

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí barevných Petriho sítí**

**Theoretical Runway Capacity Estimation Based on Coloured Petri Nets**

Student:

David Rozhon

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.

# Zadání bakalářské práce

Student: **David Rozhon**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R036 Technologie letecké dopravy

Téma: Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí barevných Petriho sítí  
Theoretical Runway Capacity Estimation Based on Coloured Petri Nets

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

## Cíl práce:

Cílem závěrečné práce je na bázi barevných Petriho sítí vytvořit simulační model vzletové a přistávací dráhy a pomocí experimentů s tímto modelem stanovit kapacitu vzletové a přistávací dráhy.

## Předpokládaná osnova práce:

1. Úvod.
2. Charakteristika modelovaného procesu – nastavení výchozích podmínek.
3. Barevné Petriho sítě a nástroj CPN Tools.
4. Simulační model vzletové a přistávací dráhy.
5. Vyhodnocení simulačních experimentů.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAVEL K., KULČÁK L.: *Řízení letové provozu*. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00401-X.  
*Letecké předpisy L.*

ČEŠKA M., MAREK V., NOVOSAD P., VOJNAR T.: *Petriho sítě – studijní opora*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 18.5.2019 .....

  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložena vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2019



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

David Rozhon

Adresa trvalého pobytu autora práce:

K Lesu 591, Markvartovice

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

ROZHON, D. *Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí barevných Petriho sítí: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Technologie letecké dopravy, 2019, 50 s. Vedoucí práce: Dorda M.

Bakalářská práce se zabývá odhadem teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Jako metoda řešení této problematiky jsou zvoleny barevné Petriho sítě. První část se věnuje charakteristikou procesu vzletu a přistání, včetně jednotlivých faktorů, které tyto procesy ovlivňují. Další část práce je zaměřena na teorii Petriho sítí a programu CPN Tools, ve kterém je vytvořen simulační model. Tento model je dále popsán a jsou vysvětleny jednotlivé části tohoto modelu. Po skončení simulačních experimentů jsou výsledky zpracovány do tabulek a porovnány s výsledky obsaženými v bakalářské práci obhájované v akademickém roce 2016/2017.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

ROZHON, D. *Theoretical runway capacity estimation based on coloured Petri nets.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering. Air transport Technology. 2019. 50 p. Thesis head: Dorda, M.

The bachelor thesis deals with the estimation of the theoretical capacity of the runway. Color Petri nets are chosen as a method of solving this issue. The first part deals with the characteristics of the take-off and landing process, including the factors that influence these processes. The next part of the thesis is focused on the theory of Petri nets and CPN Tools, in which the simulation model is created. This model is described below and the parts of this model are explained. After the simulation experiments, the results are processed into tables and compared with the results contained in the bachelor thesis defended in the academic year 2016/2017.

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
1.1. CÍL PRÁCE .....	10
1.2. STRUKTURA PRÁCE.....	10
<b>2. CHARAKTERISTIKA PROCESU VZLETU A PŘISTÁNÍ.....</b>	<b>11</b>
2.1. VZLET .....	11
2.2. PŘISTÁNÍ.....	12
2.3. VYHLÁŠENÉ DÉLKY DRAH .....	13
2.4. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZLET A PŘISTÁNÍ.....	14
2.4.2. Teplota .....	14
2.4.3. Vítr.....	14
2.4.4. Hmotnost letounu .....	15
2.4.5. Vztlakové klapky.....	15
2.4.6. Únosnost RWY.....	16
2.4.7. Kontaminace RWY.....	16
2.4.8. Lidský činitel .....	17
2.4.9. Rozestupy mezi letouny .....	17
2.4.10. Rozestupy vyčkávajících letadel .....	17
2.4.11. Minimální rozestupy mezi odlétávajícími letouny .....	18
2.4.12. Rozestupy mezi odlétávajícími a přilétávajícími letouny .....	18
2.4.13. Turbulence v úplavu.....	19
2.4.14. Rozdělení letadel podle turbulence v úplavu.....	19
2.4.15. Volba používané dráhy.....	20
<b>3. PETRIHO SÍTĚ A NÁSTROJ CPN TOOLS .....</b>	<b>22</b>
3.1. P/T PETRIHO SÍTĚ .....	23
3.2. DYNAMIKA.....	24
3.2.1. Pravidlo proveditelnosti .....	24
3.2.2. Pravidlo provedení .....	25
3.3. ROZŠÍŘENÍ O ČAS.....	26
3.4. BAREVNÉ PETRIHO SÍTĚ .....	26
3.4.1. Dodatečné části.....	27
3.5. ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI .....	29
3.5.1. Exponenciální rozdělení .....	29
3.5.2. Erlangovo rozdělení.....	30

3.5.3. Normální rozdělení.....	31
<b>4. SIMULAČNÍ MODEL VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY .....</b>	<b>32</b>
4.1. VYTVOŘENÁ PETRIHO SÍŤ.....	32
4.2. DEKLARAČNÍ ČÁST.....	35
<b>5. VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>39</b>
5.1. EXPONENCIÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI.....	39
5.2. ERLANGOVO ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI.....	40
5.3. NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI .....	41
5.4. GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK .....	42
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>48</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>49</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ASDA	použitelná délka přerušného vzletu	
EK	střední počet zákazníků v systému	[-]
EL	střední počet zákazníků ve frontě	[-]
ES	střední počet zákazníků v obsluze	[-]
ET	střední doba pobytu v systému	[s]
EW	střední doba zdržení (čekání ve frontě)	[s]
H	těžký (heavy)	
IAS	indikovaná vzdušná rychlost	
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	
J	jumbo, super	
L	lehký (light)	
LDA	použitelná délka pro přistání	
M	střední (medium)	
MTOW	maximální vzletová hmotnost	
NM	námořní míle	
RWY	vzletová a přistávací dráha (runway)	
ŘLP	Řízení letového provozu	
SWY	dojezdová dráha (stopway)	
TAS	pravá vzdušná rychlost	
TODA	použitelná délka pro vzlet	
TORA	použitelná délka pro rozjezd	
ÚCL	Úřad pro civilní letectví	
$k$	počet událostí, k nimž má dojít	
$\lambda$	intenzita vstupního toku	[let/h]
$\mu$	střední hodnota	[s]



$\sigma^2$

rozptyl

[s<sup>2</sup>]

## **1. ÚVOD**

Letecká doprava patří mezi nejmladší dopravní obory. Od svého vzniku na počátku dvacátého století ušla velký kus cesty a neustále se vyvíjí. Žádné dopravní odvětví se v dnešní době nemůže chlubit tak rapidním růstem a neustálým přísunem nových technologií. Letecká doprava si díky svým možnostem vybudovala dominantní postavení v přepravě na střední a dlouhé vzdálenosti.

Prudkým rozvojem se samozřejmě neustále zvětšuje množství letadel a jednotlivých letů, čímž se přetěžují letiště. Optimalizací vzletů, přistání a pobytu letadel v prostoru letiště by měla být vzletová a přistávací dráha co nejefektivněji využita. Letecká doprava se také vyznačuje svou bezpečností, která by neměla být za žádných podmínek ohrožena a optimalizace by ji teda neměla narušit.

### **1.1. CÍL PRÁCE**

Cílem závěrečné práce je na bázi barevných Petriho sítí vytvořit simulační model vzletové a přistávací dráhy a pomocí experimentů s tímto modelem stanovit kapacitu vzletové a přistávací dráhy. Výsledky dosažené simulačními experimenty budou srovnány s výsledky analytickými obsaženými v bakalářské práci obhajované v roce 2016/17.

### **1.2. STRUKTURA PRÁCE**

Tato bakalářská práce obsahuje teoretickou a praktickou část. Ve druhé kapitole jsou popsány základní úkony jako vzlet a přistání a také faktory, které tyto činnosti ovlivňují. Mezi tyto faktory patří hlavně parametry letounu a letiště, meteorologické podmínky či lidský činitel, který je mnohdy velmi podceňován. V této části jsou také rozebírány rozestupy mezi letouny nebo turbulence v úplavu.

Ve třetí kapitole je popsána teorie používaných nástrojů. Popsány jsou barevné Petriho sítě a jejich využití společně s nástrojem CPN Tools

Čtvrtá část se věnuje simulačnímu modelu vzletové a přistávací dráhy, jeho popisem a vysvětlením jednotlivých částí.

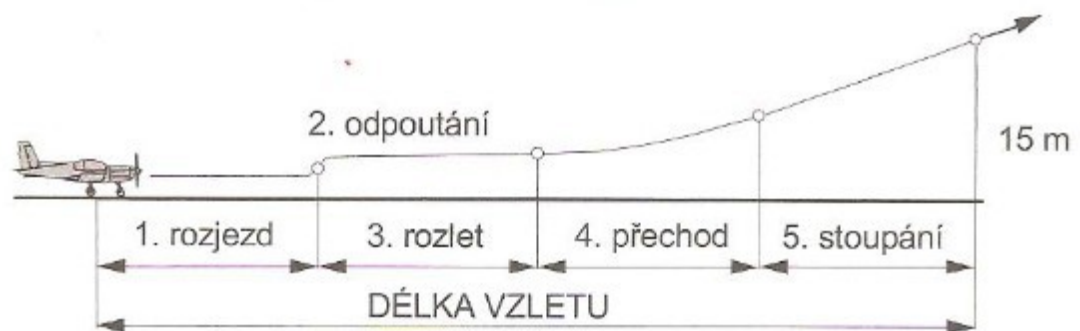
V páté kapitole bude celý simulační experiment vyhodnocen a jeho výsledky budou zpracovány.

## 2. CHARAKTERISTIKA PROCESU VZLETU A PŘISTÁNÍ

Vzletová a přistávací dráha též zvaná jako ‚runway‘ je jedno z nejdůležitějších míst pro celý proces letecké dopravy a je taktéž nedílnou součástí všech letišť. Let na ní, jak začíná, tak i končí. Jsou na ní vykonávány dva z nejtěžších manévřů z hlediska provedení celého letového procesu.

### 2.1. VZLET

Vzlet je počáteční fáze každého letu. Nazýváme tak manévr od začátku pohybu letounu na vzletové dráze, přes rozjezd, nadzdvihnutí a další fáze až po dosažení smluvené výšky. Při rozjezdu působí na letoun tah motorů, odpor, vzlak a tření pneumatik o povrch dráhy. Tah od motorů převyšuje součet sil odporu a tření, čímž dochází ke zrychlování letounu. Se zvětšující se rychlostí vzlak a odpor roste, a naopak tření se snižuje až po jeho úplné vymizení po odpoutání. Celý proces vzletu je popsán v pěti fázích na následujícím obrázku č. 1.



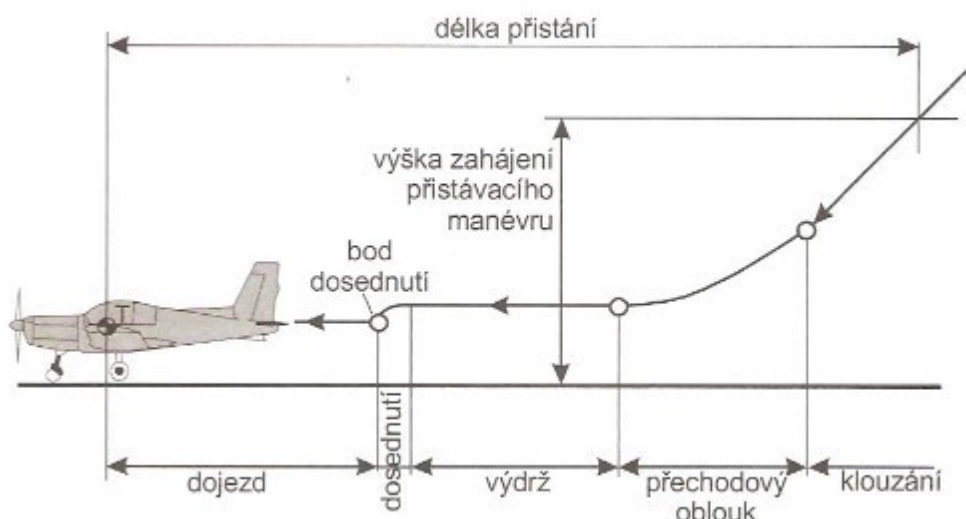
Obrázek 1: Fáze vzletu [1]

1. **Rozjezd** představuje počáteční fázi celého vzletu, která se odehrává na zemi a dochází v ní k postupnému zrychlování letounu až po dosažení rychlosti odpoutání.
2. **Odpoutání** je jeden určitý bod, ve kterém dojde k odpoutání letounu od země.
3. **Rozlet** je fáze vzletu, sloužící ke zvyšování rychlosti potřebné k dalšímu stoupání, ve které letoun letí nízko nad zemí.
4. **Přechodový oblouk** je fáze přechodu letounu do ustáleného stoupání, při kterém už zpravidla nedochází ke zvyšování rychlosti.
5. **Stoupání** představuje fázi, při které letoun stoupá konstantní rychlostí a zasouvá podvozek. Tato fáze končí ve smluvené výšce nad letišťem nebo vodní hladinou. [1]

U některých typů letadel některé fáze vzletu chybí jako například u těch s velkými přebytky výkonu, kdy letoun pod odpoutání přechází přímo do fáze stoupání a rozlet, přechodový oblouk a stoupání splývají do jednoho úkonu.

## 2.2. PŘISTÁNÍ

Každý úspěšný let je ukončen přistáním na dráze. Jedná se o manévr, který je náročnější na techniku pilotáže nežli vzlet. Přistání je charakterizováno jako manévr počínající klouzáním, ve kterém letoun klesá s vysunutými vztlakovými klapkami a podvozkem konstantní rychlostí a úhlem klesání, a končící úplným zastavením letounu na stojánci. Přistání je manévr, který se sestává ze vzdušné a pozemní fáze. Vzdušná část začíná průletem smluvenou výškou při referenční rychlosti, která bývá rovna 1,3násobku pádové rychlosti v přistávací konfiguraci. Pozemní fáze je ukončena úplným zastavením. Na následujícím obrázku č. 2 je přistání rozděleno do 5 částí.



