

# INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Modelování a simulace (IMS)

*Zaplněnost vlakového spoje Brno – Bučovice*

*Téma: Doprava zboží nebo osob*

Autoři:

Dominik Skála, xskala11  
Jan Hrbotický, xhrbot01  
29. listopadu 2017

## Contents

1.	Úvod.....	3
1.1	Autoři .....	3
1.2	Ověření validity modelu.....	3
2.	Rozbor tématu .....	3
2.1	Použité postupy.....	5
2.2	Původ použitých metod .....	5
3.	Koncepce.....	5
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu.....	5
3.2	Forma konceptuálního modelu.....	6
4.	Architektura simulačního modelu.....	8
4.1	Mapování abstraktního modelu do simulačního .....	8
5.	Podstat simulačních experimentů a jejich průběh .....	9
5.1	Postup experimentování.....	9
5.2	Dokumentace experimentů .....	9
5.3	Experiment na základě reálného modelu.....	10
5.4	Více vlaků ve špičce .....	11
5.5	Snížení intervalů vlaků ve špičce .....	11
5.6	Závěr experimentů .....	11
6.	Shrnutí simulačních experimentů a závěr.....	12
7.	Reference.....	13

## 1. Úvod

Tato práce se zaměřuje na problematiku obsluhy zrychleného vlakového spoje mezi městy Veselí nad Moravou a Brnem. Následující kapitoly pojednávají o vybraném tématu, simulačních experimentech a architektuře simulačního modelu ([2], str. 8) a také o tvorbě simulátoru pomocí knihovny SIMLIB, která je tvořena v jazyce C++.

### 1.1 Autoři

Autory technické zprávy jsou studenti třetího ročníku bakalářského studia v předmětu Modelování a simulace (dále jen IMS), oba jsou zmíněni níže včetně rozdělení jednotlivých prací:

- Dominik Skála (vedoucí projektu) – Petriho síť a implementace
- Jan Hrbotický – dokumentace a implementace

Konzultace a odborná fakta k problematice obsluhy byla zjišťována na Oblastním ředitelství Správa železniční dopravní cesty (dále jen SŽDC) v Brně u pana Krčmy. Oblastní ředitelství SŽDC dopomohlo k upřesnění vybraného tématu, dodalo nám data, která nebylo možné sehnat napřímo z oficiálních zdrojů dopravce v Jihomoravském kraji. Základní informace k modelu byly získány z jízdních řádů a map pokrytí dopravce KORDIS JMK [1], který spolupracuje na provozování dané tratě.

Bližší informace a poznatky byly provedeny měřeními na vlakové stanicích Bučovice a Brno.

### 1.2 Ověření validity modelu

Validita[2][str. 37] modelu byla ověřena následujícím způsobem:

- Po konzultaci s panem Krčmou jsme obdrželi odborná fakta, na základě kterých jsme systém modelovali, zároveň s tím jsme obdrželi i fakta validační, která jsme po provedení simulačních experimentů a ladění programu využili ke kontrole validity modelu.
- Data byla porovnána s jízdními řády a se statistikou cestujících, které si SŽDC vede. Výstupní data modelu byly shledány jako korektní/validní.

## 2. Rozbor tématu

Informace pro tuto modelaci jsme získávali ze dvou různých zdrojů. Obecné vlastnosti jako například počet vlaků, jejich odjezdy, dobu trvání jízdy atp. Jsme získávali na stránkách KORDIS JMK [1]. Interní informace o počtu vagónů, počtech cestujících apod. jsme získali na schůzce s panem Krčmou, pracovníkem na Oblastním ředitelství SŽDC, který nám ochotně sdělil data, která jsme potřebovali. Bylo nám taktéž sděleno **abychom modelovali pouze spěšné vlaky**. Pro ostatní typy vlaků nám nemohl poskytnout potřebné informace a simulace ([2], str. 8) by tak nebyla možná.

