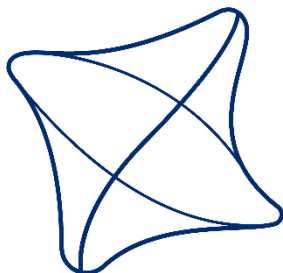


Žilinská univerzita v Žiline  
Fakulta riadenia a informatiky



# Semestrálna práca S2

Diskrétna simulácia

**Bc. Dominik Ježík**

2025

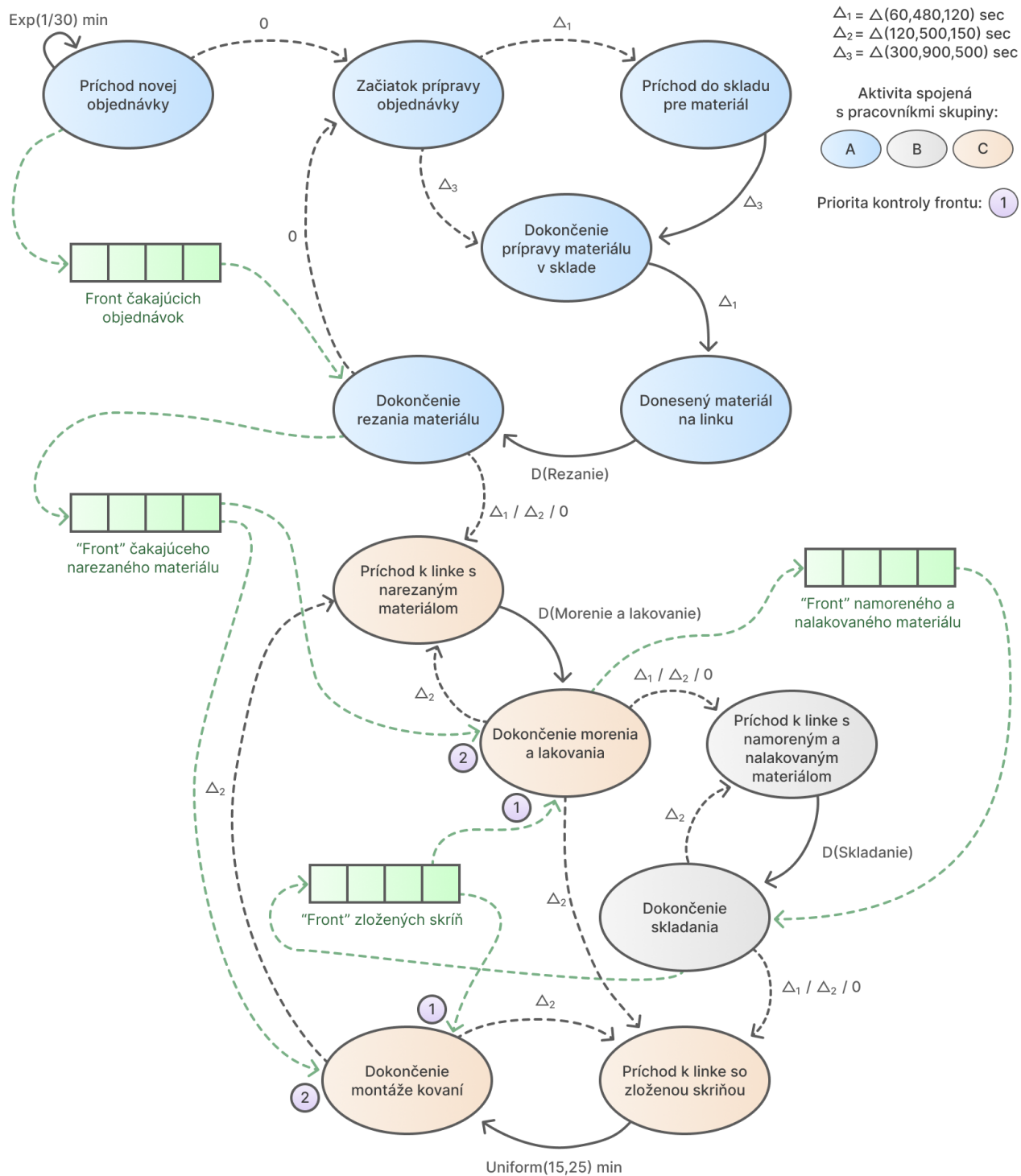


## Obsah

<b>1 Udalostný diagram .....</b>	<b>3</b>
1.1 Príchod novej objednávky (NewOrderArrival) .....	4
1.2 Začiatok prípravy objednávky (StartOfOrderPreparation) .....	4
1.3 Príchod do skladu pre materiál (ArrivalAtWarehouseForMaterial) .....	5
1.4 Dokončenie prípravy materiálu v sklade (MaterialPreparationCompleted) .....	5
1.5 Donesený materiál na linku (MaterialDeliveredToLine) .....	5
1.6 Dokončenie rezania materiálu (MaterialCuttingCompleted) .....	6
1.7 Príchod k linke s narezaným materiálom (ArrivalToLineWithCutMaterial) .....	6
1.8 Dokončenie morenia a lakovania (MaterialVarnishingCompleted) .....	7
1.9 Príchod k linke s namoreným a nalakovaným materiálom (ArrivalToLineWithVarnishedMaterial) .....	8
1.10 Dokončenie skladania (FurnitureFoldingCompleted) .....	8
1.11 Príchod k linke so zloženou skriňou (ArrivalToLineWithFoldedCloset) .....	9
1.12 Dokončenie montáže kovaní (AssemblyOfFittingsCompleted) .....	9
<b>2 Architektúra aplikácie .....</b>	<b>10</b>
<b>3 Vyhodnotenie simulačných experimentov .....</b>	<b>12</b>
3.1 Experiment s konfiguráciou 1, 1, 1 .....	13
3.2 Séria experimentov s konfiguráciami $a$ , 1, 1 .....	14
3.3 Séria experimentov s konfiguráciami 2, 1, $c$ .....	18
3.4 Séria experimentov s konfiguráciami 2, $b$ , 18 .....	23
3.5 Séria experimentov v okolí konfigurácie 2, 2, 18 .....	25
3.6 Záver vyhodnotenia simulačných experimentov .....	27



## 1 Udalostný diagram





### 1.1 Príchod novej objednávky (NewOrderArrival)

Udalosť predstavuje príchod novej objednávky do systému. Vygenerujeme typ nábytku v objednávke podľa pravdepodobností:

Typ nábytku	Pravdepodobnosť vygenerovania
Stôl	50%
Stolička	15%
Skriňa	35%

Objednávku zaradíme do zoznamu všetkých objednávok. Pokúsime sa získať voľného pracovníka zo skupina A. Pokiaľ nemáme k dispozícii voľného pracovníka, zaradíme objednávku do frontu čakajúcich objednávok. Pokiaľ máme k dispozícii voľného pracovníka, priradíme mu danú objednávku a naplánujeme pomocnú udalosť **začiatok prípravy objednávky** do ktorej pripojíme pracovník, a ktorá sa naplánuje na okamžité vykonanie.

Na záver naplánujeme ďalší **príchod novej objednávky** do systému, ktorá sa vykoná za čas určený exponenciálnym rozdelením pravdepodobnosti s parametrom  $\lambda = 30$  minút.

### 1.2 Začiatok prípravy objednávky (StartOfOrderPreparation)

Udalosť skontroluje polohu prideleného pracovníka objednávke. Pokiaľ sa pracovník už nachádza v sklade, môže začať vykonávať prípravu materiálu v sklade – preto naplánujeme udalosť **dokončenia prípravy materiálu v sklade**, ktorá sa vykoná za čas určený trojuholníkovým rozdelením pravdepodobnosti s parametrami 300, 900, 500 sekúnd.

V prípade, že sa pracovník ešte nenachádza v sklade (je k dispozícii na výrobnéj linke), musí sa najskôr premiestniť do skladu – naplánujeme udalosť **príchod do skladu pre materiál**, ktorá sa vykoná za čas určený trojuholníkovým rozdelením pravdepodobnosti s parametrami 60,480,120 sekúnd.



### 1.3 Príchod do skladu pre materiál (ArrivalAtWarehouseForMaterial)

Udalosť nastane, keď sa pracovník premiestni do skladu – v tomto momente môže začať príprava materiálu, preto naplánujem udalosť **dokončenia prípravy materiálu v sklade**, ktorá sa vykoná za čas určený trojuholníkovým rozdelením pravdepodobnosti s parametrami 300, 900, 500 sekúnd.

### 1.4 Dokončenie prípravy materiálu v sklade (MaterialPreparationCompleted)

Pracovník dokončil prípravu materiálu v sklade, preto sa začne presúvať s materiálom k výrobným linkám – naplánujeme udalosť **donesený materiál na linku**, ktorá sa vykoná za čas určený trojuholníkovým rozdelením pravdepodobnosti ( $\Delta_1$ ) s parametrami 60,480,120 sekúnd.

### 1.5 Donesený materiál na linku (MaterialDeliveredToLine)

Pracovník prišiel k linkám s pripraveným materiálom. Teraz si zo simulácie vyžiadame voľnú pracovnú linku (čiže prvá voľná linka v poradí) a obsadíme linku pracovníkom a objednávkou. Daný pracovník môže začať vykonávať prvý technologický krok s materiálom – rezanie, ktorého doba trvania je daná distribúciou  $D(\text{Rezanie})$  závislá od typu nábytku, a ktorá využíva spojité rovnomerné rozdelenia:

Typ nábytku	Doba trvania v minútach
Stôl	$U = <10, 25); p=0.6$
	$U = <25, 50); p=0.4$
Stolička	$U = <12,16)$
Skriňa	$U = <15,80)$

Naplánujeme udalosť **dokončenie rezania materiálu** po ubehnutí doby rezania materiálu.



## 1.6 Dokončenie rezania materiálu (MaterialCuttingCompleted)

Po dokončení rezania materiálu, odoberieme objednávku od daného pracovníka, ktorý rezania vykonával (pracovník skupiny A). Pokúsime sa získať voľného pracovníka zo skupiny C pre ďalšie spracovanie. Pokiaľ pracovník nie je k dispozícii, objednávka je zaradená do frontu čakajúceho narezaného materiálu.