Obrázek 2: Fáze přistání [1]

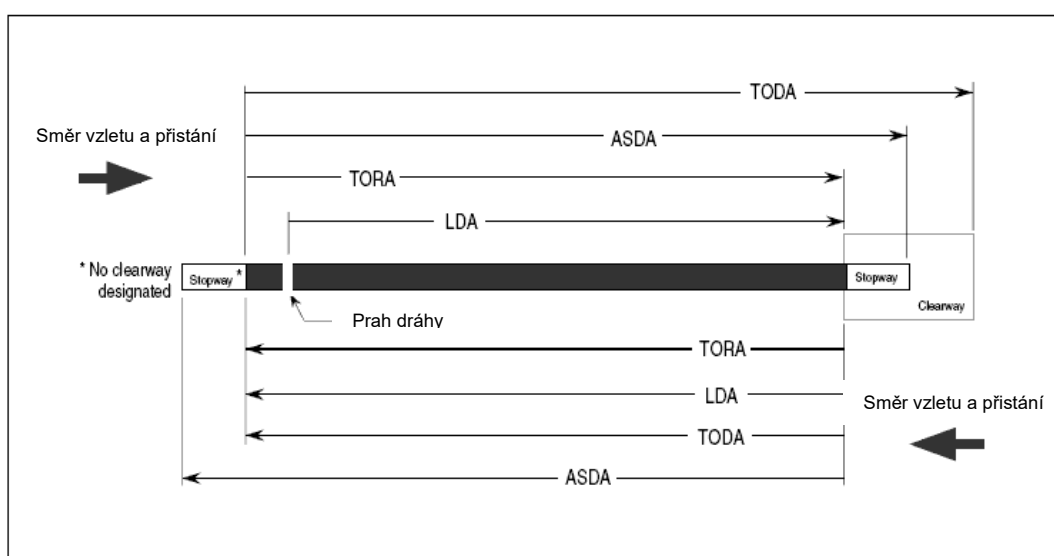
1. **Klouzání** je ustálený klesavý let konstantní rychlostí s vysunutým podvozkem a vztlakovými klapkami v přistávací konfiguraci. Výkon motorů nastavuje pilot podle potřeby, aby byl letoun schopen udržovat stálou rychlost a úhel sestupu.
2. **Přechodový oblouk** je úsek, při kterém letoun přechází z klouzání do vodorovného letu, kdy výkon motoru jede zpravidla na volnoběh.
3. **Výdrž** je fáze přistání, při kterém letoun letí přímočarým, zpomaleným pohybem těsně nad zemí, během kterého dochází ke snižování rychlosti z rychlosti klouzavého letu až po rychlost dosednutí. Součástí této fáze je také tzv. podrovnání, při kterém se postupně zvyšuje úhel náběhu ve výdrži vedoucí k poklesu rychlosti až na rychlost dosednutí.

4. **Dosednutím** se nazývá okamžik, při kterém letoun přejde z výdrže do dotyku se zemí. Tato fáze končí v bodě dosednutí, který je definován jako místo doteku letounu s přistávací plochou.
5. **Dojezd** je konečná fáze celého procesu přistání, definován jako zpomalený pohyb letounu od dosednutí až do jeho zastavení. [1]

## 2.3. VYHLÁŠENÉ DÉLKY DRAH

Jedním z limitujících faktorů je délka přistávací a vzletové dráhy. Ta je na každém letišti jiná a může se také měnit např. z důvodu posunutého prahu dráhy. Na dráze můžeme rozlišovat čtyři různé použitelné vzdálenosti, které jsou zobrazeny na obrázku č. 3. Patří mezi ně použitelná délka pro rozjezd (TORA – take-off run available), použitelná délka pro vzlet (TODA – take-off distance available), použitelná délka pro přerušovaný vzlet (ASDA – accelerate-stop distance available), použitelná délka pro přistání (LDA – landing distance available) a dojezdová dráha (SWY – stopway). [2]

- a) TORA – délka RWY, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro rozjezd letounu při vzletu
- b) TODA – použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku předpolí, pokud je zřízeno
- c) ASDA – použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku dojezdové dráhy, pokud je zřízena
- d) LDA – délka RWY, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro dosednutí a dojezd přistávajícího letounu
- e) SWY – vymezená pravoúhlá plocha na zemi navazující na konec použité délky rozjezdu upravená tak, aby na ni mohlo letoun zastavit při přerušovém vzletu



Obrázek 3: Vyhlášené délky drah [11]

## **2.4. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZLET A PŘISTÁNÍ**

Pro vypracování této podkapitoly by použit zdroj [1]

Jak vzlet, tak i přistání jsou velmi náročné úkony, které ovlivňuje množství faktorů. Některé z nich regulovat můžeme, jiné už však nikoliv.

### **2.4.1. Meteorologické podmínky**

Tyto podmínky jsou jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující vzlet a přistání, převážně tedy teplota a vítr. Velkým negativem je skutečnost, že počasí všeobecně nemáme možnost jakýmkoliv způsobem regulovat či ovlivňovat. Oproti dobám minulým už však máme tu výhodu, že dokážeme jeho chování aspoň částečně předvídat, připravit se na něj a reagovat. Atmosférické podmínky značně ovlivňují také výkony letadel při vzletu a přistání.

### **2.4.2. Teplota**

S rostoucí teplotou vzduchu klesá hodnota hustoty vzduchu. Tento pokles je doprovázen nárůstem TAS (pravá vzdušná rychlost), přičemž hodnota IAS (indikovaná vzdušná rychlost) zůstává stále stejná. Pokles hustoty vzduchu také zapříčiňuje snížení výkonu motoru. Toto snížení výkonu motoru a zvýšení TAS způsobuje prodloužení délky vzletu i přistání. Vedlejším účinkem je také snížení odporu vzduchu, což má také za následek nepatrné prodloužení délky přistání.

### **2.4.3. Vítr**

U větru se převážně posuzuje jeho směr a rychlost. Obecně platí, že protivítr nám délku rozjezdu a vzletu zkracuje a zvyšuje úhel stoupání letounu po vzletu. Při směru větru do „zad“ letounu je účinek diametrálně odlišný. Délka rozjezdu a vzletu se prodlužuje a zároveň se snižuje úhel stoupání po vzletu. Důležitou složkou, na kterou je třeba si dát pozor, je také boční vítr. Kromě vlivů na výkony také výrazně ovlivňuje říditelnost celého letounu. Z tohoto důvodu jsou výrobcem stanoveny limity pro rychlost větru, a to jak ve směru podélné osy letounu, tak pro boční složku.

Také u přistání hledíme hlavně na rychlost a směr větru. Protivítr nám opět potřebnou délku zkracuje, kdežto zadní ji prodlužuje. Boční složka větru přistání ovlivňuje minimálně, ovšem výrazně zasahuje do říditelnosti letounu. Z tohoto důvodu výrobce stanovuje limity rychlosti větru při přistání.

Mezi další projevy větru můžeme řadit například také stříhy větru či microbursty. Tyto jevy nám mohou snížit letovou výšku o několik stovek metrů během velmi krátké doby, což může být obzvláště nebezpečné při malých výškách.

#### **2.4.4. Hmotnost letounu**

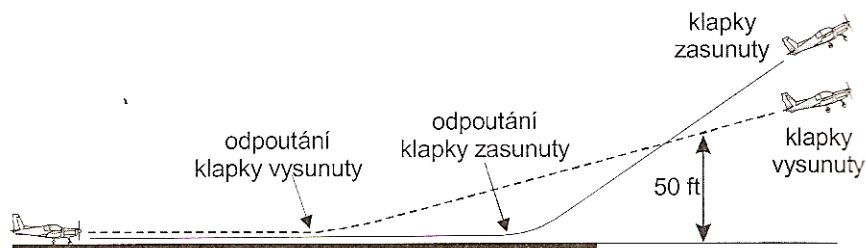
Obecně platí, že s narůstající hmotností letounu se prodlužuje potřebná délka pro vzlet. Pro každý typ letounu je tedy stanovena maximální vzletová hmotnost, která nesmí být za žádných podmínek překročena. Tuto hmotnost stanovuje s ohledem na konstrukční omezení letounu jeho výrobce. Před každým vzletem posádka stanovuje maximální přípustnou vzletovou hmotnost a vzletovou hmotnost. Jako definice vzletové hmotnosti se bere hmotnost letounu v okamžiku před uvolněním brzd na začátku rozjezdu. Maximální přípustná vzletová hmotnost je maximální vzletová hmotnost stanovená pro dané podmínky vzletu (teplota vzduchu, vítr, délka a sklon dráhy, apod.). Podmínkou pro úspěšný vzlet potom je to, že vzletová hmotnost musí být vždy stejná nebo menší než maximální vzletová hmotnost a maximální přípustná vzletová hmotnost. Limitujícím faktorem je vždy menší z těchto dvou hmotností.

Také při přistání platí, že čím je hmotnost přistávajícího letounu větší, tím se prodlužuje délka přistání. Maximální přistávací hmotnost pro každý typ se liší a nesmí být za žádných okolností překročena. Tato hmotnost je stanovena výrobcem s ohledem na konstrukční omezení letounu.

#### **2.4.5. Vztlakové klapky**

V dnešní době jsou skoro všechny letouny opatřena vztlakovými klapkami, které slouží ke zvětšení vztlaku. Některé mohou pouze zakřivovat profil křídla, nebo dokonce zvětšovat plochu křídla. Pokud u vzletu tyto klapky použijeme, dosáhneme tím zkrácení délky rozjezdu a snížení úhlu stoupání po vzletu. Při malém úhlu nastavení klapek získá letoun lepší stoupavost, ovšem rozjezd bude delší. Naopak při nastavení velkého úhlu bude rozjezd krátký, ovšem letoun bude mít po vzletu menší stoupavost. Toto nastavení volíme především s ohledem na umístění překážek za letištěm. Pokud si to můžeme dovolit a za letištěm není žádná vysoká překážka, kterou musíme přeletět, můžeme nastavit velký úhel klapek a stoupat tak pomaleji.

Při přistání dosáhneme vysunutím vztlakových klapek zkrácení délky přistání. Při přistání používáme vztlakové klapky v přistávacím režimu, který se obvykle pohybuje v rozmezí 80-100 % vytažení klapek. V závislosti na meteorologických podmínkách ovšem můžeme použít také jiné výchylky. Například při silném větru je doporučeno používat menší výchylky z důvodu lepší ovladatelnosti letounu. Vliv vztlakových klapek na délku vzletu je popsán na obrázku č.4.



Obrázek 4: Vliv vztlakových klapek na délku vzletu [1]

#### 2.4.6. Únosnost RWY

Únosnost všech ploch na letišti musí odpovídat předpokládanému zatížení, které na ně bude vyvíjeno při pohybu všech letounů po ploše. Její povrch by měl být bez jakýchkoliv nerovností, které by mohly mít negativní vliv na provedení vzletu a přistání.

Základní dělení je na zpevněné (asfalt, beton, atd...) a nezpevněné (travnaté, vodní plochy, ...). Povrch trati samozřejmě ovlivňuje typy letadel, které na nich mohou přistávat ať už jde o rozměry letounu nebo jejich hmotnost. Únosnost se týká zejména nezpevněných drah. Nejen že ovlivňuje délku rozjezdu a vzletu, ale je také limitujícím faktorem. Nízká únosnost zvyšuje délku rozjezdu, protože s klesající únosností roste valivý odpor kol. Pro každý typ letounu proto výrobce stanovuje minimální únosnost RWY.

Při přistání také platí, že čím menší únosnost, tím větší valivý odpor kol. U přistání nám to však až tak nevádí, protože to potřebnou délku pro přistání zkracuje.

#### 2.4.7. Kontaminace RWY

Jedná se o vliv znečištění dráhy např. sněhem, vodou, apod. Veškeré tyto faktory způsobují zvýšení valivého odporu kol a tím prodloužení délky rozjezdu a vzletu. Naopak při přistání tyto faktory způsobují snížení tření a tím prodloužení délky dojezdu a celého přistání. Pro každý typ letounu stanovuje výrobce limity, za kterých lze provést jak vzlet, tak přistání. Provozovatel letiště je povinen při jakékoliv kontaminaci měřit tzv. brzdící účinky pomocí speciálního zařízení, které může být buď samostatné, nebo může být součástí kontrolního vozidla. Například sníh může prodloužit brzdovou dráhu minimálně o 25 %. Velmi nebezpečný je také aquaplaning, který může nastat v případě velmi mokré až zaplavené dráhy. Dochází poté ke snížení ovladatelnosti až k úplné ztrátě řízení.



#### **2.4.8. Lidský činitel**

Tento faktor neovlivňuje pouze fázi vzletu a přistání, ale celý dopravní proces. Ze statistik vyplývá, že až 70 % leteckých nehod a incidentů je důsledkem lidského pochybení. Je tedy nutné tento faktor zohlednit také u fáze vzletu a přistání.

Chyba však nemusí být nutně na straně pilota. Řídicí letového provozu je pravidelně vystavován mnohem stresovějším situacím než pilot, a proto podstupují náročné psychické zkoušky. Jakákoliv nepozornost, unáhlené řešení či jen mírné nedorozumění totiž může vést ke kritické situaci a při nejhorším až k nehodě se ztrátou na životech.

Pokud to tedy situace umožňuje, řídicí nechávají mezi letouny větší časové i vzdálenostní rozestupy než stanovená minima. Vše za zvýšením bezpečnosti, která je v leteckém průmyslu na prioritním místě. Navýšením těchto minim můžeme předcházet vzniku stresových a rizikových situací jak pro piloty, tak pro řídicí letového provozu.

