\\_Net\\_model](https://www.researchgate.net/publication/352368199_Railway_traffic_simulation_by_means_of_a_Petri_Net_model)
- [16] RICCI, Stefano. *The use of Petri Nets models in railway traffic applications*. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2009, 42(5), 151-156 [cit. 2022-05-03]. ISSN 1474-6670. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015356123>
- [17] AN, Yisheng, Naiqi WU, Xiangmo ZHAO, Xuan LI a Pei CHEN. *Hierarchical Colored Petri nets for modeling and analysis of transit signal priority control systems*. *Applied*

- sciences [online]. BASEL: MDPI, 2018, 8(1), 141 [cit. 2022-05-10]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8010141
- [18] TRISTONO, Tomi, Setiyo Daru CAHYONO, Sutomo SUTOMO a Pradityo UTOMO. *Model petri net of adaptive traffic lights and its collaboration with a special event*. MATEC Web of Conferences [online]. Les Ulis: EDP Sciences, 2018, 147, 2005 [cit. 2022-05-10]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201814702005
- [19] ZÍTEK, Pavel.: *Simulace dynamických systémů*. Praha: SNTL, první vydání, 1990, ISBN 80-03-00330-x.
- [20] DOBROVSKÝ, Ladislav: Simulační nástroj PetNetSim, dostupné z <https://github.com/karna48/petnetsim>.
- [21] Simulační nástroj PTV Vissim, dostupné z <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Přiložený zip soubor obsahuje všechny použité modely Petriho sítí a modely grafických simulací.

2022\_BP\_Zbranek\_Matyas\_217841\_prilohy.zip