Na námi modelované trase v této chvíli provozují České dráhy 10 spěšných vlaků. Každý den využije služeb společnosti na této trati přibližně tisícovka lidí. Intervaly mezi nimi se liší v závislosti na čase. Rozlišujeme **špičku** a **nešpičku**.

- Špičku modelujeme od 05:00 do 08:30
  - Špička se vyznačuje tím, že v tuto dobu jezdí dle našich dat největší počet cestujících.
  - Vlaky jsou v tomto intervalu vybavovány **po hodině**.

- Až **54 %** všech cestujících přepraví vlaky ve špičce.
- Nešpičkou pak rozumíme všechny ostatní vlaky jedoucí od 08:30 do 21:00. hodiny večerní.
  - Zbývajících **46 %** cestujících se tedy rozloží během celého zbytku dle mezi všechny spoje.
  - Vlaky v tomto intervalu jsou odesílány po **dvou hodinách**.
- Od 21 hodin večerní nevypravuje společnost žádné spoje. Žádné vlaky tedy náš model negeneruje.

Na naší trase modelujeme 4 zastávky. **Veselí nad Moravou, Bučovice, Slavkov u Brna a Brno**. Díky rozlišným velikostem měst je i počet cestujících odlišný a je třeba je odlišně modelovat.

	Průměrný počet cestujících během dne
Veselí nad Moravou	550
Bučovice	250
Slavkov u Brna	200

Obrázek 1: Průměrný počet cestujících během dne, zdroj: pan Krčma, SŽDC

Bylo třeba namodelovat i samotnou cestu vlakových souprav. Informace jsme zjistili na stránkách integrovaného dopravního systému. Informace o zpožděních a výlukách jsme nezískali, modelujeme tedy ideální stav – všechny vlaky jezdí bez zpoždění. Trvání jednotlivých jízd můžete vidět na Obrázku č.2.

	Doba cesty do následující stanice (min)
Veselí nad Moravou	60
Bučovice	10
Slavkov u Brna	25

Obrázek 2: Doba cesty mezi stanicemi, zdroj: KORDIS JMK

Společnost pak vybavuje vlaky konstantně **třemi vagóny**, každý vagón pak obsahuje **34** míst pro cestující. Dle informací SŽDC se počet vagónů mění pouze tehdy, kdy je na České dráhy (dále jen ČD) zaslán požadavek pro cestování větší skupiny. Tuto skutečnost ale díky její složitosti v našem projektu nemodelujeme a vycházíme z běžné modelové situace.

Do celkové doby procesu jízdy vlaku je třeba započítat i nástup a výstup cestujících. Dle specifikací vagónů použitých na vlakové trase Veselí nad Moravou – Brno jsme zjistili, že každý vagón má **dva vstupy**. Celkovou prodlevu pro nástup a výstup cestujících spočítáme podle vzorce:

$$N = (x * v) * (m + n) + 20$$

kde:

**N** je doba, kterou trvá výstup a nástup cestujících

**x** je počet vstupů do jednoho vagonu

**v** je počet vagonů  
**m** je počet nastupujících pasažérů  
**n** je počet vystupujících pasažérů

Konstanta 20 zařizuje korektní reálnou kontrolu průvodčího, který vlak vypravuje.

Výsledkem simulace by mělo být zhodnocení **profitability** aktuálního rozložení intervalů vlakových jednotek, podmínkou pro udržitelnost spoje je dle nařízení ČD **průměrná zaplněnost** vlakového spoje **větší rovna 70 %**.

## 2.1 Použité postupy

Byly použity dvě metody získávání informací o modelovaném systému. Prvním byla konzultace s panem Krčmou z Oblastního ředitelství SŽDC. Druhou formou bylo samostatné měření v terénu, které nám dopomohlo ve sběru dat v jednotlivých stanicích. Pokud není uvedeno jinak, údaje byly zjištěny na konzultaci s panem Krčmou.

Pro vytvoření abstraktního modelu ([2], str. 42) jsme použili modelování ([2], str. 8) s využitím Petriho sítě ([2], str. 123). Tento typ modelování je ideální, protože se jedná o systém hromadné obsluhy, který je vhodný pro modelování tras využít.