Pokiaľ je k dispozícii pracovník skupiny C, priradíme mu túto objednávku. Následne naplánujeme udalosť **príchod k linke s narezaným materiálom**, pričom čas kedy sa pracovník k tejto linke premiestni závisí od jeho aktuálnej polohy – môžu nastať 3 situácie. Buď sa pracovník už na danej linke nachádzal (skončil tu predchádzajúcu prácu a nebola mu priradená žiadna iná objednávka na inej linke) – presun vtedy trvá 0 sekúnd. Pracovník sa môže nachádzať v sklade preto udalosť naplánujeme na čas presunu medzi skladoom a linkou ( $\Delta_1$ ). Posledná možnosť je, že pracovník sa nachádza na inej linke, vtedy plánujeme udalosť na čas presunu medzi jednotlivými linkami trojuholníkovým rozdelením pravdepodobnosti ( $\Delta_2$ ) s parametrami 120, 500, 150 sekúnd.

Na záver pre pracovníka zo skupiny A, ktorý vykonával rezanie a teraz je voľný, skontrolujeme, či sa nachádza nejaká objednávka vo fronte čakajúcich objednávok pre spracovanie. Pokiaľ áno, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **začiatok prípravy objednávky** s okamžitým vykonaním. Ak je front prázdny, pracovník nemá žiadnu prácu a čaká pri aktuálnej linke.

## 1.7 Príchod k linke s narezaným materiálom (ArrivalToLineWithCutMaterial)

Pracovník skupiny C sa dostavil k linke s narezaným materiálom. Priradíme pracovníka k linke a pracovník môže začať vykonávať druhý technologický krok – morenie a lakovanie. Doba trvania je daná distribúciou D(Morenie a lakovanie) závislá od typu nábytku, a ktorá využíva spojité rovnomerné rozdelenia:

Typ nábytku	Doba trvania v minútach
Stôl	$U = <200, 610)$
Stolička	$U = <210, 540)$
Skriňa	$U = <600, 700)$



Naplánujeme udalosť **dokončenie morenia a lakovania materiálu** po ubehnutí doby morenia a lakovania materiálu.

### 1.8 Dokončenie morenia a lakovania (MaterialVarnishingCompleted)

Po dokončení morenia a lakovania, odoberieme objednávku od daného pracovníka, ktorý činnosť vykonával (pracovník skupiny C). Pokúsime sa získať voľného pracovníka zo skupiny B pre ďalšie spracovanie. Pokiaľ pracovník nie je k dispozícii, objednávka je zaradená do frontu namoreného a nalakovaného materiálu.

Pokiaľ je k dispozícii pracovník skupiny B, pridelieme mu túto objednávku. Následne naplánujeme udalosť **príchod k linke s namoreným a nalakovaným materiálom**, pričom čas kedy sa pracovník k tejto linke premiestni závisí od jeho aktuálnej polohy – môžu nastať 3 situácie. Buď sa pracovník už na danej linke nachádzal (skončil tu predchádzajúcu prácu a nebola mu priradená žiadna iná objednávka na inej linke) – presun vtedy trvá 0 sekúnd. Pracovník sa môže nachádzať v sklade preto udalosť naplánujeme na čas presunu medzi skladoom a linkou ( $\Delta_1$ ). Posledná možnosť je, že pracovník sa nachádza na inej linke, vtedy plánujeme udalosť na čas presunu medzi jednotlivými linkami ( $\Delta_2$ ).

Následne pre voľného pracovníka zo skupiny C skontrolujeme najskôr front čakajúcich zložených skriň. Ak sa v ňom nachádza objednávka, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **príchod k linke so zloženou skriňou**. Vykonanie je dané časom presunu medzi jednotlivými linkami ( $\Delta_2$ ). Pokiaľ je front prázdny skontrolujeme front čakajúceho narezaného materiálu. Ak sa v ňom nachádza objednávka, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **príchod k linke s nazeraným materiálom**. Vykonanie je rovnako dané pomocou ( $\Delta_2$ ). Ak sú oba fronty prázdne, pracovník nemá žiadnu prácu a čaká pri aktuálnej linke.



## 1.9 Príchod k linke s namoreným a nalakovaným materiálom

### (ArrivalToLineWithVarnishedMaterial)

Pracovník skupiny B sa dostavil k linke s namoreným a nalakovaným materiálom. Priradíme pracovníka k linke a pracovník môže začať vykonávať tretí technologický krok – skladanie. Doba trvania je daná distribúciou  $D(\text{Skladanie})$  závislá od typu nábytku, a ktorá využíva spojité rovnomerné rozdelenia:

Typ nábytku	Doba trvania v minútach
Stôl	$U = <30, 60)$
Stolička	$U = <14, 25)$
Skriňa	$U = <35, 75)$

Naplánujeme udalosť **dokončenie skladania** po ubehnutí doby skladania.

## 1.10 Dokončenie skladania (FurnitureFoldingCompleted)

Po dokončení skladania, odoberieme objednávku od daného pracovníka, ktorý činnosť vykonával (pracovník skupiny B). Pokiaľ typ nábytku objednávky nebola skriňa, objednávka je ukončená. Do štatistiky pre priemerný čas spracovania objednávky pridáme novú hodnotu – rozdiel aktuálneho simulačného času a času príchodu danej objednávky do systému. Objednávku odoberieme z linky.

Pokiaľ je ale typ nábytku skriňa, pokúsime sa získať voľného pracovníka zo skupiny C pre ďalšie spracovanie. Pokiaľ pracovník nie je k dispozícii, objednávka je zaradená do frontu zložených skríň.

Pokiaľ je k dispozícii pracovník skupiny C, pridáme mu túto objednávku. Následne naplánujeme udalosť **príchod k linke s so zloženou skriňou**, pričom čas kedy sa pracovník k tejto linke premiestni závisí od jeho aktuálnej polohy – môžu nastať 3 situácie. Buď sa pracovník už na danej linke nachádzal (skončil tu predchádzajúcu prácu a nebola mu priradená žiadna iná objednávka na inej linke) – presun vtedy trvá 0 sekúnd. Pracovník sa môže nachádzať v sklade preto udalosť naplánujeme na čas presunu medzi skladoom a linkou ( $\Delta_1$ ). Posledná možnosť je, že pracovník sa nachádza na inej linke, vtedy plánujeme udalosť na čas presunu medzi jednotlivými linkami ( $\Delta_2$ ).





Na záver pre pracovníka zo skupiny B, ktorý vykonával skladanie a teraz je voľný, skontrolujeme, či sa nachádza nejaká objednávka vo fronte namoreného a nalakovaného materiálu. Pokiaľ áno, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **príchod k linke s namoreným a nalakovaným materiálom**. Vykonanie je dané časom presunu medzi jednotlivými linkami ( $\Delta_2$ ). Ak je front prázdny, pracovník nemá žiadnu prácu a čaká pri aktuálnej linke.

### 1.11 Príchod k linke so zloženou skriňou (ArrivalToLineWithFoldedCloset)

Pracovník skupiny C sa dostavil k linke so zloženou skriňou. Priradíme pracovníka k linke a pracovník môže začať vykonávať posledný technologický krok – montáž kovaní. Doba trvania je daná rovnomerným spojitým rozdelením pravdepodobnosti  $U = <15, 25)$  minút. Naplánujeme udalosť **dokončenie montáže kovaní** po ubehnutí doby montáže.

### 1.12 Dokončenie montáže kovaní (AssemblyOfFittingsCompleted)

Po dokončení montáže kovaní, odoberieme objednávku od daného pracovníka, ktorý činnosť vykonával (pracovník skupiny C). Objednávka je ukončená. Do štatistiky pre priemerný čas spracovania objednávky pridáme novú hodnotu – rozdiel aktuálneho simulačného času a času príchodu danej objednávky do systému. Objednávku odoberieme z linky.

Následne pre voľného pracovníka zo skupiny C skontrolujeme najskôr front čakajúcich zložených skríň. Ak sa v ňom nachádza objednávka, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **príchod k linke so zloženou skriňou**. Vykonanie je dané časom presunu medzi jednotlivými linkami ( $\Delta_2$ ). Pokiaľ je front prázdny skontrolujeme front čakajúceho narezaného materiálu. Ak sa v ňom nachádza objednávka, vyberieme ju a naplánujeme udalosť **príchod k linke s nazeraným materiálom**. Vykonanie je rovnako dané pomocou ( $\Delta_2$ ). Ak sú oba fronty prázdne, pracovník nemá žiadnu prácu a čaká pri aktuálnej linke.