#### **2.4.9. Rozestupy mezi letouny**

Jedná se o soubor pravidel, kterými se musí řídit všichni účastníci letového provozu, aby se zabránilo střetům a haváriím mezi letouny. Tato pravidla určují přesné časové rozestupy a minimální vzdálenosti mezi jednotlivými letouny. V případech, kdy je tato hodnota porušena, dostává pilot světelný signál do kokpitu, který je zpravidla doprovázen také akustickým signálem. Těmito pravidly se samozřejmě musí řídit také řídicí letového provozu a brát na ně ohled při udávání pokynů jednotlivým letounům.

#### **2.4.10. Rozestupy vyčkávajících letadel**

Je nutné, aby bylo zajištěno předepsané minimum vertikálního rozestupu mezi letouny vyčkávajícími v sousedních vyčkávacích obrazcích, pokud není zajištěn příčný rozestup.

S výjimkou, pokud je zajištěn příčný rozestup, je nutné, aby bylo mezi letouny vyčkávajícími za letu a ostatními letouny přilétávajícími, odlétávajícími nebo na trati zajištěn vertikální rozestup, kdykoliv jsou letouny, kterých se to týká, ve vzdálenosti 5 minut letu od vyčkávajícího prostoru nebo ve vzdálenosti určené úřadem ÚCL (Úřad pro civilní letectví).

#### **2.4.11. Minimální rozestupy mezi odlétávajícími letouny**

- Rozestup 1 minuty, mají-li letouny letět po tratích, které se rozbíhají o 45° hned po vzletu tak, aby byl zajištěn příčný rozestup. Toto se používá při vzletu z paralelních drah.
- Rozestup 2 minut mezi vzlety, pokud je první letoun aspoň o 74 km/h rychlejší než letoun vzlétající jako druhé, pokud obě letí po stejné trati.
- Rozestup 5 minut pod dobu, kdy není zajištěn vertikální rozestup, pokud odlétávající letoun prolétne hladinou prvního letounu a oba plánují let po stejné trati. Musí se zajistit, aby se tento rozestup po dobu letu bez zajištění vertikálního rozestupu dodržoval nebo ještě navyšoval.

#### **2.4.12. Rozestupy mezi odlétávajícími a přilétávajícími letouny**

V případě, že přistávající letoun provádí úplné přístrojové přiblížení, smí odlétávající letoun vzlétnout:

- V jakémkoliv směru, pokud přistávající letoun ne zahájilo předpisovou zatáčku nebo základní zatáčku, která by vedla na konečné přistání.
- Odchýleno nejméně 45° od obráceného směru přiblížení poté, co přistávající letoun zahájilo předpisovou nebo základní zatáčku vedoucí k přistání, za předpokladu, že vzlet bude proveden minimálně 3 minuty před vypočítaným příletem letounu nad začátek přístrojové dráhy.

V případě, že přistávající letoun provádí přímé přiblížení, může letoun vzlétnout:

- V jakémkoliv směru nejpozději 5 minut před vypočteným příletem letounu nad dráhu.
- Odchýleno nejméně 45° od obráceného směru přiblížení přistávajícího letounu, a to 3 minuty před vypočteným příletem letounu nad začátek dráhy nebo před přelétnutím fixu na trati přiblížení přilétávajícím letounem.

Kdykoliv je to nutné, musí stanoviště ŘLP s ohledem na ostatní letouny vydat upozornění o možnosti výskytu turbulence v úplavu. Velitel letounu, kterého se tato výstraha týká se musí přesvědčit, že rozestup mezi ním a letounem před ním je přijatelný a neohrozí tak svůj let.

#### **2.4.13. Turbulence v úplavu**

Vyrovňávání tlaku mezi horní a spodní stranou křídla způsobuje turbulenci v úplavu. Toto vyrovňávání má za důsledek rotující víry od konců křídel, které se pohybují směrem k sobě. Velikost těchto vírů roste s velikostí letounu. Turbulence v úplavu za velkým letounem tedy může způsobit letounu za ním velké problémy s říditelností. Proto je nutné dodržovat dostačující mezery mezi letouny, aby působení této turbulence na další letoun bylo minimální nebo žádné. Důsledky této turbulence mohou způsobit ztrátu výšky či vertikální rychlosti, vynucené klonění, přetížení konstrukce atd.

Asi největší nebezpečí hrozí v případě vynuceného klonění, které může způsobit převýšení schopností letounu vyrovnat náklon. Pokud letoun vletí do této turbulence ve fázi přistání, může vzhledem k omezené reakční době dojít až ke kontaktu se zemí.

Rozsah vírů za letounem odpovídá asi dvojnásobku rozpětí křídel letounu, co se týče šířky a jednonásobek co se týče hloubky křídel. Po průletu letounu víry zůstávají určitou dobu na místě a následovně jsou unášeny větrem. Jejich typický pohyb je směrem dolů rychlostí asi 400-500 ft/m. Tento pohyb postupně ustává a víry se zastaví asi 900-1000 ft pod dráhou letounu, který je vytvořil. Jejich intenzita se zmenšuje s časem a vzdáleností. Po přistání mohou tyto víry zůstat na dráze i déle než 5 minut.

#### **2.4.14. Rozdělení letadel podle turbulence v úplavu**

- L – light – kategorie nejlehčích letounů se vzletovou hmotností nižší než 7000 kg. Do této kategorie patří například Cessna 172, L-410, Learjet 35 a další...
- M – medium – do této „střední“ kategorie patří letouny s MTOW v rozmezí od 7000–136000 kg. Do této kategorie tedy můžeme zařadit velké množství dopravních letounů středního doletu včetně Boeingu 737, Airbusu A320 a další.
- H – heavy – tato takzvaná těžká kategorie pro letouny těžší než 136000 kg obsahuje pouze malé množství letounů jako Boeing 747 nebo Airbus A350.
- J – super – kategorie vytvořená speciálně pro jediný letoun, kterým je největší dopravní letoun na světě Airbus A380.

Stanoviště ŘLP musí vydat s ohledem na další lety upozornění o možnosti výskytu turbulence v úplavu na dráze přistávajícím letounům v případě, kdy před nimi přistával letoun kategorie heavy či super. Velitel přistávajícího letounu poté musí vyhodnotit, zdali je rozestup dostatečný a v případě potřeby informuje stanoviště ŘLP.

Následující tabulka č. 1 je interpretací doporučených rozestupů dle norem ICAO. Jedná se o rozestup při vzletu a přistání ze stejné vzletové a přistávací dráhy.

Tabulka 1: Tabulka minimálních rozestupů v NM [2]

Následující letoun	Předcházející letoun			
	<b>J</b>	<b>H</b>	<b>M</b>	<b>L</b>
<b>H</b> (MTOW) > 136 000 kg	6 NM	4 NM	3 NM	3 NM
<b>M</b> 136 000 kg < MTOW > 7000kg	7 NM	5 NM	3 NM	3 NM
<b>L</b> 7000 kg > MTOW	8 NM	6 NM	5 NM	3 NM

Tyto rozestupy jsou pouze doporučené normy ICAO a řídicí letového provozu je může dle svého uvážení prodloužit (např. při bezvětří).

Každý pilot musí počítat s účinky turbulence v úplavu a upravit trajektorii letu tak, aby se účinkům vyhnul. Pokud není možné zajistit dostatečné rozestupy, popřípadě letoun vletne do oblasti působení této turbulence, je třeba při přiblížení a přistání za letounem způsobujícím tuto turbulenci zvolit dotyk až za místem dotyku předchozího letounu. K tomuto je třeba mít dostatečně dlouhou vzletovou dráhu.

#### 2.4.15. Volba používané dráhy

Za dráhu v používání se považuje ta dráha, na které jsou v danou dobu prováděny vzlety a přistání. To, která dráha se bude právě používat, záleží na různých faktorech.

Prvním z nich je křížení drah. V souvislosti s tím je samozřejmé, že nemohou být používány dvě křížící se dráhy současně. Podobná omezení se mohou vztahovat také na dráhy, které se nemusí nutně křížovat, ale mohou si například navzájem překážet letouny při vzletu či přistání.

Klíčovým faktorem pro výběr dráhy v používání je vítr. Nejvhodnější je provádět vzlety proti větru, z důvodu zkrácení vzdálenosti potřebné jak pro vzlet, tak pro přistání. Pokud bychom naopak tyto úkony prováděli s větrem v zádech, potřebná dráha se prodlouží což je pro nás nežádoucí a zároveň nebezpečné. Vítr z boku může být pro vzlet a přistání taktéž nebezpečný z důvodu zhoršení říditelnosti letounu, protože síly působící z boku vyvádějí letoun z rovnováhy.

Další kritéria pro výběr používané dráhy může být omezení hluku nad obydlými oblastmi. Volí se tedy dráha, která vede mimo tyto oblasti. Toto kritérium je používáno především v noci, čemuž pomáhá také menší provoz na letišti.

Zároveň se musí brát zřetel na to, jaký letoun právě přistává, jelikož má každé jiné rozměry a jinou hmotnost. Musí se proto vybrat dráha, která svými rozměry (šířka a délka) a pevnostními omezeními vyhovuje typu přistávacího či vzletajícího letounu.

Tyto dvě důležité fáze letu může ovlivňovat množství faktorů jako například hmotnost letounu, či meteorologické podmínky na letišti a v jeho okolí. Větší hmotnost způsobuje prodloužení dráhy potřebné ke vzletu a přistání, ale například také rychlost stoupání. Délku vzletu a přistání nám ovlivňuje také vítr. Zadní vítr nám tyto dva úkony prodlužuje, kdežto čelní nám je zkracuje. Proto se vždy doporučuje startovat a přistávat proti větru, který taktéž zvětšuje úhel stoupání po vzletu.

Jak vzlet, tak i přistání samozřejmě ovlivňuje i celá řada dalších faktorů jako například teplota, nastavení vztlačových klapek, povrch a provozní omezení dráhy a další.

### 3. PETRIHO SÍŤ A NÁSTROJ CPN TOOLS

Pro vypracování této kapitoly byly použity zdroje [3], [4], [7] a [8].

Petriho síť jsou univerzální grafický a matematický nástroj pro návrh, modelování a formální analýzu dynamických systémů, jako například systémy hromadné obsluhy. Představují matematický nástroj pro simulaci a modelování diskretních distribuovaných systémů. Tyto síť jsou bipartitními orientovanými grafy, kde uzly reprezentují stavy a akce, pomocí kterých se mění stavy. Uzly jsou spojeny orientovanými hranami, které vyjadřují, jakým způsobem může systém přejít z jednoho stavu do druhého provedením určité akce.

Vytvářením těchto dynamických modelů zjednodušujeme reálné systémy, které mají tyto modely představovat. Petriho síť poskytují základ grafické notace a základní principy pro modelování souběžnosti, komunikace a synchronizace. Jazyk Standart ML, který používá nástroj CPN Tools, poskytuje principy pro definici datových typů, popisuje manipulaci s daty a vytváří kompaktní a parametrizované modely.

Prvním, kdo formálně definoval jazyk Petriho sítí, byl počátkem 60. let ve své disertační práci Carl Adam Petri. Petriho síť byly původně vyvinuty ve 60. a 70. letech a brzy byly považovány jako jeden z nevhodnějších jazyků pro popis a analýzu synchronizace, komunikace a sdílení zdrojů mezi souběžnými procesy. Pokusy o využití Petriho sítí v praxi však odhalily dva vážné nedostatky. Za prvé, neexistovaly žádné datové koncepty, a proto se modely často stávaly příliš velké, protože veškerá manipulace s daty musela být reprezentována přímo do struktury sítě (tj. prostřednictvím míst a přechodů). Za druhé, neexistovaly žádné koncepty hierarchie, a proto nebylo možné vytvořit velký model pomocí souboru samostatných submodelů s dobře definovanými rozhraními. Pozdější vývoj na konci 70. let a začátku 80. let tyto dva nedostatky odstranil.

Model CPN (Colored Petri Nets – Barevná Petriho síť) systému je spustitelný model představující stavy systému a události (přechody), které mohou způsobit změnu stavu systému. Jazyk CPN umožňuje uspořádání modelu jako sady modulů a obsahuje časovou koncepci, která představuje čas potřebný k provedení přechodu v modelovaném systému. Jejich simulací potom provádíme experimenty za účelem pochopení chování zkoumaného systému.

Jelikož barevné Petriho sítě vycházejí z konceptu P/T Petriho sítí, se kterým mají spoustu společných vlastností, budou nejdříve představeny ve stručnosti P/T Petriho sítě.

### 3.1. P/T PETRIHO SÍŤ

V P/T Petriho sítích se stavy modelovaného systému označují pomocí míst a změny stavu pomocí přechodů. Stavy systému jsou vyjádřeny tzv. značením sítě, které pro každé místo sítě odpovídá celému nezápornému číslu, které definuje počet tokenů nacházejících se v daném místě

Nejdříve budou vysvětleny základní prvky P/T Petriho sítí:

#### a) MÍSTA

- Places → P
- Pomocí míst zpravidla modelujeme stavy systému
- Graficky znázorňujeme kroužkem nebo elipsou
- Příklady – modelování fronty, obsluha, ...

#### b) PŘECHODY

- Transitions → T
- Pomocí přechodů modelujeme změny stavů systému
- Graficky znázorňujeme obdélníkem nebo čtvercem
- Příklady – příchod zákazníka, zahájení obsluhy, ...

#### c) ORIENTOVANÉ HRANY

- Vždy směřují od místa k přechodu nebo naopak
- Nelze spojit dvě místa nebo dva přechody

#### d) TOKENY

- Vyjádření stavu (značení) sítě, kdy pod pojmem značení rozumíme rozmístění tokenů v síti
- Počáteční značení sítě odpovídá výchozímu stavu systému
- Nacházejí se v místech
- Graficky označeny buď puntíky, popřípadě číslem při vyšším počtu
- Příklady – zákazníci, obslužné linky, ...