Pro implementaci byl zvolen jazyk C++, standardní knihovny jazyka C++ a knihovna Simlib [3], což je simulační knihovna, která poskytuje funkcionalitu potřebnou pro implementaci modelu.

## 2.2 Původ použitých metod

- C++ [4]
- Petriho síť ([2], str. 123)
- SIMLIB [3], ([2], str. 163 až 206)

# 3. Koncepce

Konceptuální model je vytvořen na základě výše zmíněných zjištěných faktů o modelovaném systému. Pro účely experimentů z něj bylo nutné vytvořit simulační model.

## 3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

Petriho síť na **obrázku 3** zobrazuje proces vzniku a generování cestujících a vlaků. PS zahrnuje generování cestujících v jednotlivých stanicích ve špičce a mimo špičku. Samozřejmě je i rozdělení vlaků ve špičce i mimo špičku. Chování vlaku je zde však rozšířeno o chování průvodčího, který provádí nakládání cestujících do vlaku, který však v simulačním modelu není nutný.

### 3.2 Forma konceptuálního modelu

Denně do jednotlivých stanic dorazí **celkem 1000** cestujících, přičemž z **Veselí** jede **550** lidí denně, z **Bučovic 250** a ze **Slavkova u Brna 200** lidí. Jelikož nechodí s jasným rozložením, je nutné jejich příchody modelovat exponenciálním rozložením ([2], str. 87) příchodu, vzorcem pro výpočet

příchodu ve špičce je:  $y = \text{Exp}\left(\frac{60}{\frac{x * 0.54}{3.5 * 60}}\right)$ .

Vzorec pro výpočet příchodu v nešpičce je:  $y = \text{Exp}\left(\frac{120}{\frac{x * (1 - 0.54)}{13.5 * 60}}\right)$ .

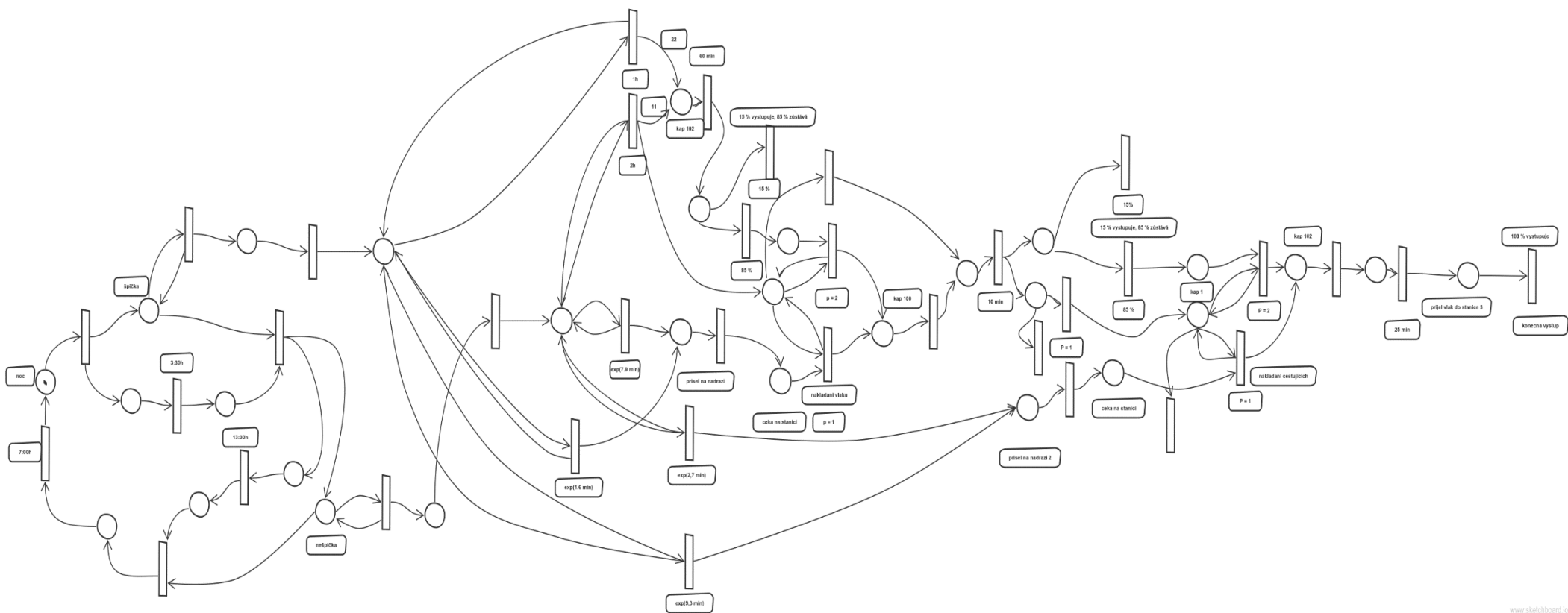
Víme, že **54 %** cestujících jezdí ve špičce, z toho je jasné, že zbylých **46 %** jezdí mimo ni. Špička, nešpička a noc jsou modelovány cyklem, který se střídá v intervalech: **špička = 3.5 hodiny, nešpička = 13.5 hodiny, noc** zbylé hodiny do 24 hodinového cyklu, tedy **7 hodin**.