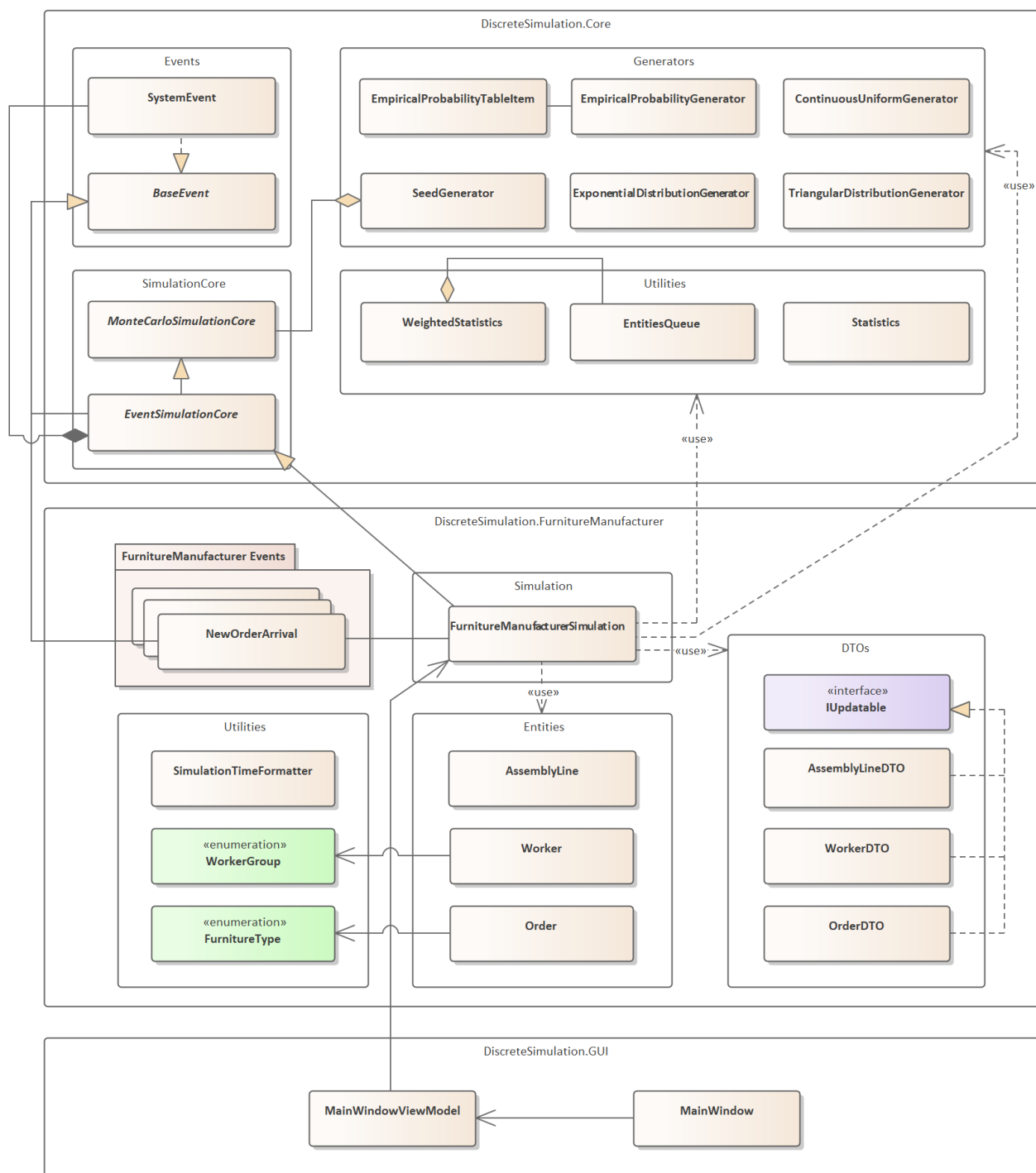
## 2 Architektúra aplikácie

Architektúra aplikácie je rozdelená na 3 vrstvy – vrstva všeobecného simulačného jadra (*DiscreteSimulation.Core*), vrstva konkrétnej simulácie prevádzky výrobcu nábytku (*DiscreteSimulation.FurnitureManufacturer*) a vrstva GUI (*DiscreteSimulation.GUI*).

Vo vrstve všeobecného simulačného jadra sa nachádzajú triedy simulačného jadra *MonteCarloSimulationCore* a *EventSimulationCore*. V *EventSimulationCore* je umiestnený hlavný algoritmus metódy plánovania udalostí spolu s kalendárom udalostí. Tiež je tu C# event – *SimulationStateChanged*, ktorý sa vykoná po spracovaní každej z udalostí z kalendára udalostí. Trieda jadra používa systémovú udalosť a pre všetky udalosti poskytuje *BaseEvent*. Vrstva pre programátora poskytuje ešte generátory pseudonáhodných čísel a pomocné triedy – *Statistics*, *WeightedStatistics* a *EntityQueue*, ktorá zapuzdruje výpočet priemernej dĺžky frontu.

Vrstva konkrétnej simulácie prevádzky výrobcu nábytku je hlavná trieda *FurnitureManufacturerSimulation*, ktorá obsahuje inštancie generátorov, štatistiky, fronty, vstupné parametre a entity, ktoré vystupujú v simulácií. V tejto vrstve sa nachádzajú konkrétne udalosti ako triedy, entity systému, pomocné triedy a DTO triedy pre mapovanie údajov entít na *Data Transfer Object* triedy, ktoré sa posielajú na GUI. Tieto DTO triedy navyše implementujú rozhranie *IUpdatable*, ktoré využívame na GUI pre jednoduchšiu synchronizáciu údajov v tabuľkách.

Vrstva používateľského rozhrania je realizovaná cez MVVM architektúru, kde hlavné okno *MainWindow* prepája svoje prvky s triedou *MainWindowViewModel*. Táto trieda obsahuje inštanciu simulácie. GUI je implementované pomocou frameworku Avalonia.





### 3 Vyhodnotenie simulačných experimentov

So simulačným modelom bolo potrebné vykonať experimenty tak, aby sme boli schopný odporučiť minimálny počet stolárov pre každú skupinu, pri ktorom priemerný pracovný čas vybavenia objednávky nebude vyšší ako 16 hodín. Pre realizáciu jednotlivých experimentov máme k dispozícii 3 parametre simulácie – počet jednotlivých pracovníkov v každej skupine  $\langle a, b, c \rangle$ .

Pre pohodlné nájdenie riešenia bol použitý vlastný analyzátor konfigurácií, ktorý postupne spúšťal simuláciu pre zadaný zoznam parametrov, pre každú konfiguráciu **1 000 replikácií**. Z každej série konfigurácií sme vybrali tú najvhodnejšiu a na nej sme pustili **10 000 replikácií**. Po spustení všetkých konfigurácií, boli výsledky vypísané do csv súboru. Začali sme hľadať konfiguráciu zvolením najnižšieho možného počtu pracovníkov, pričom postupne sme zvyšovali počty pracovníkov, až kým bola dosiahnutá podmienka pre pracovný čas vybavenia objednávky.

**Poznámka:** V udalostiach, kde potrebujeme voľného pracovníka pre začatie vykonávania práce objednávky, ktorá sa nachádza na niektorej z liniek je v prípade viacerých voľných pracovníkov viacero spôsobov ako zvoliť pracovníka. Keďže v zadaní nebol presne špecifikovaný spôsob výberu, zvolili sme stratégiu, ktorou sa snažíme čo “najvernejšie modelovať realitu”:

- Prioritne volíme takého voľného pracovníka, ktorý sa už na danej linke s objednávkou nachádza – čas jeho presunu k linke je tým pádom rovný 0.
- Ak nie je takýto pracovník voľný, vyberáme voľného pracovníka, ktorý sa nachádza v sklade – v sklade sa pracovníci nachádzajú iba na začiatku simulácie.
- Ako poslednú možnosť vyberáme voľného pracovníka, ktorý sa nachádza na niektorej z iných liniek.

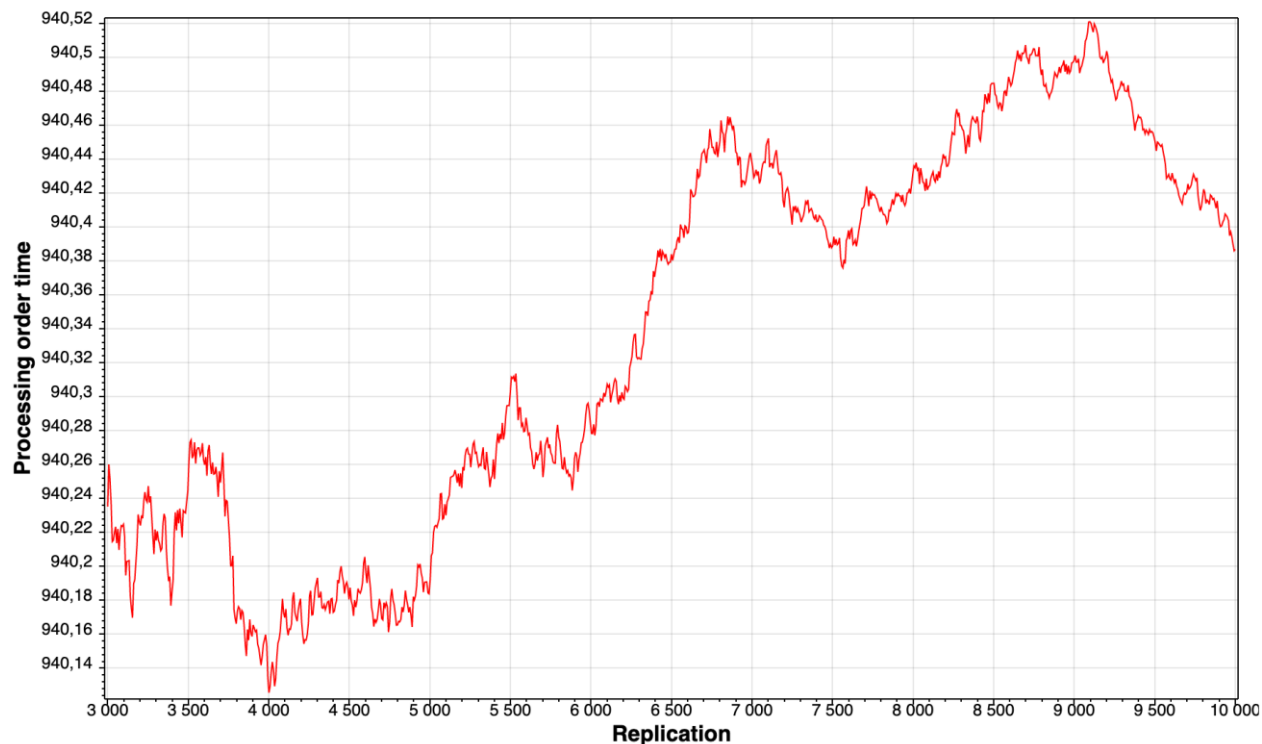
Stredná hodnota  $E(\Delta_1)$  náhodnej premennej  $\Delta_1 \sim \text{Triangular}(50, 480, 120)$ , ktorou modelujeme čas presunu zo skladu na linku je menšia, ako stredná hodnota  $E(\Delta_2)$  náhodnej premennej  $\Delta_2 \sim \text{Triangular}(120, 500, 150)$ , ktorou modelujeme čas presunu medzi dvoma linkami. Čiže touto stratégiou navyše minimalizujeme čas presunov.