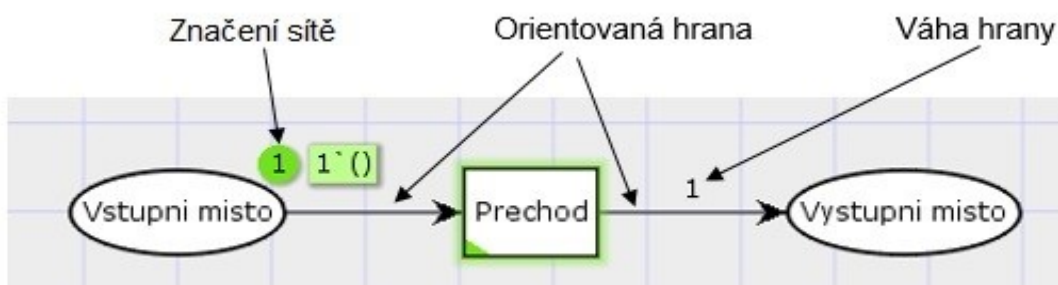
#### e) KAPACITA MÍST

- Definuje, kolik tokenů se v místě může najednou nacházet
- Pokud není uvedena, považujeme kapacitu místa za neomezenou

#### f) VÁHA HRANY

- Je přiřazena hraně a je rovna přirozenému číslu
- Definuje počet tokenů, které se po hraně přesouvají při provádění přechodu

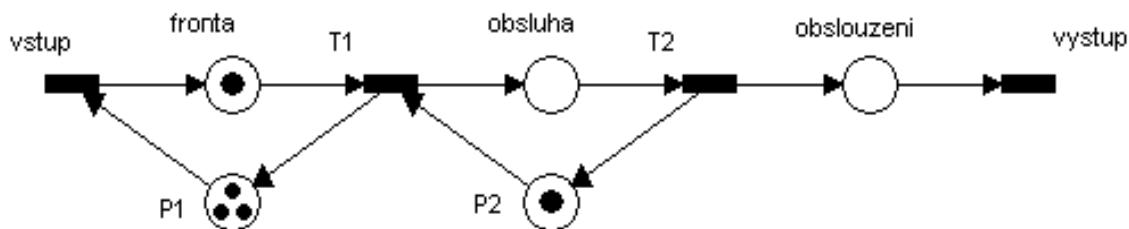
- Pokud není uvedena, považujeme váhu hrany rovnu 1  
Jednotlivé prvky P/T Petriho sítí, jsou graficky znázorněny na obrázku č. 5.



Obrázek 5: Základní prvky Petriho sítí

Pro grafickou reprezentaci Petriho sítí používáme orientovaný graf. Místa a přechody jsou uzly grafu.

Na následujícím obrázku č. 6 můžeme vidět příklad P/T Petriho sítě. Černé obdélníky představují přechody a kružnice zase místa. Tečky v jednotlivých místech uvádějí počet tokenů, které se v nich nacházejí, kdy jedna tečka odpovídá jednomu tokenu.



Obrázek 6: Příklad P/T Petriho sítě [3]

### 3.2. DYNAMIKA

Stav sítě je dán značením (počtem tokenů v jednotlivých místech). Změny stavu jsou způsobeny prováděním přechodů v modelu. V daném stavu sítě jsou proveditelné jen některé přechody. Dynamika těchto sítí je tedy popsána dvěma pravidly:

#### 3.2.1. Pravidlo proveditelnosti

Pravidlo, které nám určuje, za jakých podmínek může dojít k provedení přechodu (přesun tokenů mezi místy).



Každý přechod má definovaná vstupní a výstupní místa, která jsou určena orientovanými hranami. Místa, ze kterých vedou hrany do přechodu, se nazývají vstupními místy přechodu a naopak místa, do kterých vedou hrany z přechodu, se nazývají výstupní místa přechodu.

Pravidlo proveditelnosti může být definováno dvěma způsoby. První složitější odpovídá situaci, kdy je v síti omezena kapacita míst a druhé jednodušší, odpovídá situaci, kdy v síti není omezena kapacita míst.

Pravidlo proveditelnosti v případě neomezení kapacity míst můžeme definovat následujícím způsobem: „**Přechod je proveditelný, pokud v každém vstupním místě tohoto přechodu je alespoň tolik tokenů, kolik činí váha příslušné hrany**“ [7].

V případě, kdy máme kapacitu míst omezenou, tak se pravidlo proveditelnosti definuje následujícím způsobem „**Přechod je proveditelný, pokud v každém vstupním místě tohoto přechodu je alespoň tolik tokenů, kolik činí váha příslušné hrany a současně v každém výstupním místě přechodu platí, že počet tokenů nacházejících se v daném místě zvětšený o váhu hrany směřující z přechodu do místa nebude větší než kapacita daného výstupního místa.**“ [7]

### 3.2.2. Pravidlo provedení

Pravidlo provedení definuje, jakým způsobem se změní značení sítě po provedení proveditelného přechodu. Pravidlo je možno definovat následujícím způsobem: „**V každém vstupním místě proveditelného přechodu, odebereme tolik tokenů, kolik činí váha příslušné hrany, a v každém výstupním místě naopak přidáme tolik tokenů, kolik činí váha incidující hrany**“ [7]

V souvislosti s pravidlem provedení je vhodné zmínit, že neexistuje žádný zákon zachování počtu tokenů v síti tzn. počet tokenů, který odebereme ve vstupních místech, se nemusí rovnat počtu tokenů na výstupních místech.

Základní P/T Petriho sítě neumí modelovat časové trvání dějů, což je například v případě modelování systému hromadné obsluhy zásadní problém. Z tohoto důvodu je možno P/T Petriho sítě rozšířit o modelování časových dějů.

### 3.3. ROZŠÍŘENÍ O ČAS

Trvání dějů může být:

- 1) Deterministické – Časované Petriho sítě
- 2) Stochastické – Stochastické Petriho sítě
- 3) Kombinované – Zobecněné stochastické Petriho sítě

Zavedení času může být spojeno s:

- 1) Přechody (T-timed PN) – provedení přechodu bude trvat námi nastavenou dobu, po kterou token přetrvává v přechodu
- 2) Místa (P-timed PN) – před vstupem do přechodu token zůstává ve vstupním místě námi stanovenou dobu
- 3) Hranami (A-timed PN) – přesun tokenu z místa do přechodu nebo naopak po orientované hraně trvá námi nastavenou dobu
- 4) Tokeny (Token Timed PN) – přesun tokenů v systému probíhá okamžitě, ovšem tokeny jsou opatřeny *časovým razítkem*, které udává, kdy může být token opět použit. Tento koncept využívá program CPN Tools.

### 3.4. BAREVNÉ PETRIHO SÍTĚ

Barevné Petriho sítě jsou grafický jazyk pro konstrukci modelů souběžných systémů a analýzu jejich vlastností. Prováděním simulací modelu, můžeme vyšetřit různé scénáře a rozpoznat chování systému. Simulace jde provést po jednotlivých krocích, nebo automaticky. Pokud simulujeme systém po jednotlivých krocích, dává nám to možnost detailně vyšetřit jednotlivé scénáře a zkontrolovat, jestli model funguje tak jak by měl. Je tedy možné sledovat důsledky jednotlivých kroků v grafické podobě modelu. Automatická simulace nám provede předem určený počet kroků. Cílem je simulovat model, jak nejrychleji to jde a většinou se využívá pro testování a výkonnostní analýzu. Sítě obsahují časový koncept, který umožňuje zachytit čas potřebný k provádění činností v systému. Velmi často je úkolem rozpoznat a odstranit chyby systému.

Vychází z P/T Petriho sítí, ve kterých je možno pracovat s více ‚typy‘ tokenů, tyto tokeny se liší jejich ‚barvou‘ (tato barva může odpovídat textové či číselné hodnotě). Každému místu je přiřazena třída barev (typů), které se mohou v tomto místě nacházet. Podmínkou přechodu nebo také strážní podmínkou můžeme korigovat, které tokeny budou do míst vpuštěny a za jakých podmínek. Po vyhodnocení této podmínky dostáváme na výstupu booleovskou (pravdivostní) hodnotu. Počáteční značení sítě je

dáno značením všech míst sítě. To znamená, že ke každému místu je přiřazena konkrétní multimnožina tokenů z té třídy, která je místu přiřazena.

Základní části jako místa, přechody, orientované hrany a jiné jsou stejné jako u P/T Petriho sítí.

### 3.4.1. Dodatečné části

#### a) BARVY TOKENŮ

- K dispozici máme tokeny různých barev, kdy každá barva představuje určitý typ tokenů
- Příklad – tokeny barvy zákazník modelují zákazníky systému hromadné obsluhy a tokeny barvy linka modelují obslužné linky, ...

#### b) MNOŽINA BAREV

- Každému místu musíme přiřadit tzv. množinu barev tokenů
- Určujeme tak, které barvy tokenů jsou do míst vpuštěny

#### c) HRANOVÝ VÝRAZ

- Každé hraně musíme přiřadit tzv. hranový výraz utvořený z konstant a proměnných, který po vyhodnocení představuje multimnožinu tokenů z té třídy, která je přiřazena incidujícímu místu

Multimnožina je zobecněním množiny, respektive množina je speciálním druhem multimnožiny. V multimnožině je oproti množině povolen vícenásobný výskyt prvků. Tzn. multimnožina může obsahovat více stejných prvků. Tedy např. soubory prvků {1, 2, 3} a {1, 1, 2, 3} jsou dvě různé multimnožiny.

Barevné Petriho sítě v CPN Tools tvoří dvě části:

- 1) GRAFICKÁ ČÁST – graf Petriho sítě tvořený místy, přechody a hranami
- 2) TEXTOVÁ ČÁST – textovou část nazýváme inskripce a pro naše potřeby do ní zařazujeme:
  - a. Deklaraci množin (tříd) barev tokenů. CPN Tools umožňuje definovat dvě kategorie množin barev tokenů, časované a nečasované. Všechny tokeny časovaných množin barev tokenů jsou vybaveny časovým razítkem, které určuje, v jakém čase může být token nejdříve použit.
  - b. Deklaraci funkcí (např. pro generování hodnot z určitého rozdělení pravděpodobnosti)
  - c. Deklaraci monitorovacích funkcí pro odhad provozních charakteristik
  - d. Specifikaci množin barev tokenů přiřazeným místům
  - e. Hranové výrazy
  - f. Počáteční značení

Každému přechodu může být přiřazena tzv. strážní podmínka, která musí být splněna, aby bylo možno pokračovat dále. V práci strážní podmínky nebudou používány, a proto se jimi dále nebudu zabývat.

Program CPN Tools je nástroj sloužící k editaci, simulaci a analýze barevných Petriho sítí, vycházejících z konceptu popsaného v této kapitole, který byl vyvinut na Aarhusově univerzitě v Dánsku.

Nástroj CPN Tools se skládá ze dvou hlavních částí, grafického editoru a simulačního komponentu. Grafický editor je napsán v akademickém jazyce BETA a simulátor je napsán v jazyce Standart ML.

### 3.5. ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI

Ve svých experimentech se simulačním modelem využívám tří typů rozdělení pravděpodobnosti a to exponenciální, Erlangovo a normální (Gaussovo).

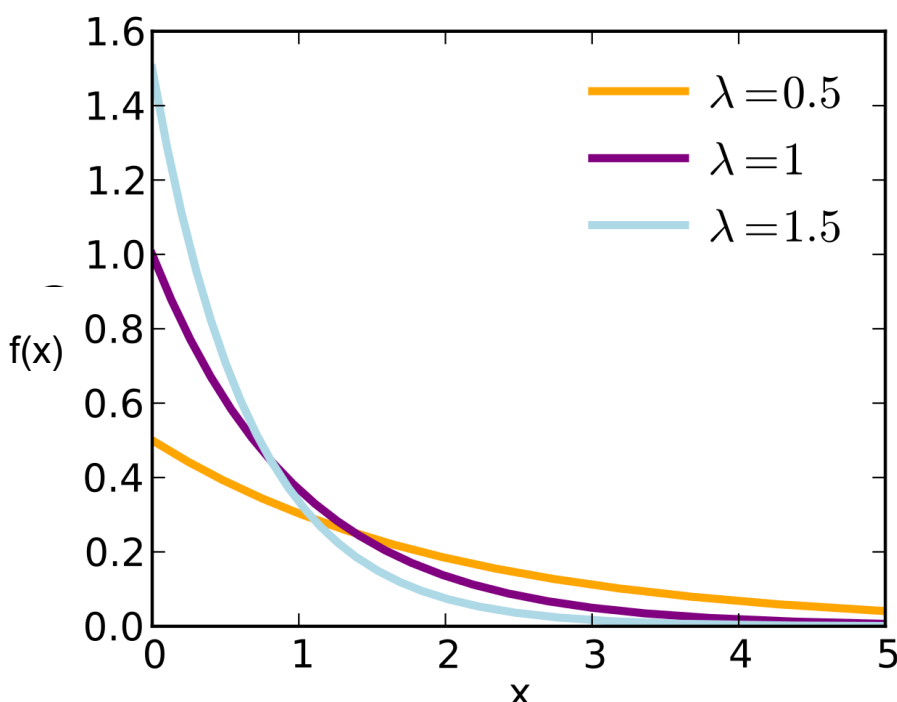
#### 3.5.1. Exponenciální rozdělení

Toto rozdělení je v teorii pravděpodobnosti a matematické statistice spojitě rozdělení pravděpodobnosti. Je vhodným modelem doby čekání do nastoupení náhodného (poissonovského) jevu, nebo délky intervalu mezi takovými dvěma jevy (např. doba čekání na obsluhu, vzdálenost mezi dvěma poškozenými místy na silnici, atd.).

Závisí na parametru  $\lambda > 0$ , což je převrácená hodnota střední hodnoty doby čekání do nastoupení sledovaného jevu. Graf hustoty pravděpodobnosti tohoto rozdělení je zobrazen na obrázku č.7.