V konceptuálním modelu se negenerují cestující v noci, v simulačním je však umožněno generování cestujících i v noci, s malým rozložením, protože dle pozorování bylo zjištěno, že ve výjimečných případech přijde několik cestujících i v noci (ujel vlak) a čekají zde.

Po příchodu jednotliví cestující čekají ve stanicích, dokud nepřijede vlak a neumožní jim nastoupit. V konceptuálním modelu nástup cestujících provádí průvodčí, který ale v simulačním modelu je vypuštěn a jeho logiku přebírá samotný vlak z důvodu zjednodušení modelu. Validitu simulačního modelu to však nijak neovlivňuje.

Každý **vlak** je generován v **hodinovém** nebo **dvouhodinovém** rozestupu dle toho, jestli je aktuálně **špička**, nebo se jedná o nešpičkový čas. Vždy má **3 vagony** a jeho celková **kapacita** je tedy **102 cestujících**. Doba příjezdu je jasně stanovena, mezi jednotlivými stanicemi je rozložení následující: **Veselí – Bučovice = 60 minut, Bučovice – Slavkov = 10 minut, Slavkov – Brno = 25 minut**. V **každé stanici**, kromě **Brna**, cestující vystupují s **15 %** šancí, v **Brně vystupují všichni** cestující ve vlaku.

V konceptuálním modelu jsou cestující z Veselí modelováni tak, že jsou již vygenerováni ve vlaku, v simulačním je toto modelováno přidáním stanice a čekárny ve městě Veselí nad Moravou, ze které poté cestující vstupují do vlaku. Jedná se o částečné zjednodušení modelu, výsledek nijak neovlivňuje.



Obrázek 3: Petriho síť

## 4. Architektura simulačního modelu

Model byl implementován v jazyce C++ s využitím simulační knihovny **Simlib**.

### 4.1 Mapování abstraktního modelu do simulačního

Abstraktní model odpovídá simulačnímu modelu, je však zjednodušen o chování průvodčího, který je obsažen v Petriho síti, simulační model ho však neobsahuje. Proces průvodčího, respektive jeho povinnosti a činnosti se dají snáze implementovat ve třídě vlaku, a tak jsme to tak učinili.

Simulace začíná nastavením celkové doby experimentu, která je standardně 30 dní. Veškeré časy (tedy modelový čas ([2], str. 21)) v modelu jsou v sekundách, to je za účelem zajištění co nejvyšší přesnosti při výpočtech. Po nastavení doby se spustí generátor vlaků a následně generátor cestujících ve všech stanicích ze kterých lze nastupovat. Následně se spustí simulace, provedou se výpočty profitability vlaků a dojde k výpisu simulačních informací.

V modelu existují dva procesy – výše zmíněný vlak a cestující.