### 3.1 Experiment s konfiguráciou $\langle 1, 1, 1 \rangle$

Počiatočná konfigurácia  $\langle 1, 1, 1 \rangle$  (1 pracovník v každej skupinu) vrátila nasledujúce výsledky simulácie:

$\langle 1, 1, 1 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Čas vybavenia objednávky	940,39	$\langle 940,13 ; 940,65 \rangle$	hodín
<b>Čakajúce objednávky (1. front)</b>	<b>754,77</b>	<b><math>\langle 754,03 ; 755,51 \rangle</math></b>	<b>počet</b>
<b>Čakajúci narezaný materiál (2. front)</b>	<b>1117,34</b>	<b><math>\langle 1117,13 ; 1117,55 \rangle</math></b>	<b>počet</b>
Čakajúci nalakovaný materiál (3. front)	0,00	$\langle 0,00 ; 0,00 \rangle$	počet
Čakajúce zložené skrine (4. front)	0,31	$\langle 0,31 ; 0,31 \rangle$	počet
Priemerný čas čakania 1. front	377,09	$\langle 376,78 ; 377,39 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 2. front	896,71	$\langle 896,49 ; 896,94 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 3. front	0,00	$\langle 0,00 ; 0,00 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 4. front	7,32	$\langle 7,31 ; 7,33 \rangle$	hodín
Záťaž pracovníka A	99,98	$\langle 99,98 ; 99,98 \rangle$	%
Záťaž pracovníka B	9,76	$\langle 9,76 ; 9,77 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C	99,96	$\langle 99,96 ; 99,96 \rangle$	%



*Graf ustáľovania priemerného času vybavenia objednávky v hodinách*



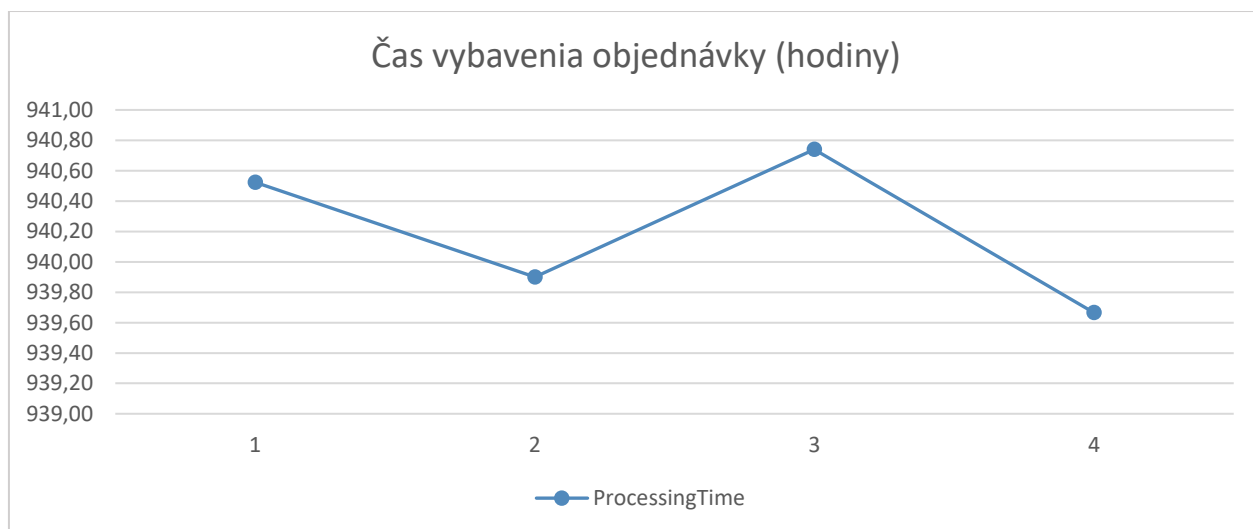
Čas vybavenia objednávky 940,39 je veľmi vzdialená hodnota od povoleného maxima 16 hodín. Na základe štatistík je vidieť, že problém s nízkym počtom pracovníkov sa prejavil v 1. fronte – front čakajúcich objednávok pre začatie spracovania obsahuje 754,77 objednávok. Tento front obsluhuje iba 1 pracovník zo skupiny A, ktorého vyťaženie je prakticky 100%.

Druhý problém sa prejavil v 2. fronte – front čakajúceho narezaného materiálu obsahuje 1117,34 objednávok. Tento front obsluhuje tiež iba 1 pracovník zo skupiny C, ktorého vyťaženie je takisto takmer 100%.

### 3.2 Séria experimentov s konfiguráciami $\langle a, 1, 1 \rangle$

Pre túto sériu experimentov sme spustili analyzátor pre prejdienie viacerých riešení, pričom sme zafixovali hodnoty premenných  $b = 1$  a  $c = 1$  a menili sme iba hodnotu premennej  $a$ . Vykonal sme experimenty pre  $a = 1, 2, 3, 4$ . Namerané časy vybavenia objednávky v hodinách pre  $a = 1, 2, 3, 4$  sú uvedené v tabuľke a grafe:

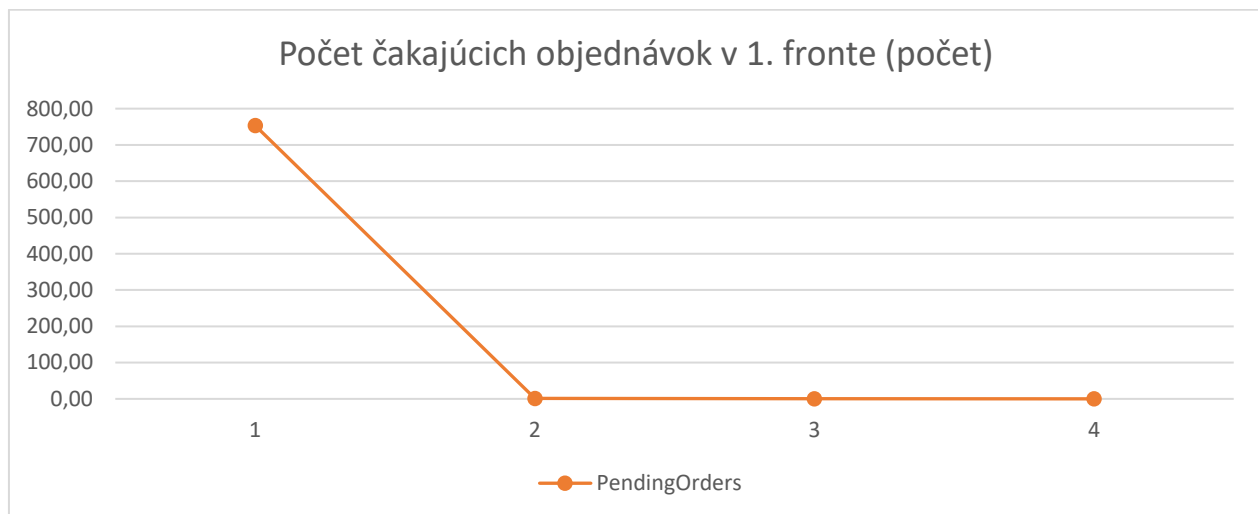
	Čas vybavenia objednávky (hodiny)	95% Interval spoľahlivosti
$\langle 1, 1, 1 \rangle$	940,52	<939,68 ; 941,37>
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	939,90	<939,06 ; 940,74>
$\langle 3, 1, 1 \rangle$	940,74	<939,92 ; 941,56>
$\langle 4, 1, 1 \rangle$	939,67	<938,86 ; 940,47>





Je vidieť, že zvýšenie počtu pracovníkov skupiny A **neovplyvnil** čas vybavenia objednávky pri fixovaní ostatných parametrov. Drasticky sa ale znížil počet čakajúcich objednávok v 1. fronte objednávok pre spracovanie, pričom **stačilo iba 2 pracovníkov v skupine A**:

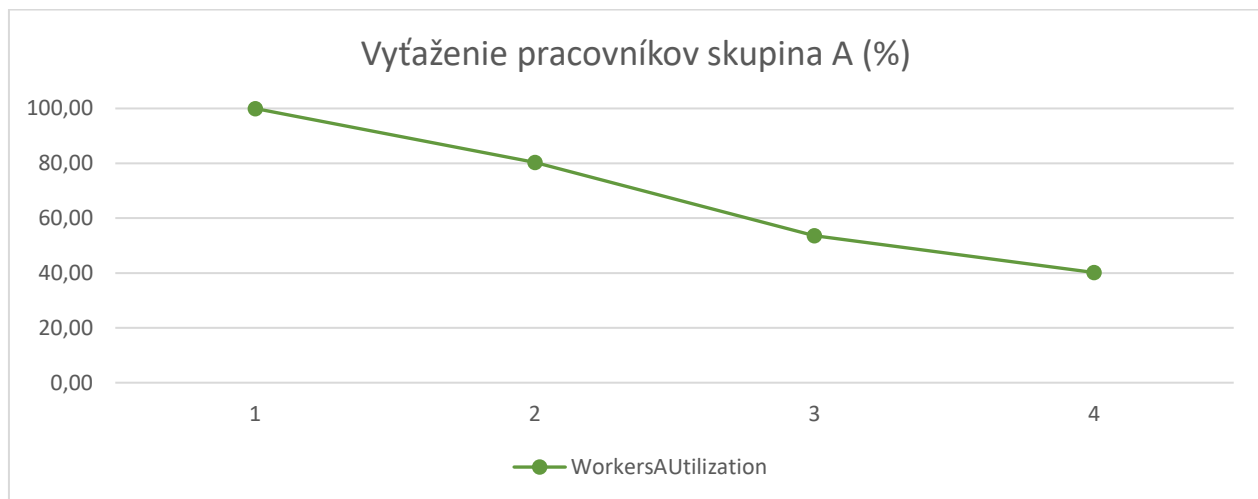
	Počet čakajúcich objednávok v 1. fronte (počet)	95% Interval spoľahlivosti
$\langle 1, 1, 1 \rangle$	753,53	$\langle 751,15 ; 755,91 \rangle$
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	<b>1,72</b>	<b><math>\langle 1,7 ; 1,73 \rangle</math></b>
$\langle 3, 1, 1 \rangle$	0,20	$\langle 0,2 ; 0,2 \rangle$
$\langle 4, 1, 1 \rangle$	0,04	$\langle 0,04 ; 0,04 \rangle$





Tiež sa znížilo vyťaženie pracovníkov skupiny A z takmer 100% na približne 80%:

	Vyťaženie pracovníkov skupiny A (%)	95% Interval spoľahlivosti
$\langle 1, 1, 1 \rangle$	99,98	$\langle 99,98 ; 99,98 \rangle$
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	<b>80,39</b>	<b><math>\langle 80,3 ; 80,47 \rangle</math></b>
$\langle 3, 1, 1 \rangle$	53,66	$\langle 53,61 ; 53,72 \rangle$
$\langle 4, 1, 1 \rangle$	40,18	$\langle 40,14 ; 40,22 \rangle$



Problém veľkého počtu objednávok v 2. fronte čakajúceho narezaného materiálu sa oproti prvému experimentu ešte zvýšil.