<b>Hustota pravděpodobnosti:</b>	$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \lambda \cdot e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \end{cases}$
<b>Distribuční funkce:</b>	$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \end{cases}$

<b>Vlastnosti:</b>	$E(X) = \frac{1}{\lambda}$	...střední hodnota
	$D(X) = \frac{1}{\lambda^2}$	...rozptyl



Obrázek 7: Graf hustoty pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti [5]

### 3.5.2. Erlangovo rozdělení

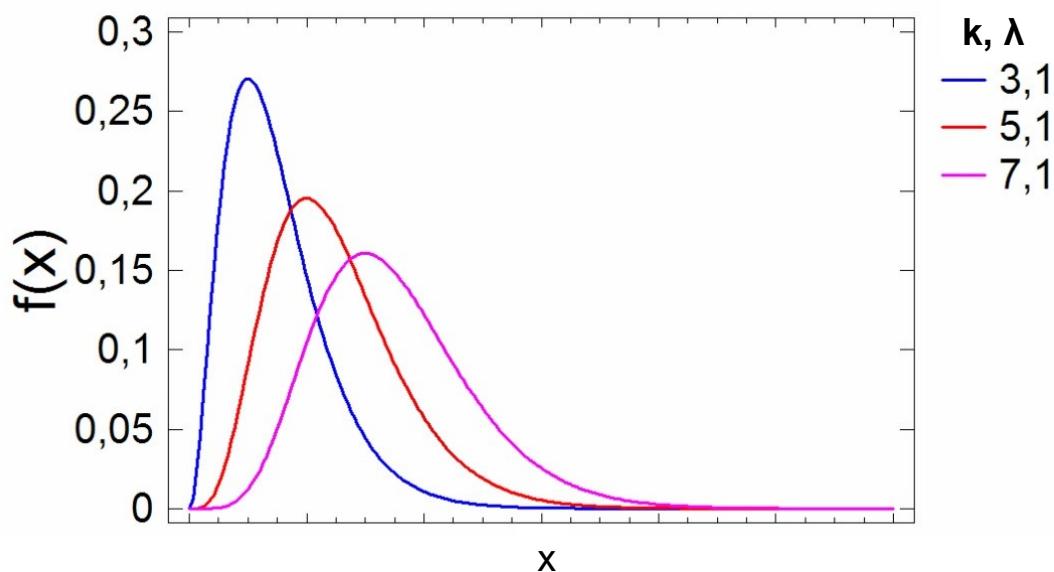
Toto rozdělení má na rozdíl od exponenciálního dva parametry, a to  $k$  – počet událostí, k nimž má dojít, a rychlost výskytu těchto událostí  $\lambda$ , kde  $\lambda > 0$  a  $k \in \mathbb{N}$ . Pokud se  $k=1$ , tak toto rozdělení přechází v exponenciální rozdělení pravděpodobnosti s parametrem  $\lambda$ . Erlangovo rozdělení se uplatňuje hlavně v teorii hromadné obsluhy a v podobných situacích jako exponenciální rozdělení. Díky dvěma parametrům je však „ohebnější“, tudíž v některých případech vhodnější pro aproximaci reálných situací. Graf hustoty pravděpodobnosti tohoto rozdělení je zobrazen na obrázku č.8.

**Hustota pravděpodobnosti:** 
$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \lambda \cdot e^{-\lambda x} \cdot \frac{(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!}, & x \geq 0 \end{cases}$$

**Distribuční funkce:** 
$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda x} \cdot \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda x)^j}{j!}, & x \geq 0 \end{cases}$$

**Vlastnosti:**  $E(X_k) = \frac{k}{\lambda}$  ...střední hodnota

$D(X_k) = \frac{k}{\lambda^2}$  ...rozptyl



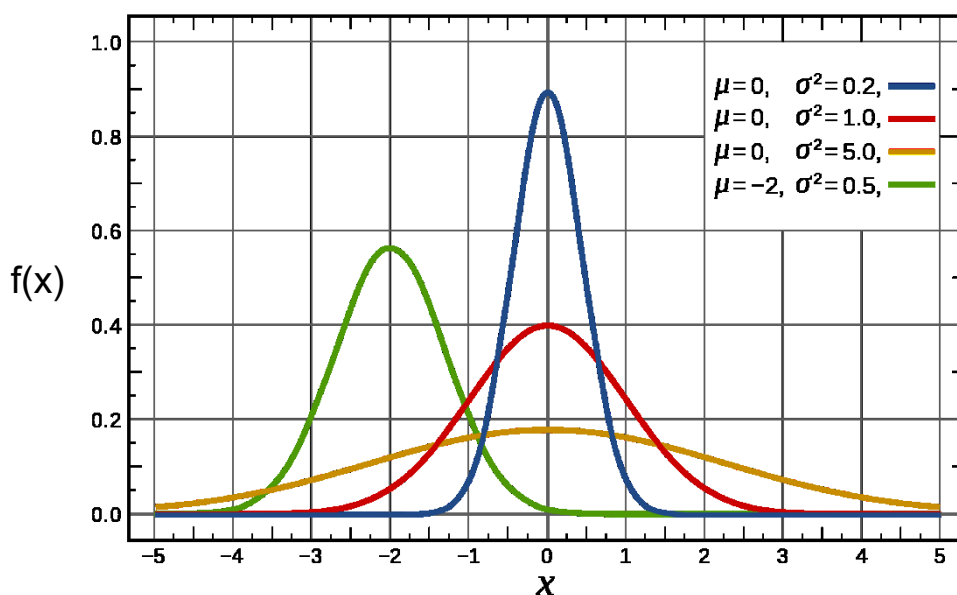
Obrázek 8: Graf hustoty pravděpodobnosti Erlangova rozdělení pravděpodobnosti [13]

### 3.5.3. Normální rozdělení

Toto rozdělení se také běžně označuje jako Gaussovo rozdělení nebo obecné normální rozdělení. Je velmi důležité, neboť se vyskytuje nejčastěji, mnoho jiných rozdělení se mu blíží a řada ostatních rozdělení se jím dá nahradit. Normální rozdělení je jednoznačně určeno svými dvěma parametry, a to střední hodnotou  $\mu$  a rozptylem  $\sigma^2$ . Náhodné děje vyskytující se v přírodě nebo společnosti lze dobře modelovat právě normálním rozdělením. Jako příklad můžeme určit například IQ populace, výška populace nebo vitální kapacita plic. Klasickým příkladem jsou potom chyby měření. Grafem popisující hustotu pravděpodobnosti tohoto rozdělení je tzv. Gaussova křivka. Možnou nevýhodou vztažmo k modelování doby obsluhy v systémech hromadné obsluhy je skutečnost, že normální rozdělení může nabývat i záporných hodnot, což samozřejmě u doby obsluhy není možné. Proto je vhodné otestovat, zda je použití tohoto rozdělení pro tyto případy vhodné. Graf hustoty pravděpodobnosti tohoto rozdělení je zobrazen na obrázku č.9.

**Hustota pravděpodobnosti:**  $f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$  pro  $x \in (-\infty, \infty)$

**Distribuční funkce:**  $F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$  pro  $x \in (-\infty, \infty)$

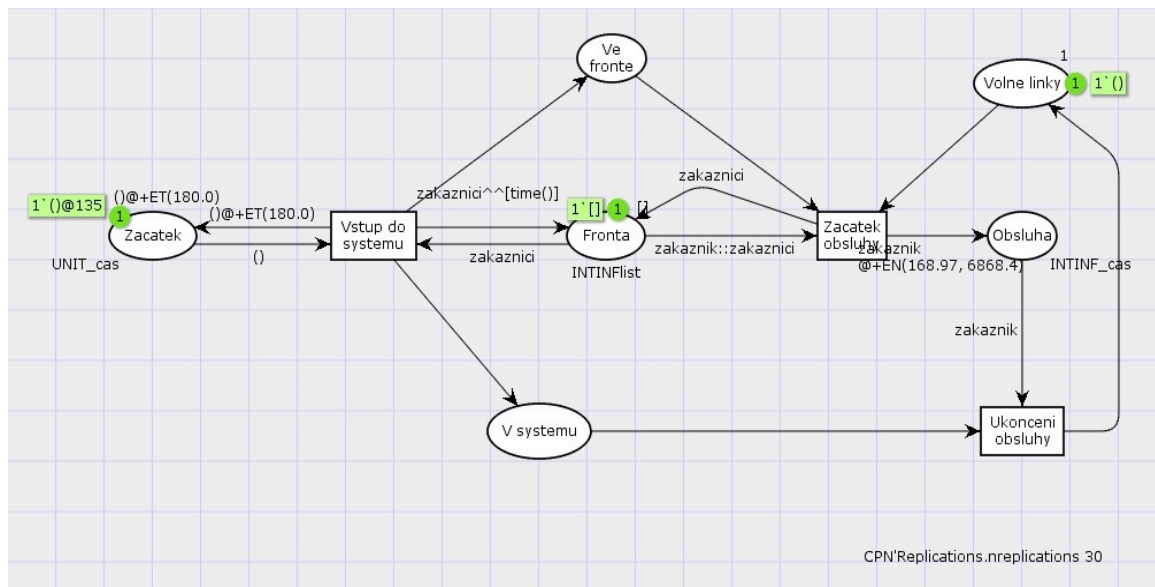


Obrázek 9: Graf hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení pravděpodobnosti [6]

## 4. SIMULAČNÍ MODEL VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY

V programu CPN Tools musíme namodelovat nejen vzletovou a přistávací dráhu, ale celý systém, ve kterém se proces vzletu a přistání odehrává se všemi jeho základními komponenty. Bude se jednat o systém hromadné obsluhy s neomezenou frontou. Simulační model v počáteční fázi je zobrazen na obrázku č. 10.

### 4.1. VYTVOŘENÁ PETRIHO SÍŤ



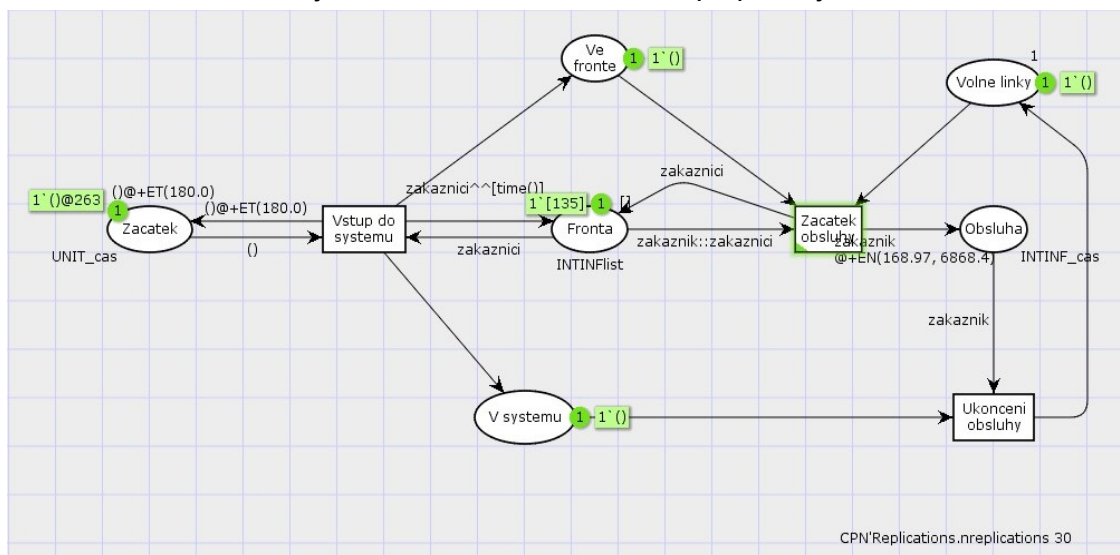
Obrázek 10: Simulační model systému v počátečním stavu

Místo ‚Zacatek‘ slouží pro generování nových tokenů, v našem případě letounů připravených na přistání či vzlet. V místě začátek se nachází jeden token s hodnotou časového razítka, která je získána jako exponenciální náhodná proměnná se střední hodnotou 180 sekund, to znamená, že první zákazník vstoupí do systému po uplynutí tohoto času (toto nastavení odpovídá průměrně 20 letounům na vzletu a přistání během jedné hodiny). Vstup zákazníka do systému je modelován pomocí přechodu ‚Vstup do systemu‘. Pomocí orientované hrany z přechodu ‚Vstup do systemu‘ do místa ‚Zacatek‘ zajistíme nekonečný přísun dalších zákazníků, tedy letounů, kdy nám letouny budou vstupovat do systému (ucházet se o vzlet nebo přistání) s časovými odstupy danými exponenciální náhodnou proměnnou se střední hodnotou 180 sekund – toto je zajištěno pomocí navýšování časového razítka v hranovém výrazu této hrany.

Vstupem do systému si můžeme představit prvotní kontakt letounu s věží letiště, na kterém bude přistávat, popřípadě vzletat, čímž se zařadí do fronty letounů čekajících na povolení k přistání, čí vzletu. Jedná se o systém s neomezenou frontou, což znamená, že ve frontě se může nacházet nekonečné množství zákazníků. Ve frontě tedy máme všechny letouny, se kterými se již věž zkontaktovala, a která čekají na další pokyny řídicích.



Simulací právě jednoho kroku se nám přesune token z místa ‚Zacatek‘ do místa ‚Fronta‘ a také do místa ‚Ve fronte‘, kterému se budu věnovat později. Tím se nám otevřela možnost provedení přechodu ‚Zacatek obsluhy‘. Místo ‚Fronta‘ obsahuje v každém značení pouze jeden token, který obsahuje seznam celočíselných hodnot, které vyjadřují hodnoty simulačního času, kdy došlo ke vstupu čekajících zákazníků do systému. Na obrázku č. 11 je zobrazen simulační model po právě jednom kroku.