#### 4.1.1 Třída Train

Tato třída reprezentuje logiku vlaku, tedy jeho přejezdy mezi stanicemi, zabírání a aktivace stanic a také čekání v těchto stanicích. Vlaky přejíždí mezi stanicemi uloženými v atributu *Stations[]* (zařízení([2], str. 146) s dobou, která je uložena v atributu *ROUTES[]*. Každý vlak má vlastní sklad ([2], str. 146), ve kterém se seskupují cestující při přepravě. Po příjezdu do stanice aktivuje cestující, kteří nastoupí do vlaku. Simuluje chování vlaku a zároveň průvodčího. Ve stanici čeká dobu, po kterou cestující vystupují a nastupují. Po dokončení tratě nechá vystoupit veškeré cestující a ukončí své chování.

#### 4.1.2 Třída Passenger

Představuje cestujícího, který chce jet vlakem. Po příchodu kontroluje čas, aby v případě dlouhého čekání na vlak mohl odejít a jet jiným způsobem. Jinak vstupuje do fronty([2], str. 138) *waitingRooms[]* v dané stanici a čeká dokud jej přijíždějící vlak v dané stanici neaktivuje a nenechá nastoupit. Po nástupu počká ve vlaku než může vystoupit a ukončí své chování.

#### 4.1.3 Třída TrainGenerator

Generátor vlaků, každý vlak se generuje v určitý čas dle jízdního řádu. Jízdní řád je zařízen podmínkami generování v určitém čase, začínají se generovat v 04:50 a generování končí nejpozději ve 21:01. Informace o časových rozestupech vlaků dle časové situace lze vyčíst v sekci 2.

#### 4.1.4 Třída PassengerGenerator

Generátor cestujících v jednotlivých stanicích. Tato metoda je sama přetížená, při generování je jí předána stanice, ve které se cestující generuje. Cestující se generují v jednotlivých stanicích v závislosti rychlosti na části dne (špička/nešpička/noc).



## 5. Podstat simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem experimentu bylo zjistit, jestli se z ekonomického hlediska vyplatí provozovat na dané trati další vlak v období špičky. Pokud se vlak neuživí, je nutné zjistit, za jakých podmínek by se vlak uživil, tedy co by muselo nastat, aby se vlak během špičky uživil.

### 5.1 Postup experimentování

Doba experimentů v simulaci je omezena vždy na 5 dní. Náš systém operuje nad pracovními dny, protože pouze v těchto dnech nastává období špičky a nešpičky. V období špičky a nešpičky vyjíždí vlaky v různých intervalech – ve špičce po hodině, mimo špičku každé 2 hodiny. Jednotlivé stanice jsou rozmístěny ve vzdálenosti, která odpovídá realitě.

Zkoumaným parametrem pro užitelnost vlaku bylo jeho zaplnění na trasách mezi jednotlivými stanicemi, z toho jsme počítali koeficient výnosnosti vlaku. Pokud tento koeficient je větší než 70 %, vlak se na dané trase užíví, pokud je tento koeficient menší než výše zmíněná hodnota, vlak se na dané trati neužíví. Pokud možno, je vhodné, aby koeficient byl vyšší než 90 %, aby byla profitabilita vlaku co možná nejvyšší. Dále jsme zkoumali, za jakých podmínek by se vlak uživil, tedy co by v daných městech muselo nastat za změny, aby se vlak uživil.

**Koeficient profitability** je vypočítán na principu váženého průměru. V každé stanici je vypočítána zaplněnost vlaku, která je násobena délkou tratě (tedy čas strávený vlakem na trati v sekundách). Vzorcem pro výpočet v dané trati je tedy:

$$y = 100 * (m/n)$$

kde:

**y** je koeficient zaplněnosti vlaku.

**m** je suma zaplněnosti vlaku na celé trati

**n** je suma kapacita daného vlaku na celé trati

přičemž pro **m** a **n** platí vzorec:

$$f = \sum_{k=0}^2 x[k] * trasa[k]$$

kde:

**k** je počet zastávek

**x[k]** je kapacita vlaku v dané stanici (platí pro **n**) | obsazenost vlaku po výstupu/nástupu cestujících v dané stanici (platí pro **m**)

**trasa[k]** je doba cesty vlaku do dané stanice

### 5.2 Dokumentace experimentů

V této podkapitole dochází k porovnání jednotlivých výsledků experimentů prováděných na simulačním modelu v závislosti na nastavení intervalů generování jednotlivých vlaků ve špičce. Všechny experimenty byly provedeny 3x na dobu 30 dní a zprůměrovány na jeden den.