Z tejto série vyberieme konfiguráciu  $\langle 2, 1, 1 \rangle$ , na základe ktorej vykonáme ďalšie experimenty.

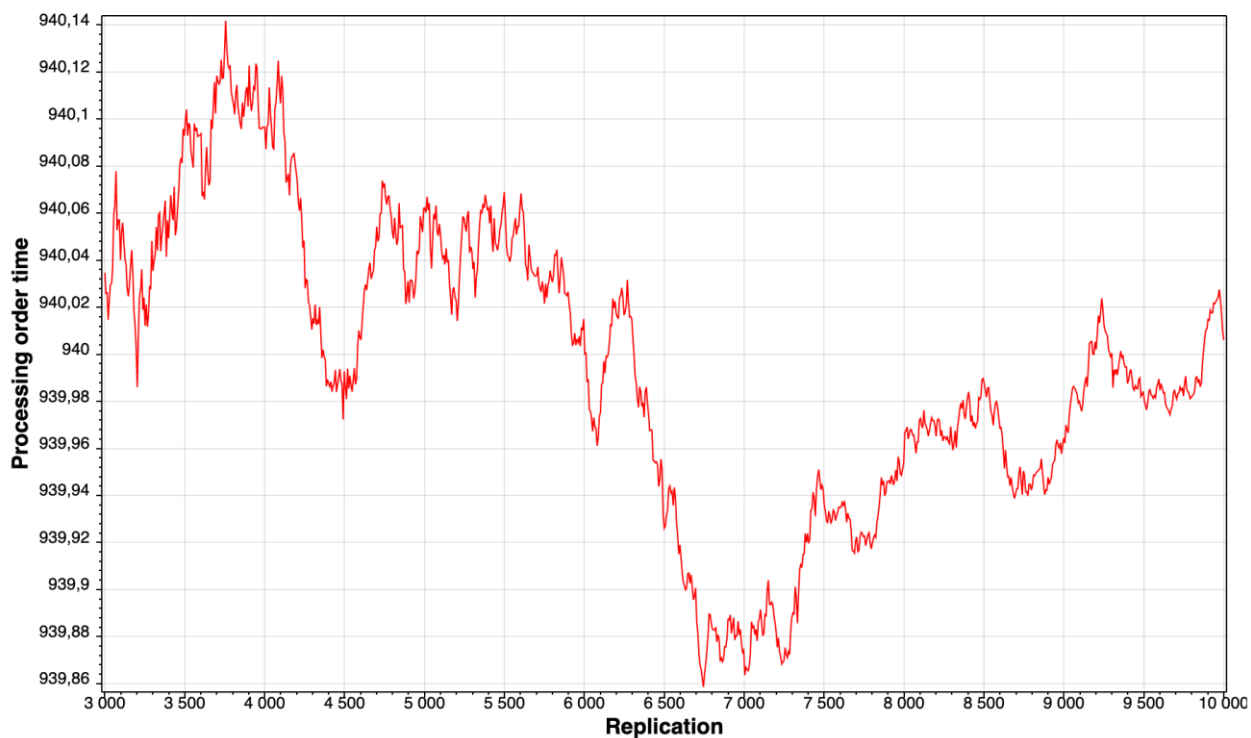
Štatistiky tejto konfigurácie sú uvedené v tabuľkách:





$\langle 2, 1, 1 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Čas vybavenia objednávky	940,01	<939,74 ; 940,27>	hodín
Čakajúce objednávky (1. front)	1,70	<1,70 ; 1,71>	počet
Čakajúci narezaný materiál (2. front)	1869,05	<1868,34 ; 1869,75>	počet
Čakajúci nalakovaný materiál (3. front)	0,00	<0,00 ; 0,00>	počet
Čakajúce zložené skrine (4. front)	0,31	<0,31 ; 0,31>	počet
Priemerný čas čakania 1. front	0,85	<0,85 ; 0,85>	hodín
Priemerný čas čakania 2. front	932,22	<931,96 ; 932,47>	hodín
Priemerný čas čakania 3. front	0,00	<0,00 ; 0,00>	hodín
Priemerný čas čakania 4. front	7,31	<7,30 ; 7,31>	hodín
Záťaž pracovníkov A	80,38	<80,36 ; 80,41>	%
Záťaž pracovníka B	9,77	<9,77 ; 9,78>	%
Záťaž pracovníka C	99,97	<99,97 ; 99,97>	%

$\langle 2, 1, 1 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Záťaž pracovníka A1	83,83	<83,81 ; 83,85>	%
Záťaž pracovníka A2	76,93	<76,90 ; 76,96>	%



Graf ustalaovania priemerného času vybavenia objednávky v hodinách

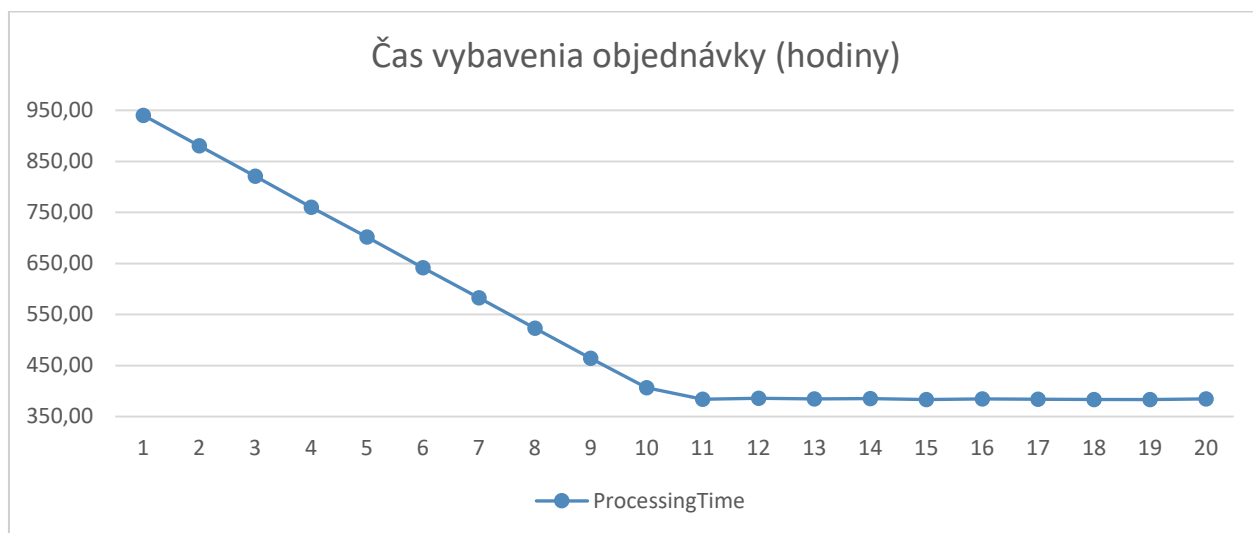


### 3.3 Séria experimentov s konfiguráciami $\langle 2, 1, c \rangle$

V tejto sérii experimentov sme spustili analyzátor pre prejsenie viacerých riešení, pričom sme zafixovali hodnoty premenných  $a = 2$  a  $b = 1$  a menili sme iba hodnotu premennej  $c$ . Vykonali sme experimenty pre  $c = 1, \dots, 20$ . Namerané časy vybavenia objednávky v hodinách pre  $c = 1, \dots, 20$  sú uvedené v tabuľke a grafe:

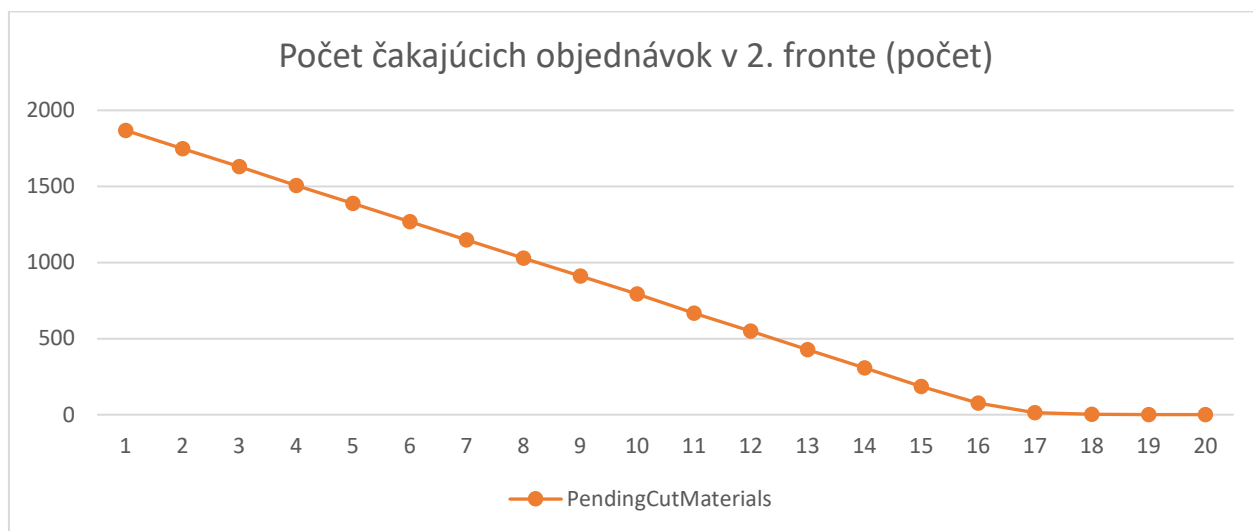
Čas vybavenia objednávky (hodiny)		95% Interval spoľahlivosti
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	940,35	$\langle 939,54 ; 941,17 \rangle$
$\langle 2, 1, 2 \rangle$	880,71	$\langle 880,03 ; 881,38 \rangle$
$\langle 2, 1, 3 \rangle$	820,84	$\langle 820,18 ; 821,49 \rangle$
$\langle 2, 1, 4 \rangle$	760,25	$\langle 759,57 ; 760,93 \rangle$
$\langle 2, 1, 5 \rangle$	701,64	$\langle 700,9 ; 702,38 \rangle$
$\langle 2, 1, 6 \rangle$	641,93	$\langle 641,18 ; 642,68 \rangle$
$\langle 2, 1, 7 \rangle$	582,45	$\langle 581,65 ; 583,25 \rangle$
$\langle 2, 1, 8 \rangle$	522,98	$\langle 522,1 ; 523,85 \rangle$
$\langle 2, 1, 9 \rangle$	464,14	$\langle 463,26 ; 465,03 \rangle$
$\langle 2, 1, 10 \rangle$	406,39	$\langle 405,47 ; 407,32 \rangle$
$\langle 2, 1, 11 \rangle$	<b>384,11</b>	<b><math>\langle 383,15 ; 385,07 \rangle</math></b>
$\langle 2, 1, 12 \rangle$	385,54	$\langle 384,61 ; 386,48 \rangle$
$\langle 2, 1, 13 \rangle$	384,88	$\langle 383,92 ; 385,84 \rangle$
$\langle 2, 1, 14 \rangle$	384,94	$\langle 384,01 ; 385,86 \rangle$
$\langle 2, 1, 15 \rangle$	383,57	$\langle 382,61 ; 384,52 \rangle$
$\langle 2, 1, 16 \rangle$	384,41	$\langle 383,46 ; 385,37 \rangle$
$\langle 2, 1, 17 \rangle$	384,15	$\langle 383,18 ; 385,11 \rangle$
$\langle 2, 1, 18 \rangle$	383,49	$\langle 382,55 ; 384,42 \rangle$
$\langle 2, 1, 19 \rangle$	383,50	$\langle 382,58 ; 384,42 \rangle$
$\langle 2, 1, 20 \rangle$	384,60	$\langle 383,61 ; 385,58 \rangle$

Zvýšenie počtu pracovníkov C významne ovplyvnil čas vybavenia objednávky. Čas lineárne klesal pri zvyšovaní  $c$  od 1 po 10. Pri **11. pracovníkovi** ostal čas približne rovnaký.



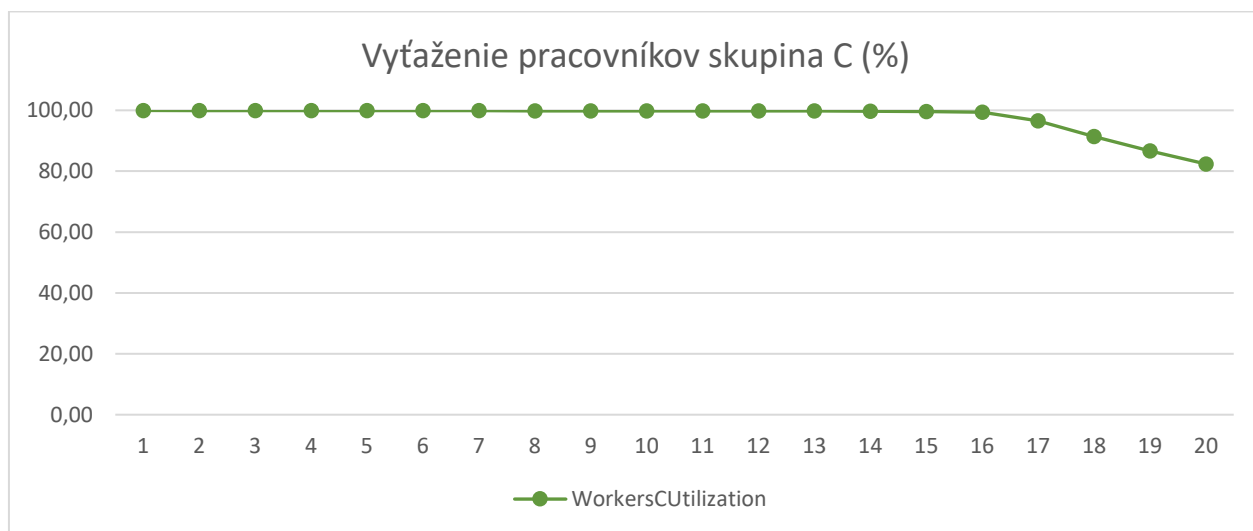
Zaujímavá je aj zmena počtu čakajúcich objednávok v 2. fronte (front čakajúceho narezaného materiálu), kde pri zvyšovaní c počet objednávok vo fronte tiež klesal, ale toto klesanie sa spomalilo až pri  $c = 17, 18$ .

Počet čakajúcich objednávok v 2. fronte (počet)		95% Interval spoľahlivosti
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	1868,36	$\langle 1866,05 ; 1870,67 \rangle$
$\langle 2, 1, 2 \rangle$	1748,25	$\langle 1746,03 ; 1750,46 \rangle$
$\langle 2, 1, 3 \rangle$	1630,62	$\langle 1628,27 ; 1632,96 \rangle$
$\langle 2, 1, 4 \rangle$	1505,72	$\langle 1503,44 ; 1507,99 \rangle$
$\langle 2, 1, 5 \rangle$	1389,50	$\langle 1387,2 ; 1391,79 \rangle$
$\langle 2, 1, 6 \rangle$	1269,59	$\langle 1267,36 ; 1271,82 \rangle$
$\langle 2, 1, 7 \rangle$	1148,59	$\langle 1146,32 ; 1150,85 \rangle$
$\langle 2, 1, 8 \rangle$	1028,91	$\langle 1026,56 ; 1031,26 \rangle$
$\langle 2, 1, 9 \rangle$	910,64	$\langle 908,32 ; 912,96 \rangle$
$\langle 2, 1, 10 \rangle$	793,18	$\langle 790,85 ; 795,51 \rangle$
$\langle 2, 1, 11 \rangle$	667,54	$\langle 665,23 ; 669,86 \rangle$
$\langle 2, 1, 12 \rangle$	550,14	$\langle 547,81 ; 552,47 \rangle$
$\langle 2, 1, 13 \rangle$	427,30	$\langle 424,9 ; 429,69 \rangle$
$\langle 2, 1, 14 \rangle$	307,58	$\langle 305,29 ; 309,88 \rangle$
$\langle 2, 1, 15 \rangle$	185,65	$\langle 183,36 ; 187,94 \rangle$
$\langle 2, 1, 16 \rangle$	75,41	$\langle 73,43 ; 77,39 \rangle$
$\langle 2, 1, 17 \rangle$	<b>12,77</b>	<b><math>\langle 12,25 ; 13,29 \rangle</math></b>
$\langle 2, 1, 18 \rangle$	<b>3,16</b>	<b><math>\langle 3,08 ; 3,25 \rangle</math></b>
$\langle 2, 1, 19 \rangle$	1,18	$\langle 1,15 ; 1,2 \rangle$
$\langle 2, 1, 20 \rangle$	0,47	$\langle 0,46 ; 0,48 \rangle$



Keď sa zameriame na vyťaženie pracovníkov skupiny C, je vidieť zmenu záťaže, ktorá je zo začiatku zvyšovania parametru  $c$  rovnaká, ale zmena záťaže prichádza práve pri konfiguráciách s parametrom  $c = 17, 18, 19, 20$ :

Vyťaženie pracovníkov skupiny C (%)		95% Interval spoľahlivosti
$\langle 2, 1, 1 \rangle$	99,97	$\langle 99,97 ; 99,97 \rangle$
$\langle 2, 1, 2 \rangle$	99,95	$\langle 99,95 ; 99,95 \rangle$
$\langle 2, 1, 3 \rangle$	99,94	$\langle 99,93 ; 99,94 \rangle$
$\langle 2, 1, 4 \rangle$	99,92	$\langle 99,92 ; 99,92 \rangle$
$\langle 2, 1, 5 \rangle$	99,91	$\langle 99,9 ; 99,91 \rangle$
$\langle 2, 1, 6 \rangle$	99,89	$\langle 99,89 ; 99,89 \rangle$
$\langle 2, 1, 7 \rangle$	99,88	$\langle 99,88 ; 99,88 \rangle$
$\langle 2, 1, 8 \rangle$	99,86	$\langle 99,86 ; 99,86 \rangle$
$\langle 2, 1, 9 \rangle$	99,85	$\langle 99,84 ; 99,85 \rangle$
$\langle 2, 1, 10 \rangle$	99,83	$\langle 99,83 ; 99,83 \rangle$
$\langle 2, 1, 11 \rangle$	99,81	$\langle 99,8 ; 99,81 \rangle$
$\langle 2, 1, 12 \rangle$	99,79	$\langle 99,78 ; 99,79 \rangle$
$\langle 2, 1, 13 \rangle$	99,76	$\langle 99,75 ; 99,76 \rangle$
$\langle 2, 1, 14 \rangle$	99,72	$\langle 99,72 ; 99,73 \rangle$
$\langle 2, 1, 15 \rangle$	99,65	$\langle 99,64 ; 99,66 \rangle$
$\langle 2, 1, 16 \rangle$	99,37	$\langle 99,34 ; 99,39 \rangle$
$\langle 2, 1, 17 \rangle$	96,56	$\langle 96,47 ; 96,65 \rangle$
$\langle 2, 1, 18 \rangle$	91,43	$\langle 91,34 ; 91,53 \rangle$
$\langle 2, 1, 19 \rangle$	86,66	$\langle 86,57 ; 86,75 \rangle$
$\langle 2, 1, 20 \rangle$	82,39	$\langle 82,3 ; 82,47 \rangle$