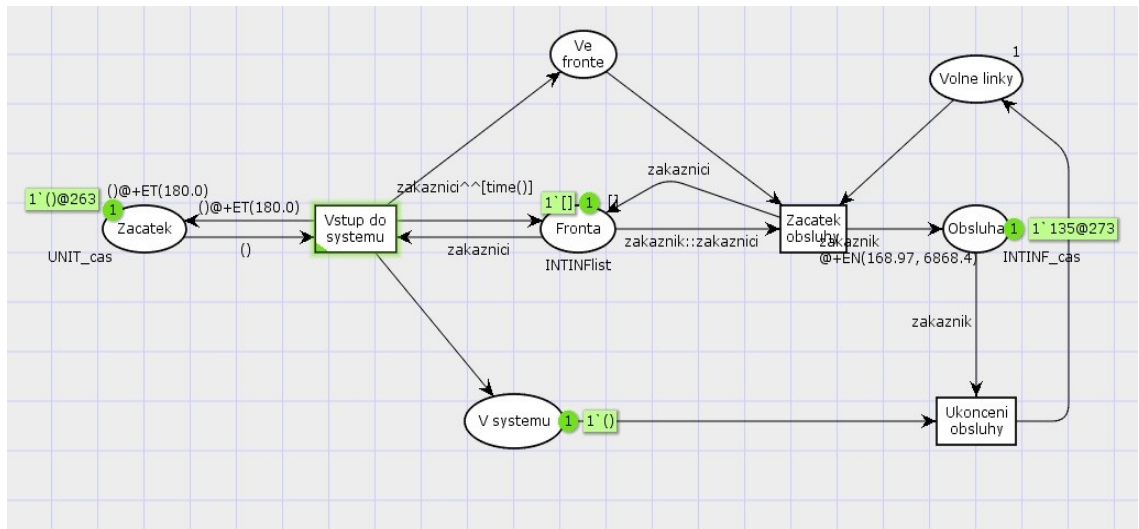


Obrázek 11: Simulační mode systému po právě jednom kroku

Komplementární místo ‚Volne linky‘ představuje v našem případě vzletovou a přistávací dráhu neboli runway. V našem systému počítáme s letištěm, které má pouze jednu vzletovou a přistávací dráhu a tím pádem je také množství volných linek nastaveno na maximální hodnotu 1. Pokud máme runway k dispozici, což znamená, že v místě ‚Volne linky‘ se nachází jeden token, můžeme zahájit ‚Zacatek obsluhy‘, který v sobě skrývá celý proces vzletu či přistání. V nástroji CPN Tools poznáme možnost provedení přechodu ‚Zacatek obsluhy‘ zeleným podbarvením tohoto přechodu.

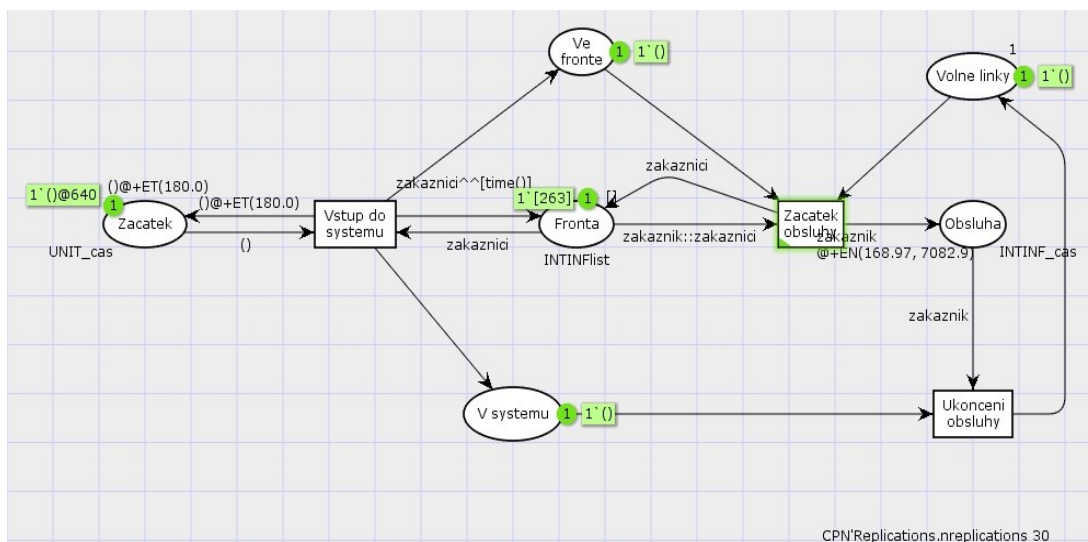
Provedením přesunu tokenu z místa ‚Fronta‘ zajistíme, že z fronty odebereme zákazníka (letoun), které čeká ve frontě nejdéle.

Díky přechodu ‚Zacatek obsluhy‘ se přesune jeden token z místa ‚Fronta‘ do místa ‚Obsluha‘, kdy doba trvání obsluhy (realizace vzletu nebo přistání včetně potřebného rozestupu) je náhodná proměnná řízená normálním rozdělením pravděpodobnosti se střední dobou obsluhy 168,97 s a rozptylem 6868,4 s<sup>2</sup>. Zároveň se nám zaplní naše jediná volná linka, takže v místě ‚Volne linky‘ se nebude až do ukončení obsluhy nacházet žádný token. Přechod ‚Zacatek obsluhy‘ samozřejmě nebude v tomto okamžiku proveditelný vzhledem k nedostupnosti volné linky (runway). Tato situace je vyobrazena na obrázku č. 12.



Obrázek 12: Simulační model systému po dvou krocích

Tokenu modelující letoun bylo přiřazeno časové razítko @273 což znamená, že se bude v obsluze nacházet až do simulačního času 273 sekund. Poté je proveden přechod ‚Ukonceni obsluhy‘, který se nám mezitím podbarvil zeleně, což znamená, že je proveditelný. Ukončení obsluhy v našem případě znamená okamžik, kdy letoun již opustil runway a v případě potřeby bylo vyčkáno na uklidnění prostředí na vzletové a přistávací dráze způsobené turbulencí v úplavu vzlétajícího nebo přistávajícího letounu. Tím se nám uvolní runway k dalšímu používání, a tedy budeme mít opět k dispozici volnou linku a přechod ‚Zacatek obsluhy‘ bude zase proveditelný, za podmínky, kdy se v místě ‚Fronta‘ bude nacházet minimálně jeden token jak je patrné z obrázku č. 13.



Obrázek 13: Simulační model systému po skončení obsluhy prvního letounu

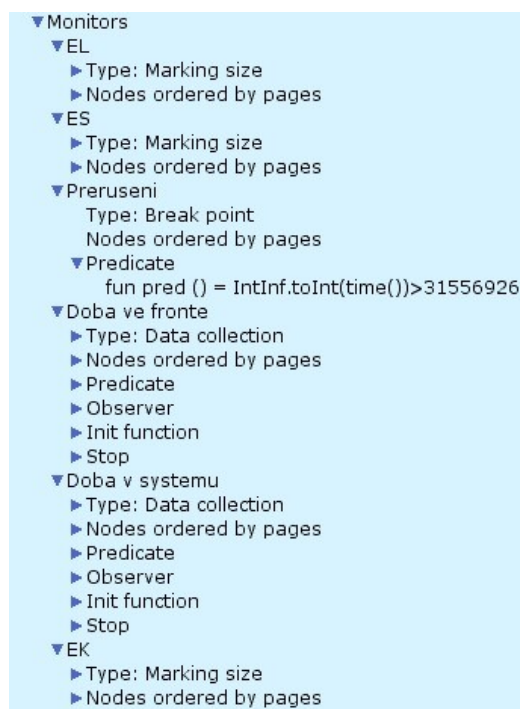
Místo ‚Ve fronte‘ slouží především k monitorování počtu letadel nacházejících se ve frontě. Místo ‚Fronta‘ nám totiž bude ukazovat, že ve frontě se nachází vždy jeden token, který ovšem představuje všechny čekající tokeny dohromady jako jeden seznam. Pro určení přesného počtu tokenů ve frontě nám tedy slouží místo ‚Ve fronte‘. Stejnou funkci má potom monitorovací místo ‚V systému‘, které nám monitoruje celkový počet tokenů (letadel), které se momentálně v systému nacházejí.

## 4.2. DEKLARAČNÍ ČÁST

Monitorovací funkce dat se používají k získávání číselných dat během simulací. Tato data se poté používají k výpočtu statistik (provozních charakteristik) a data mohou být uložena do protokolů. Monitorovací funkce může vypočítat jak časované, tak i nečasované statistiky. Tyto monitorovací funkce se využívají pro analýzu výkonnosti sítí.

Monitorovací funkce Marking Size extrahuje počet tokenů v určitém místě během simulace a používá tyto hodnoty například k výpočtu průměrného počtu tokenů v místě během celé simulace.

V našem případě odhadujeme střední počet zákazníků ve frontě (EL), střední počet zákazníků v obsluze (ES) a střední počet zákazníků v systému (EK). Jednotlivé monitorovací funkce můžeme vidět na obrázku č. 14.



Obrázek 14: Monitorovací funkce

Další z funkcí je funkce Breaking Point, která za určitých nastavených podmínek simulaci zastaví. V našem případě je podmínka zastavení simulace dána jako dosažení simulačního času 31556926 sekund což odpovídá jednomu roku.

Poslední použitá monitorovací funkce je všeobecná funkce Data collection, která slouží k extrahování libovolných číselných dat během simulace. Výstup této funkce se nám uloží do souboru output. Tento typ monitorovací funkce je použit pro odhad střední doby čekání ve frontě a střední doby pobytu v celém systému. Deklarace jsou ukázány na obrázku č. 15.

```
▼ Declarations
  ▼ colset UNIT = unit;
  ▼ colset UNIT_cas = unit timed;
  ▼ colset INTINF = intinf;
  ▼ colset INTINF_cas = intinf timed;
  ▼ colset INTINFlist = list INTINF;
  ▼ var zakaznik: INTINF;
  ▼ var zakaznici: INTINFlist;
  ▼ fun ET (EX) = round (exponential (1.0/EX));
  ▼ fun ER (k, mi) = round (erlang(k, mi/1.0));
  ▼ fun EN (mi, s) = round (normal (mi/1.0, s/1.0));
  ▶ Standard priorities
  ▶ Standard declarations
```

Obrázek 15: Deklarace

Množina barev neboli Color set (zkráceně colset), může být jednoduchá, nebo složená, pokud je zhotovena z jiných množin barev.

Množina colset UNIT je základní jednotkou a pokud není určeno jinak, platí pro všechny tokeny v systému. Tato množina UNIT odpovídá tokenům z P/T Petriho sítí. Zpravidla se označuje prázdnými kulatými závorkami ().

Množina barev se načasuje přidáním klíčového slova *timed* na konci její deklarace. Nejméně jedna množina barev musí být časovaná, aby bylo možné spustit simulaci s časem. Chceme-li tedy přidat tokenům časové razítko, musíme definovat časovanou množinu barev. V našem případě se jedná například o množinu barev UNIT\_cas.

Množina barev INTINF je zkratka pro integer to infinity, přeloženo jako celá čísla jdoucí až do nekonečna. Toto potřebujeme v případě, kdy simulační čas nabývá vysokých hodnot. Colset INTINFlist nám zajišťuje, že příchozí tokeny v podobě celých čísel se budou postupně seřazovat do seznamu. Tento seznam se nám vytvoří v místě ‚Fronta‘, kdy se bude s každým provedením přechodu ‚Vstup do systému‘ a ‚Zacatek obsluhy‘ aktualizovat tak, aby odpovídal aktuálnímu rozložení tokenů.

Variable (*var*) neboli proměnná je identifikátor, jehož hodnota může být změněna během provádění modelu. Modelu jsou definovány dvě proměnné, proměnná ‚zakaznik‘, která nabývá hodnot z množiny barev INTINF. Tato proměnná slouží pro modelování jednotlivých zákazníků, kteří jsou reprezentováni celočíselnou hodnotou odpovídající času jejich příchodu o systém. Druhá proměnná ‚zakaznici‘ slouží pro práci se seznamem tokenů čekajících v místě ‚Fronta‘

Dále byly definovány funkce ET (EX), ER (k, mi) a EN (mi, s), které slouží pro generování hodnot z exponenciálního, Erlangova a normálního rozdělení pravděpodobnosti. Tyto funkce potřebujeme pro modelování časových rozestupů mezi přicházejícími zákazníky a doby obsluhy zákazníků.

Do modelu byl dále vložen pomocný text ‚CPN'Replications.nreplications 30‘, jehož vyhodnocením je automaticky spuštěn simulační experiment zahrnující definovaný počet replikací, přičemž každá je ukončena při dosažení hodnoty simulačního času uvedeného ve funkci ‚preruseni‘.

Výstupy z monitorovacích funkcí jsou dány v tabulce souboru output, který nástroj CPN Tools po replikacích automaticky vytvoří. Takovýto výstup je ukázán na obrázku č. 16.