### 5.3 Experiment na základě reálného modelu

Během prvního experimentu jsme otestovali veškeré hodnoty na reálném modelu. Vygenerovali jsme tedy standardní počet vlaků v časy, které jezdí na tratích. Tedy, veškeré výjezdy odpovídají aktuálnímu jízdnímu řádu.

Čas	Průměrná zaplněnost (%)
04:50	78.9
06:01	98.1
07:01	93.8
08:01	80
09:01	36.9
11:01	19.80
13:01	22.50
15:01	24.50
17:01	27.50
19:01	16.50
21:01	23.70
04:50	77.10
06:01	100.00
07:01	78.70
08:01	91.60
09:01	42.90
11:01	19.90
13:01	26.30
15:01	17.80
17:01	19.10
19:01	20.20
21:01	17.80
04:50	84.50
06:01	96.80
07:01	88.80
08:01	85.40
09:01	48.10
11:01	22.70
13:01	17.20
15:01	17.20
17:01	22.30
19:01	23.30
21:01	23.60

Zvýraznění špičky

Obrázek 4: Průměrná zaplněnost v reálných podmínkách

V obrázku 3 je vidět, že zaplněnost vlaků v reálných podmínkách je mimo špičku nedostatečná, tedy je provoz vlaku finančně nevýhodný. Průměrná zaplněnost ve špičce mezi všemi dny je: 87,8 %, průměrná zaplněnost mimo špičku mezi všemi dny je: 24,28 %. Po konzultaci s panem Krčmou jsme byli obeznámeni, že je model v pořádku. Je totiž jasné, že ne všechny vlaky budou zaplněny, i přesto však je nutné vlaky dostat z konečné stanice do depa a jejich provoz tak může být finančně nevýhodný. Jelikož jsou ale ČD státním dopravcem, jsou povinni provozovat místy i značně nevýhodné trasy, protože jsou povinni vést dané tratě v určitý interval.

## 5.4 Více vlaků ve špičce

Druhý experiment jsme věnovali možnosti vylepšení stávajících spojů, respektive zvýšení počtu vlaků ve špičce. Modelujeme pouze eventualitu pro vlaky ve špičce. Vlaky mimo špičku jsou finančně nevýhodné i v reálném modelu a nemá tak smysl přidávat další spoje.

Každý jeden cyklus denní špičky je průměrem z měsíční simulace, celkově tedy experiment trval čtvrt roku čímž jsme nasbírali dostatečné množství dat pro analýzu.

Jak můžete vidět na Obrázku 4, přidáním jednoho spoje navíc jsme docílili toho, že vlaky jezdí častěji. Na druhou stranu ovšem za určitých konstelací nejsou zaplněny alespoň ze 70 %, nesplňují tedy podmínku ČD. Přihlédneme-li k faktu, že většina denně vypouštěných spojů je ztrátová, lze předpokládat že přidávat další vlak který má velkou pravděpodobnost finanční ztrátovosti není nejlepší nápad a **tento experiment dokazuje, že rozložení souprav ve špičce je téměř ideální.**

Čas	Průměrná zaplněnost (%)
04:50	72.1
06:01	100
06:50	71
07:39	80.6
08:28	61.2
04:50	79.60
06:01	94.40
06:50	57.90
07:39	71.80
08:28	55.80
04:50	78.3
06:01	100
06:50	80
07:39	66.6
08:28	43.4
Zvýraznění špičky	

Obrázek 5: Přidání jedné vlakové soupravy navíc do špičky

## 5.5 Snížení intervalů vlaků ve špičce

Posledním experimentem jsme se snažili vylepšit stávající systém výjezdů souprav ve špičce. Po důkladné analýze výsledků zjistili, že zmenšení rozestupů vlaků ve špičce (při zachování stávajícího počtu souprav) by vedlo pouze k tomu, že by byly některé spoje vytížené na 100 % na úkor ostatních, které by strádaly. Tímto experimentem se nám znovu potvrdilo že aktuální rozložení je ideální.