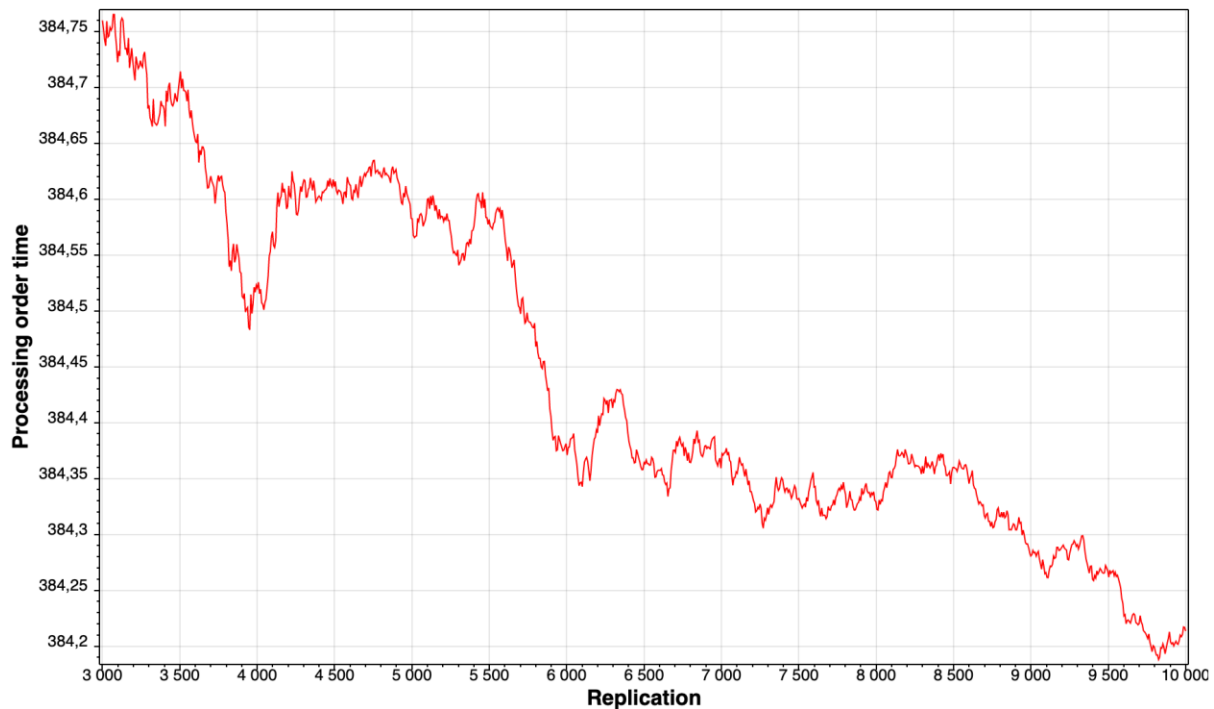


Z tejto série vyberieme konfiguráciu  $\langle 2, 1, 18 \rangle$ , keďže sa tu podstatnejšie prejavilo zníženie počtu čakajúcich objednávok v 2. fronte a tiež sa znížilo vyťaženie pracovníkov skupiny C. Na základe tejto série vykonáme ďalšie experimenty. Štatistiky tejto konfigurácie sú uvedené v tabuľkách:

$\langle 2, 1, 18 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Čas vybavenia objednávky	384,21	<383,92 ; 384,51>	hodín
Čakajúce objednávky (1. front)	1,71	<1,70 ; 1,71>	počet
Čakajúci narezaný materiál (2. front)	3,23	<3,21 ; 3,26>	počet
Čakajúci nalakovaný materiál (3. front)	741,41	<740,70 ; 742,12>	počet
Čakajúce zložené skrine (4. front)	0,10	<0,10 ; 0,10>	počet
Priemerný čas čakania 1. front	0,85	<0,85 ; 0,86>	hodín
Priemerný čas čakania 2. front	1,61	<1,59 ; 1,62>	hodín
Priemerný čas čakania 3. front	371,99	<371,70 ; 372,28>	hodín
Priemerný čas čakania 4. front	0,24	<0,24 ; 0,24>	hodín
Záťaž pracovníkov A	80,38	<80,36 ; 80,41>	%
Záťaž pracovníka B	99,55	<99,55 ; 99,55>	%
Záťaž pracovníkov C	91,44	<91,41 ; 91,47>	%



$\langle 2, 1, 18 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Záťaž pracovníka A1	83,84	<83,82 ; 83,86>	%
Záťaž pracovníka A2	76,93	<76,89 ; 76,96>	%
Záťaž pracovníka C1	97,46	<97,45 ; 97,47>	%
Záťaž pracovníka C2	97,19	<97,18 ; 97,20>	%
Záťaž pracovníka C3	96,89	<96,88 ; 96,90>	%
Záťaž pracovníka C4	96,54	<96,53 ; 96,56>	%
Záťaž pracovníka C5	96,15	<96,14 ; 96,17>	%
Záťaž pracovníka C6	95,71	<95,69 ; 95,72>	%
Záťaž pracovníka C7	95,20	<95,18 ; 95,21>	%
Záťaž pracovníka C8	94,58	<94,56 ; 94,60>	%
Záťaž pracovníka C9	93,89	<93,87 ; 93,91>	%
Záťaž pracovníka C10	93,07	<93,04 ; 93,09>	%
Záťaž pracovníka C11	92,10	<92,07 ; 92,13>	%
Záťaž pracovníka C12	90,95	<90,91 ; 90,98>	%
Záťaž pracovníka C13	89,60	<89,56 ; 89,63>	%
Záťaž pracovníka C14	87,97	<87,92 ; 88,01>	%
Záťaž pracovníka C15	86,03	<85,98 ; 86,08>	%
Záťaž pracovníka C16	83,74	<83,68 ; 83,80>	%
Záťaž pracovníka C17	81,03	<80,96 ; 81,10>	%
Záťaž pracovníka C18	77,85	<77,77 ; 77,93>	%



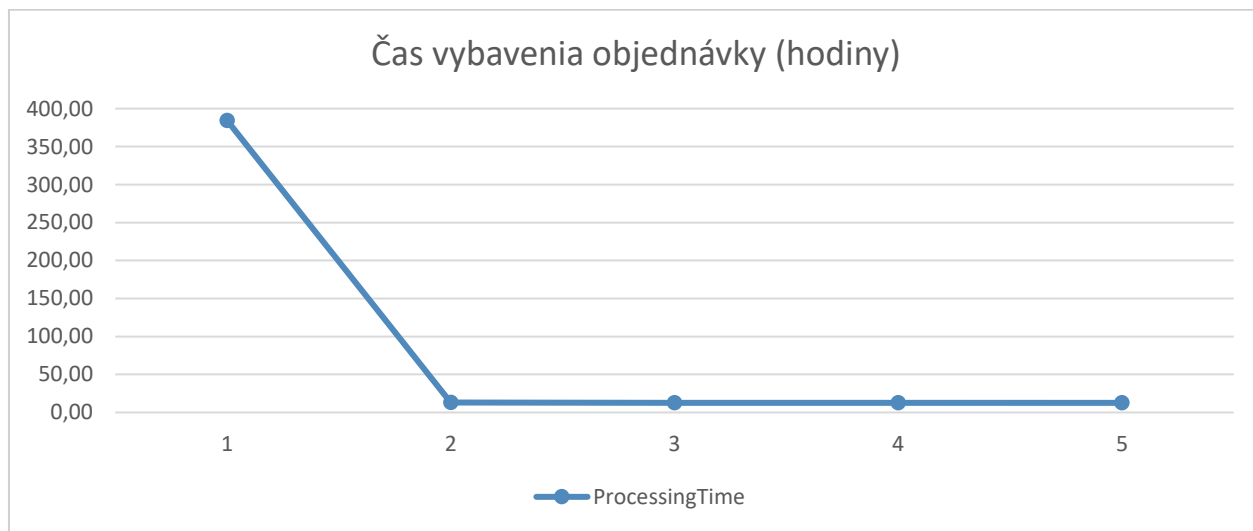
Graf ustáľovania priemerného času vybavenia objednávky v hodinách



### 3.4 Séria experimentov s konfiguráciami $\langle 2, b, 18 \rangle$

V tejto sérii experimentov sme spustili analyzátor pre prejsenie viacerých riešení, pričom sme zafixovali hodnoty premenných  $a = 2$  a  $c = 18$  a menili sme iba hodnotu premennej  $b$ . Vykonali sme experimenty pre  $b = 1, \dots, 5$ . Namerané časy vybavenia objednávky v hodinách pre  $b = 1, \dots, 5$  sú uvedené v tabuľke a grafe:

Čas vybavenia objednávky (hodiny)		95% Interval spoľahlivosti
$\langle 2, 1, 18 \rangle$	384,36	$\langle 383,41 ; 385,3 \rangle$
$\langle 2, 2, 18 \rangle$	13,19	$\langle 13,13 ; 13,25 \rangle$
$\langle 2, 3, 18 \rangle$	12,79	$\langle 12,73 ; 12,85 \rangle$
$\langle 2, 4, 18 \rangle$	12,71	$\langle 12,66 ; 12,77 \rangle$
$\langle 2, 5, 18 \rangle$	12,65	$\langle 12,6 ; 12,7 \rangle$