Statistics							
Name	Avrg	90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length	StD	Min	Max
<b>Doba_v_systemu</b>							
count_iid	175294.600000	138.209997	166.356353	<a href="#">224.194674</a>	445.560523	174475	176235
max_iid	13298.466667	867.642699	1044.337445	1407.429828	2797.101107	9820	23404
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
sum_iid	326071322.566667	7033898.832582	8466346.740806	11409902.991522	22675839.068948	288135474	383657875
avrg_iid	1859.960170	39.294409	47.296684	63.740665	126.677069	1650.799367	2187.019382
<b>Doba_ve_fronte</b>							
count_iid	175295.000000	138.155789	166.291106	<a href="#">224.106742</a>	445.385768	174476	176235
max_iid	13119.766667	868.172325	1044.974929	1408.288950	2798.808511	9707	23267
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
sum_iid	296340414.933333	7016723.187757	8445673.289560	11382041.851358	22620468.332571	258530403	353842048
avrg_iid	1690.350928	39.273465	47.271475	63.706692	126.609550	1481.184596	2017.044497
<b>EK</b>							
count_iid	350600.266667	<a href="#">277.036063</a>	333.454237	449.388693	893.107127	348957	352504
max_iid	77.300000	5.090584	6.127277	8.257592	16.410993	58	135
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	10.333152	0.222942	0.268344	0.361641	0.718720	9.130796	12.157585
<b>EL</b>							
count_iid	350600.666667	276.981773	333.388891	449.300627	892.932107	348958	352504
max_iid	76.300000	5.090584	6.127277	8.257592	16.410993	57	134
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	9.391004	0.222399	0.267690	0.360760	0.716968	8.192652	11.212745
<b>ES</b>							
count_iid	350591.600000	276.365748	332.647413	448.301354	890.946169	348953	352472
max_iid	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1	1
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	0.942148	0.000773	0.000931	0.001255	0.002493	0.936638	0.946406

Obrázek 16: Výstupy z monitorovacích funkcí

## 5. VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

Pomocí mého simulačního modelu vytvořeného v programu CPN Tools jsem provedl experimenty se třemi rozděleními pravděpodobnosti, a to s exponenciálním, Erlangovým a normálním. Výsledky dosažené těmito experimenty jsem porovnal s výsledky dosaženými Bc. Matouškem v jeho bakalářské práci. Rozdělení těchto výsledků bylo provedeno do tabulek pro jednotlivé provozní charakteristiky.

Ve svých experimentech pracuji s 95 % intervaly spolehlivosti. Při každém zpracování experimentů mi vyšla průměrná hodnota a polovina šířky 95 % intervalu spolehlivosti. Odečtením a přičtením této poloviny šířky k průměrné hodnotě jsem získal dolní a horní mez. Porovnáním zjišťuji, zdali se analytické výsledky z bakalářské práce z roku 2016/2017 pohybují právě v těchto mezích.

Provozní charakteristiky: ET – doba v systému

EW – doba ve frontě (střední doba zdržení)

EL – střední počet zákazníků ve frontě

ES – střední počet zákazníků v obsluze

EK – střední počet zákazníků v systému

### 5.1. EXPONENCIÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI

Tabulka 2: Výsledky a jejich porovnání při exponenciálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy

Breaking Point	$\lambda$	EW (s)	EW (min)	EW (h)	Dolní mez (min)	Horní mez (min)	Vypočítané
<b>31 556 926 s = 1 rok</b>	3600	8,5	0,142	0,002	0,137	0,146	0,139
	1800	17,4	0,290	0,005	0,286	0,295	0,292
	1200	27,5	0,458	0,008	0,450	0,467	0,462
	900	39	0,650	0,011	0,636	0,664	0,651
	720	52,2	0,870	0,015	0,863	0,878	0,864
	600	66,25	1,104	0,018	1,091	1,117	1,104
	514	82,7	1,378	0,023	1,360	1,397	1,378
	450	101,7	1,695	0,028	1,676	1,714	1,693
	400	123,4	2,057	0,034	2,032	2,082	2,06
	360	149,1	2,485	0,041	2,457	2,513	2,491
	327	180,8	3,013	0,050	2,985	3,042	3,006
	300	217,3	3,622	0,060	3,550	3,693	3,632
	277	265,4	4,423	0,074	4,386	4,461	4,408
	257	323,9	5,398	0,090	5,313	5,484	5,397
	240	403,79	6,730	0,112	6,659	6,800	6,699
	225	514,36	8,573	0,143	8,423	8,722	8,493
	212	670,38	11,173	0,186	10,848	11,498	11,12
	200	939,34	15,656	0,261	15,189	16,122	15,34
189	1391,4	23,190	0,387	22,488	23,892	23,21	
180	2639,9	43,998	0,733	41,473	46,523	43,14	
171	12237,18	203,953	3,399	178,330	229,576	193,5	

V tabulce č. 2 vidíme jednotlivé výsledky pro střední dobu zdržení při exponenciálním rozdělení pravděpodobnosti. Pro hodnoty EW (střední doba zdržení) při exponenciálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy byly provedeny simulační experimenty, z jejichž výsledků můžeme říci, že vypočítané hodnoty z bakalářské práce z akademického roku 2016/2017 se pohybují v mezích určenými právě výsledky těchto experimentů. Hodnoty se pohybují od 8,5 sekund do 3,4 hodin.

## 5.2. ERLANGOVO ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI

Tabulka 3: Výsledky a jejich porovnání při Erlangově rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy

Breaking Point	$\lambda$	EW (s)	EW (min)	EW (h)	Dolní mez (min)	Horní mez (min)	Vypočítané
<b>31 556 926 s = 1 rok</b>	3600	5,04	0,084	0,001	0,082	0,086	0,083
	1800	10,44	0,176	0,003	0,174	0,178	0,175
	1200	16,56	0,277	0,005	0,274	0,280	0,277
	900	23,4	0,389	0,007	0,386	0,392	0,391
	720	30,96	0,516	0,009	0,513	0,519	0,518
	600	39,6	0,663	0,011	0,659	0,667	0,662
	514	49,68	0,828	0,014	0,824	0,832	0,827
	450	61,2	1,015	0,017	1,011	1,019	1,016
	400	72	1,237	0,020	1,231	1,243	1,236
	360	90	1,500	0,025	1,493	1,507	1,495
	327	108	1,803	0,030	1,793	1,813	1,804
	300	129,6	2,180	0,036	2,169	2,191	2,179
	277	158,4	2,646	0,044	2,632	2,660	2,645
	257	194,4	3,237	0,054	3,217	3,257	3,238
	240	241,2	4,018	0,067	3,992	4,044	4,02
	225	306	5,126	0,085	5,088	5,165	5,096
	212	399,6	6,671	0,111	6,618	6,724	6,672
	200	550,8	9,210	0,153	9,108	9,312	9,201
	189	835,2	13,895	0,232	13,641	14,149	13,92
	180	1566	26,111	0,435	25,381	26,841	25,88
171	6716,65	111,944	1,866	101,044	122,844	116,1	

V tabulce č. 3 vidíme jednotlivé výsledky pro střední dobu zdržení při Erlangově rozdělení pravděpodobnosti. Pro hodnoty EW (střední doba zdržení) při Erlangově rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy, můžeme říci stejný závěr, jako u rozdělení exponenciálního, a to že vypočítané výsledky se pohybují v mezích vytyčenými 95 % intervaly spolehlivosti. Jednotlivé odchylky jsou oproti předchozímu rozdělení menší a rozsah výsledků se také viditelně zúžil. Hodnoty se pohybují od 5 sekund do 1,9 hodin.



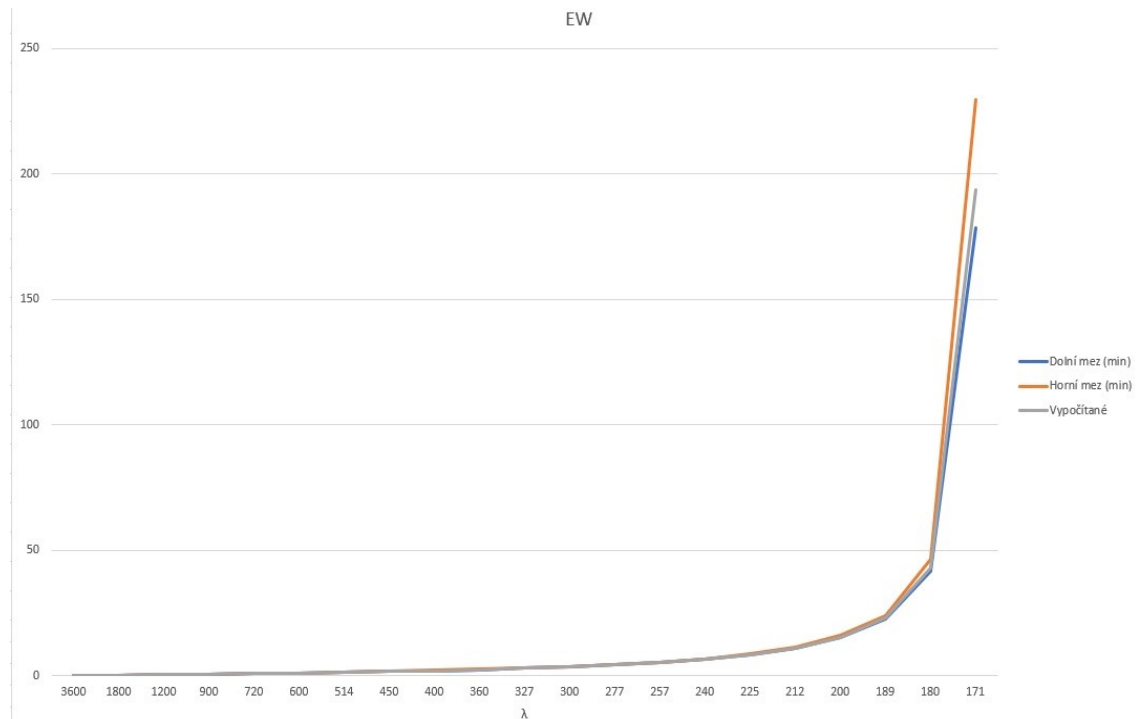
### 5.3. NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI

Tabulka 4: Výsledky a jejich porovnání při normálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy

Breaking Point	$\lambda$	EW (s)	EW (min)	EW (h)	Dolní mez (min)	Horní mez (min)	Vypočítané
<b>31 556 926 s = 1 rok</b>	3600	5,04	0,086	0,001	0,084	0,088	0,083
	1800	10,8	0,180	0,003	0,178	0,182	0,175
	1200	16,92	0,285	0,005	0,283	0,287	0,277
	900	24,48	0,406	0,007	0,403	0,409	0,391
	720	32,04	0,537	0,009	0,533	0,541	0,518
	600	39,6	0,685	0,011	0,681	0,689	0,662
	514	51,48	0,856	0,014	0,851	0,861	0,827
	450	63	1,050	0,018	1,045	1,055	1,016
	400	76,68	1,280	0,021	1,274	1,286	1,236
	360	93,6	1,562	0,026	1,552	1,572	1,495
	327	111,6	1,870	0,031	1,860	1,880	1,804
	300	136,8	2,260	0,038	2,247	2,273	2,179
	277	165,6	2,747	0,046	2,728	2,766	2,645
	257	201,6	3,353	0,056	3,330	3,376	3,238
	240	248,4	4,159	0,069	4,136	4,182	4,02
	225	316,8	5,306	0,088	5,276	5,337	5,096
	212	417,6	6,969	0,116	6,922	7,016	6,672
	200	579,6	9,632	0,161	9,542	9,722	9,201
	189	882	14,733	0,245	14,563	14,903	13,92
	180	1699,2	28,313	0,472	27,645	28,981	25,88
171	6716,65	146,541	2,442	131,250	161,832	116,1	

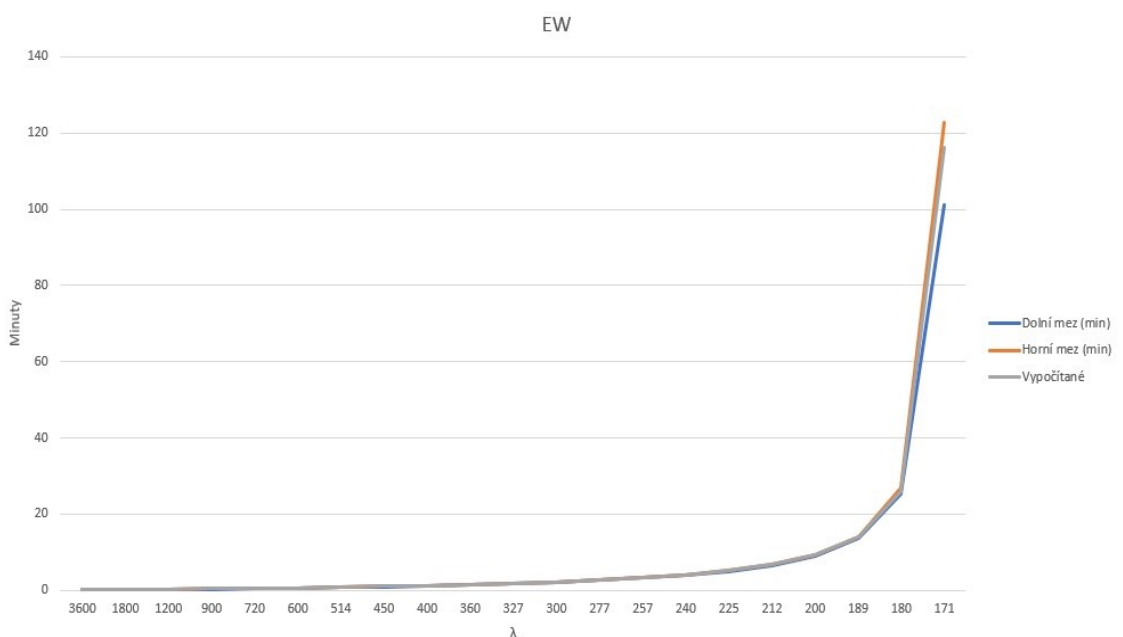
V tabulce č. 4 vidíme jednotlivé výsledky pro střední dobu zdržení při normálním rozdělení pravděpodobnosti. Pro hodnoty EW (střední doba zdržení) při normálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy se vypočítané výsledky nevešly do určených mezí, kdy se vypočítané hodnoty pohybují vždy pod hranicí dolní meze. Tento fakt je způsoben tím, že vždy když se vygeneruje záporné časové razítko, tak je doba obsluhy nulová, což je nereálné. Záporná doba obsluhy se v programu CPN Tools převede na nulovou dobu obsluhy. To vede prakticky ke skutečnosti, že použité doby obsluhy vykazují vyšší střední hodnotu v modelu, než činí hodnoty použité v bakalářské práci Bc. Matouška. To má za následek, že simulací získané odhady provozních charakteristik jsou vyšší, než hodnoty vypočítané v bakalářské práci z roku 2016/2017.