## 5.6 Závěr experimentů

Bylo provedeno několik sad experimentů, 3 sady se zjištěním efektivity vlaků s aktuálním počtem cestujících, bylo provedeno nespočet kalibračních a validačních testů modelu, které musely ověřit validitu modelu. Každá sada experimentů byla provedena 30x po 30 dnech. Experimentováním jsme

zjistili, že za stávajících podmínek není možné rozšířit počet vlaků ve špičce a už vůbec ne mimo špičku. Šlo by však dosáhnout navýšení počtu vlaků a zároveň zaručit jejich profitabilitu na trati pouze za předpokladu, že by v jednom z měst, které byly využity k simulaci došlo k nárůstu populace, ať už stavbou sídliště, nebo zvýšením pracovních míst v oblasti, které by přilákaly cestující z okolních vesnic. Z pozorování je také jasné, že optimalizace na trati je i nyní možná, za předpokladu, že provozovatel tratě bude schopen upravovat počet vagonů u jednotlivých vlaků. Pokud by ve špičce vyjížděly vlaky s více než třemi vagony a naopak v nešpičce vyjížděly vlaky s méně než 3 vagony, zaplněnost vlaků by byla mnohem vyšší, náklady by se razantně snížily pro vlaky mimo špičku a výnosnost vlaků v aktuálním stavu ve špičce by se také zvýšila.

Se simulačním modelem lze dále experimentovat, lze provádět další testy, které by mohly objevit profitabilitu s více než 5 vlaky za předpokladu obrovského nárůstu populace (cestujících). Dozajista lze i provádět další optimalizující a jiné experimenty nad modelem.

## 6. Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V rámci projektu do předmětu Modelování a Simulace vznikl nástroj umožňující simulující provoz na trati Veselí nad Moravou – Brno, model sám o sobě lze bezproblémově rozšířit a použít nad jinou tratí, s jiným počtem cestujících a simulovat/modelovat zde profitabilitu vlaků.

Jak již bylo shrnuto v závěrech experimentů, za aktuálních podmínek není doporučeno provést nasazení dalšího vlaku na trati, je však doporučeno optimalizovat počet vagonů, které provozovatel tratě vypravuje. Dozajista by bylo vhodné zvýšit počet vagonů ve špičce a snížit počet vagonů mimo špičku, což by rovnoměrně zvýšilo profitabilitu všech vlaků na dané trati.

Pro provozovatele tratě (ČD) by bylo dozajista nejlepším řešením některý z neprofitabilních vlaků odebrat, to mu bohužel ale jakožto národnímu dopravci umožněno nejspíše nebude.

## 7. Reference

[1] IDS JMK - Integrovaný dopravní systém JMK - jízdní řády Brno a Jihomoravský kraj - oficiální stránky. *IDS JMK - Integrovaný dopravní systém JMK - jízdní řády Brno a Jihomoravský kraj - oficiální stránky* [online]. Dostupné z: <http://www.kordis.cz>

[2] Petr Peringer, Martin Hrubý. Modelování a simulace. <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS-4.pdf>. [Online; verze z 172 10. 2017]

[3] Petr Peringer. Simlib - simulační knihovna pro c++. <http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>. [Online; navštíveno 16.11.2017]

[4] cplusplus.com - The C++ Resources Network. *cplusplus.com - The C++ Resources Network* [online]. Copyright © cplusplus.com, 2000 [cit. 06.12.2017]. Dostupné z: <http://www.cplusplus.com/> [Online; navštíveno 16.11.2017]