## 5.4. GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ODCHYLEK

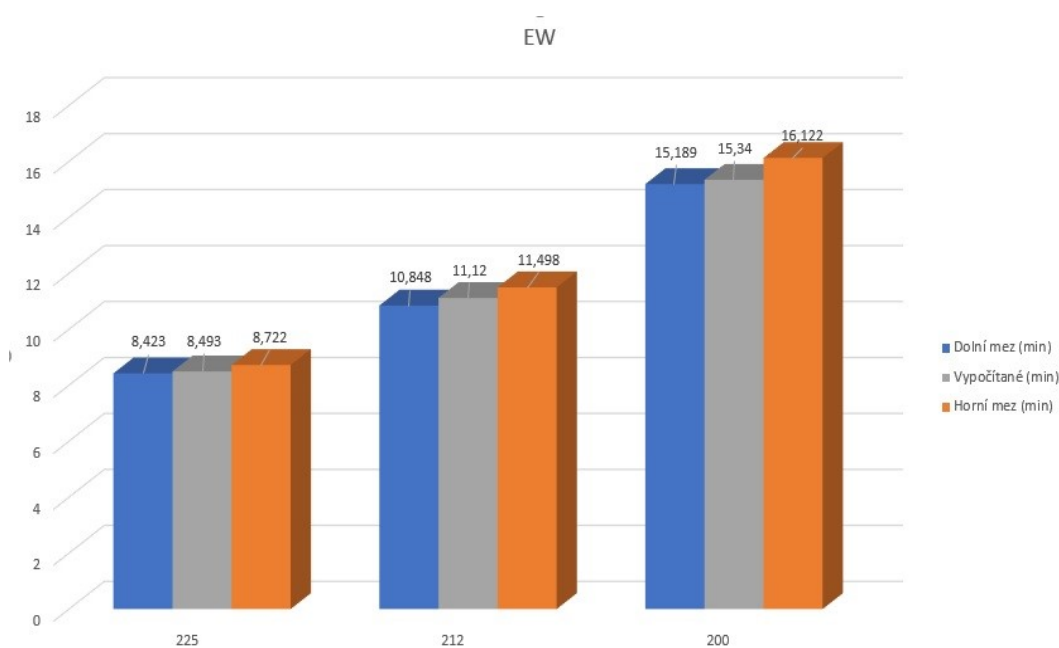


Obrázek 17: Spojnicový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti

Graficky se výsledky špatně znázorňují z důvodu minimálních odchylek. Na obrázcích č. 17 a č. 18 jsou zobrazeny spojnicové grafy střední doby zdržení pro exponenciální a Erlangovo rozdělení. Šedá linie, která zobrazuje vypočítané výsledky z předešlé bakalářské práce, se pohybuje mezi modrou a oranžovou linií, které vytyčují dolní, respektive horní mez. Pro poslední 4 vstupní hodnoty jsou už odchylky viditelnější.

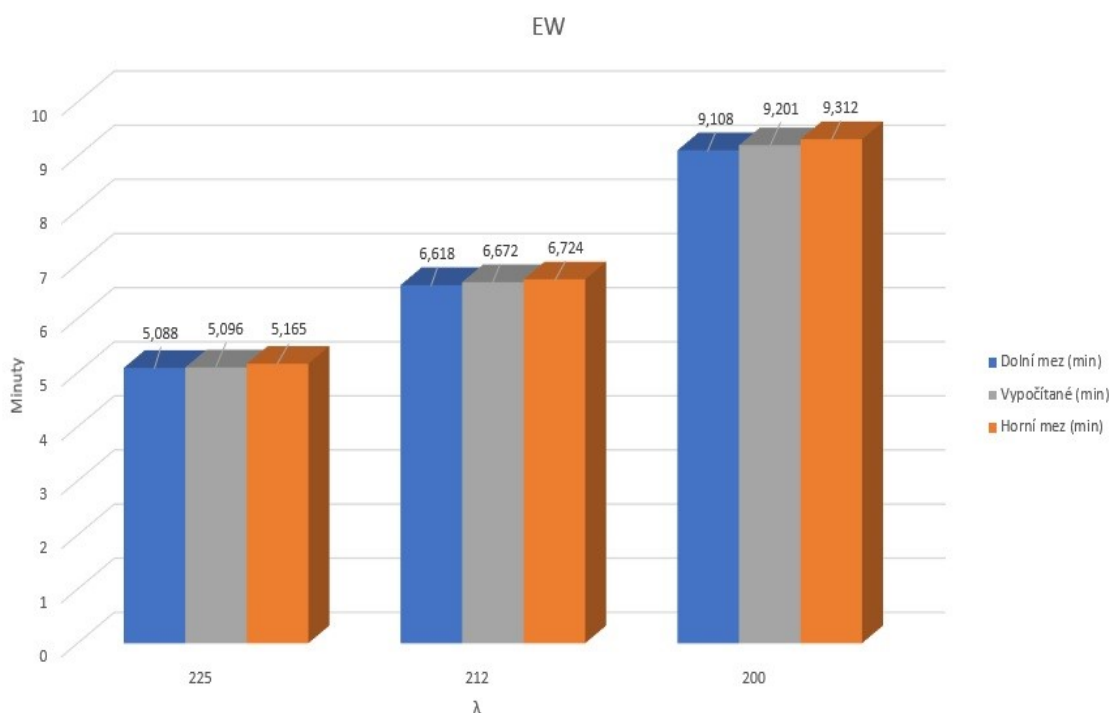


Obrázek 18: Spojnicový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti



Obrázek 19: Sloupcový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti

Sloupcové grafy viditelné na obrázcích č. 19 a č. 20 pro určené tři vstupní hodnoty nám už dává přesnější představu o tom, v jakých hodnotách a s jakými odchylkami se výsledky pohybují. Zobrazené výsledky odpovídají vstupnímu toku 16, 17 a 18 letadel za hodinu. Jednotkami výsledných hodnot jsou minuty.



Obrázek 20: Sloupcový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti

## 6. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo na bázi barevných Petriho sítí vytvořit simulační model vzletové a přistávací dráhy a pomocí experimentů s tímto modelem stanovit kapacitu vzletové a přistávací dráhy. Výsledky dosažené simulačními experimenty byly srovnány s výsledky analytickými obsaženými v bakalářské práci obhajované v akademickém roce 2016/2017.

V úvodní kapitole jsem se zabýval charakterizováním modelovaného procesu, a to konkrétně procesem a jednotlivými fázemi vzletu a přistání. Dále byly popsány faktory, které významně ovlivňují celý tento proces. Mezi ty nejdůležitější faktory patří meteorologické podmínky jako teplota, nebo směr a síla větru, jednotlivé parametry letounu, parametry dráhy a lidský činitel, který je v celé oblasti letectví jedním z nejdůležitějších faktorů. Dále byly popsány vyhlášené délky drah a rozestupy, které mezi sebou musí letouny udržovat i vzhledem k jevu nazývanému se turbulence v úplavu. Díky tohoto jevu se letouny rozdělují do několika kategorií, podle kterých se potom jednotlivé rozestupy řídí.

V následující kapitole byla stručně popsána historie nástroje CPN Tools a dále byla popsána teorie Petriho sítí, ve které jsem se zaměřil hlavně na popis mnou využívaných barevných Petriho sítí a P/T Petriho sítí, ze kterých barevné vycházejí. Byly vyjmenovány a popsány jednotlivé části těchto sítí, včetně pravidel, kterými se při práci s těmito sítěmi musíme řídit. Dále jsem se zabýval také stručnou teorií rozdělení pravděpodobnosti, se kterou ve své práci pracuji.

Ve čtvrté kapitole došlo k navržení simulačního modelu v nástroji CPN Tools, ve kterém měním dobu obsluhy a vstupní tok. Následuje popis jednotlivých částí tohoto modelu včetně jejich přirovnání k praxi a představení toho, co vyjadřují. Tato kapitola se dělí na dvě části, a to na popis grafické části modelu včetně jednotlivých míst a přechodů, a na textovou neboli inskripční část, ve které jsou popsány vstupní hodnoty, monitorovací funkce, provozní charakteristiky a jsou tam definovány jednotlivá rozdělení pravděpodobnosti konkrétně exponenciální, Erlangovo a normální.

Pátá kapitola je zaměřena na zpracování výsledků dosaženými pomocí simulačních experimentů. V textové části práce jsou prezentovány pouze výsledky pro provozní charakteristiku střední doba zdržení ve frontě (EW). Zbývající výsledky jsou přehledně zobrazeny v elektronických přílohách. Součástí výsledků je také porovnání

s analytickými výsledky z bakalářské práce obhajované v akademickém roce 2016/2017.

Barevné Petriho sítě byly vybrány z důvodu otestování této metody řešení v leteckém prostředí. Provedením simulačních experimentů bylo zjištěno, že získáváme relevantní výsledky, které se téměř shodují s analytickými výsledky z již zmíněné bakalářské práce. Mírné odchylky mezi výsledky mohou být způsobeny náhodností, zaokrouhleními či kratším testovacím čase. Tímto došlo k rozšíření portfolia problémů, které se dají právě díky barevných Petriho sítí řešit.

Ukázalo se, že použití normálního rozdělení s námi nastavenými parametry není vhodné, protože existuje vysoká pravděpodobnost, že bude vygenerována záporná doba obsluhy. Simulační model vykazoval vyšší hodnoty, než byly hodnoty vypočítané.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### Tištěné zdroje

[1] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2013: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost.*

Cheb: Svět křídel, 2013. ISBN 978-80-87567-26-5.

[2] VOLNER, Rudolf. *Flight planning management.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-496-2.

[3] VORÁČOVÁ, Šárka, Martin PĚNIČKA a Jaroslav VESELÝ. *Úvod do modelování procesů Petriho sítěmi.* Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03979-3.

### Elektronické zdroje

[4] JENSEN, Kurt, Lars Michael KRISTENSEN a Lisa WELLS. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer* [online]. Springer-Verlag, 2007, s. 213-254 [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-3-642-00283-0.

[5] Exponential distribution. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_distribution)

[6] Normal distribution. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution)

[7] DORDA, Michal. *Úvod do Petriho sítí.* Heuristické a nekonvenční metody optimalizace [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~dor028/Nekonvencni\\_metody\\_1.pdf](http://homen.vsb.cz/~dor028/Nekonvencni_metody_1.pdf)

[8] DORDA, Michal. *Modelování uzavřených obslužných logistických systémů Petriho sítěmi.* 2017.

[9] OTIPKA, Petr. *ZÁKLADNÍ TYPY ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI SPOJITÉ NÁHODNÉ VELIČINY* [online]. 14.11.2013. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/>

- [10] NADRCHAL, Tomáš. *Generátory pseudonáhodných čísel rozdělení pravděpodobností* [online]. 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52390/NadrchalT\\_GeneratoryPseudonahodnych\\_JV\\_2013.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52390/NadrchalT_GeneratoryPseudonahodnych_JV_2013.pdf?sequence=6&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [11] How do runway declared distances affect my takeoff distance?. *Stack Exchange: Aviation* [online]. 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/22350/how-do-runway-declared-distances-affect-my-takeoff-distance>
- [12] Normální rozdělení. *WikiSkripta* [online]. 2016 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Norm%C3%A1ln%C3%AD\\_rozd%C4%9Blen%C3%AD](https://www.wikiskripta.eu/w/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD)
- [13] POTMĚŠIL, Jaroslav. *Spojité rozdělení pravděpodobností* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~potmesil/Skripta%20-%20Pravdepodobnost%20Statistika/Prst-Statist\\_BrisLitschmanova-Ostrava/8snv.pdf](http://home.zcu.cz/~potmesil/Skripta%20-%20Pravdepodobnost%20Statistika/Prst-Statist_BrisLitschmanova-Ostrava/8snv.pdf)

# SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

## Obrázky

Obrázek 1: Fáze vzletu [1]

Obrázek 2: Fáze přistání [1]

Obrázek 3: Vyhlášené délky drah [11]

Obrázek 4: Vliv vztlakových klapek na délku vzletu [1]

Obrázek 5: Základní prvky Petriho sítí

Obrázek 6: Příklad P/T Petriho sítě [3]

Obrázek 7: Graf hustoty pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti [5]

Obrázek 8: Graf hustoty pravděpodobnosti Erlangova rozdělení pravděpodobnosti [13]

Obrázek 9: Graf hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení pravděpodobnosti [6]

Obrázek 10: Simulační model systému v počátečním stavu

Obrázek 11: Simulační model systému po právě jednom kroku

Obrázek 12: Simulační model systému po dvou krocích

Obrázek 13: Simulační model systému po skončení obsluhy prvního letounu

Obrázek 14: Monitorovací funkce

Obrázek 15: Deklarace

Obrázek 16: Výstupy z monitorovacích funkcí

Obrázek 17: Spojnicový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti

Obrázek 18: Spojnicový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti

Obrázek 19: Sloupcový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti

Obrázek 20: Sloupcový graf střední doby zdržení pro výsledky s dobou obsluhy řídicí se Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti

## Tabulky

Tabulka 1: Tabulka minimálních rozestupů v NM [2]

Tabulka 2: Výsledky a jejich porovnání při exponenciálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy

Tabulka 3: Výsledky a jejich porovnání při Erlangově rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy

Tabulka 4: Výsledky a jejich porovnání při normálním rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 – Výsledky provozních charakteristik pro exponenciální rozdělení pravděpodobnosti

Příloha č. 2 - Výsledky provozních charakteristik pro Erlangovo rozdělení pravděpodobnosti

Příloha č. 3 - Výsledky provozních charakteristik pro exponenciální rozdělení pravděpodobnosti

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Michalu Dordovi, Ph.D. za odborné rady a ochotu během konzultací při zpracování práce.

Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. Dušanu Teichmannovi Ph.D. za jeho rady a nápady v rámci práce a prezentace.