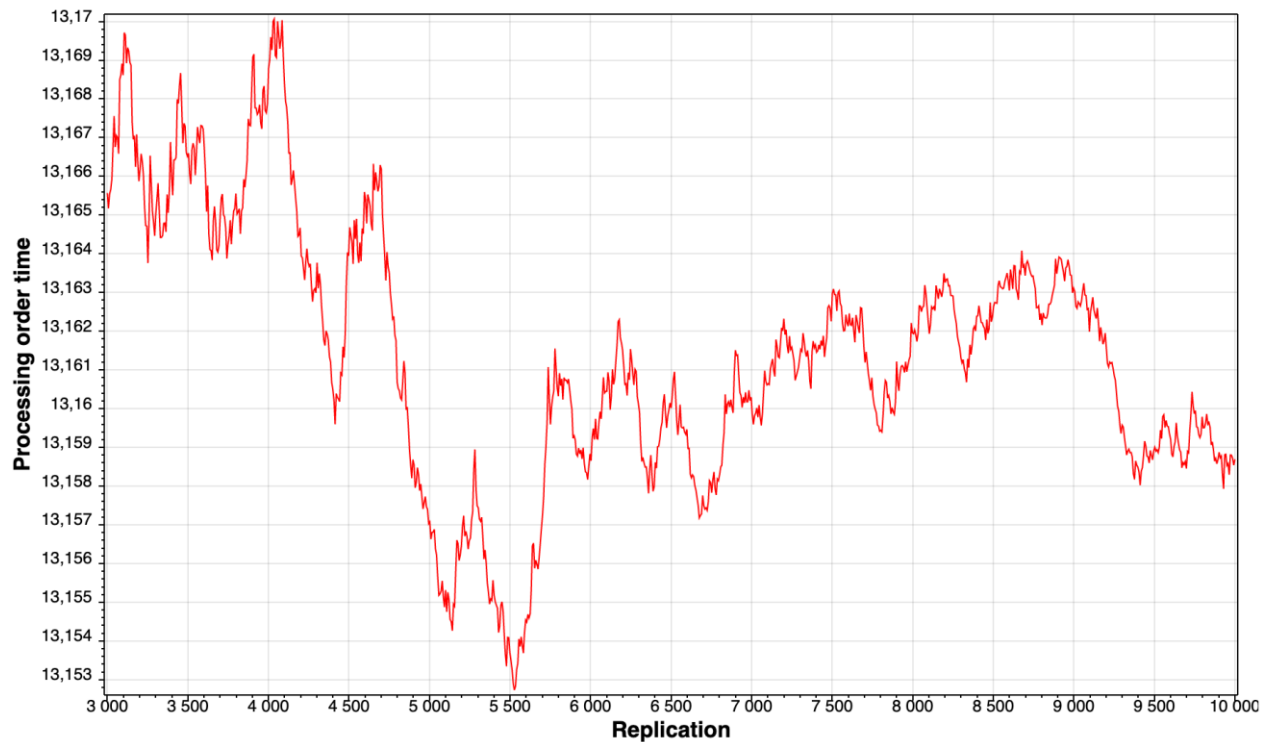
Našli sme konfigurácie, ktoré spĺňajú zadanie. Zoberieme konfiguráciu  $\langle 2, 2, 18 \rangle$ , keďže má najmenší počet pracovníkov a zároveň spĺňa podmienku na čas vybavenia objednávky do 16 pracovných hodín. V prípade tejto konfigurácie je čas vybavenia objednávky **13,19 hodín**.



$\langle 2, 2, 18 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Čas vybavenia objednávky	13,16	$\langle 13,14 ; 13,18 \rangle$	hodín
Čakajúce objednávky (1. front)	1,70	$\langle 1,70 ; 1,71 \rangle$	počet
Čakajúci narezaný materiál (2. front)	3,71	$\langle 3,68 ; 3,75 \rangle$	počet
Čakajúci nalakovaný materiál (3. front)	0,91	$\langle 0,91 ; 0,91 \rangle$	počet
Čakajúce zložené skrine (4. front)	0,19	$\langle 0,19 ; 0,19 \rangle$	počet
Priemerný čas čakania 1. front	0,85	$\langle 0,85 ; 0,85 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 2. front	1,85	$\langle 1,83 ; 1,86 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 3. front	0,46	$\langle 0,46 ; 0,46 \rangle$	hodín
Priemerný čas čakania 4. front	0,27	$\langle 0,27 ; 0,27 \rangle$	hodín
Záťaž pracovníkov A	80,39	$\langle 80,36 ; 80,41 \rangle$	%
Záťaž pracovníkov B	80,27	$\langle 80,24 ; 80,29 \rangle$	%
Záťaž pracovníkov C	91,90	$\langle 91,87 ; 91,93 \rangle$	%

$\langle 2, 2, 18 \rangle$	Priemerná hodnota	95% Interval spoľahlivosti	
Záťaž pracovníka A1	83,83	$\langle 83,81 ; 83,86 \rangle$	%
Záťaž pracovníka A2	76,94	$\langle 76,90 ; 76,97 \rangle$	%
Záťaž pracovníka B1	83,64	$\langle 83,62 ; 83,66 \rangle$	%
Záťaž pracovníka B2	76,90	$\langle 76,87 ; 76,93 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C1	96,15	$\langle 96,13 ; 96,16 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C2	95,73	$\langle 95,71 ; 95,75 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C3	95,30	$\langle 95,27 ; 95,32 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C4	94,84	$\langle 94,82 ; 94,86 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C5	94,36	$\langle 94,33 ; 94,38 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C6	93,87	$\langle 93,84 ; 93,90 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C7	93,34	$\langle 93,31 ; 93,36 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C8	92,79	$\langle 92,76 ; 92,82 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C9	92,28	$\langle 92,25 ; 92,31 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C10	91,72	$\langle 91,69 ; 91,76 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C11	91,17	$\langle 91,13 ; 91,21 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C12	90,64	$\langle 90,60 ; 90,68 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C13	90,08	$\langle 90,04 ; 90,12 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C14	89,51	$\langle 89,47 ; 89,55 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C15	88,95	$\langle 88,90 ; 88,99 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C16	88,40	$\langle 88,35 ; 88,45 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C17	87,87	$\langle 87,82 ; 87,92 \rangle$	%
Záťaž pracovníka C18	87,30	$\langle 87,25 ; 87,35 \rangle$	%





*Graf ustalovania priemerného času vybavenia objednávky v hodinách*

### 3.5 Séria experimentov v okolí konfigurácie $\langle 2, 2, 18 \rangle$

Na záver pre potvrdenie nájdeného riešenia prejdeme okolité riešenia konfigurácie  $\langle 2, 2, 18 \rangle$ .

V tomto okolí prejdeme tie konfigurácie, ku ktorým je možné sa dostať:

- zvýšením (+1) alebo znížením (-1) jedného pracovníka jednej zo skupín
- zvýšením (+1) alebo znížením (-1) jedného pracovníka v dvoch skupinách
- zvýšením (+1) alebo znížením (-1) jedného pracovníka vo všetkých skupinách

Získali sme nasledujúce časy vybavenia objednávky v hodinách:



	Počet pracovníkov	Čas vybavenia objednávky (hodiny)	95% Interval spoľahlivosti
$\langle 2, 2, 18 \rangle$	22	13,16	$\langle 13,1 ; 13,21 \rangle$
<b>Zmena (<math>\pm 1</math> pracovník) jednej zo skupín</b>			
$\langle 1, 2, 18 \rangle$	21	384,65	$\langle 383,67 ; 385,63 \rangle$
$\langle 2, 1, 18 \rangle$	21	383,79	$\langle 382,83 ; 384,75 \rangle$
$\langle 2, 2, 17 \rangle$	21	19,54	$\langle 19,19 ; 19,9 \rangle$
$\langle 3, 2, 18 \rangle$	23	12,74	$\langle 12,69 ; 12,8 \rangle$
$\langle 2, 3, 18 \rangle$	23	12,78	$\langle 12,72 ; 12,84 \rangle$
$\langle 2, 2, 19 \rangle$	23	11,97	$\langle 11,95 ; 11,99 \rangle$
<b>Zmena (<math>\pm 1</math> pracovník) dvoch zo skupín</b>			
$\langle 1, 1, 18 \rangle$	20	391,50	$\langle 390,54 ; 392,46 \rangle$
$\langle 1, 2, 17 \rangle$	20	384,66	$\langle 383,72 ; 385,61 \rangle$
$\langle 2, 1, 17 \rangle$	20	384,77	$\langle 383,76 ; 385,77 \rangle$
$\langle 3, 1, 18 \rangle$	22	383,70	$\langle 382,77 ; 384,64 \rangle$
$\langle 1, 3, 18 \rangle$	22	385,46	$\langle 384,49 ; 386,42 \rangle$
$\langle 1, 2, 19 \rangle$	22	385,09	$\langle 384,12 ; 386,05 \rangle$
$\langle 3, 2, 17 \rangle$	22	18,83	$\langle 18,5 ; 19,15 \rangle$
$\langle 2, 1, 19 \rangle$	22	383,89	$\langle 382,94 ; 384,84 \rangle$
$\langle 2, 3, 17 \rangle$	22	19,14	$\langle 18,79 ; 19,49 \rangle$
$\langle 3, 3, 18 \rangle$	24	12,31	$\langle 12,26 ; 12,37 \rangle$
$\langle 3, 2, 19 \rangle$	24	11,48	$\langle 11,46 ; 11,5 \rangle$
$\langle 2, 3, 19 \rangle$	24	11,56	$\langle 11,54 ; 11,58 \rangle$
<b>Zmena (<math>\pm 1</math> pracovník) v každej skupine</b>			
$\langle 1, 1, 17 \rangle$	19	391,23	$\langle 390,32 ; 392,14 \rangle$
$\langle 1, 1, 19 \rangle$	21	391,64	$\langle 390,67 ; 392,62 \rangle$
$\langle 1, 3, 17 \rangle$	21	384,23	$\langle 383,28 ; 385,19 \rangle$
$\langle 3, 1, 17 \rangle$	21	384,18	$\langle 383,22 ; 385,13 \rangle$
$\langle 1, 3, 19 \rangle$	23	384,28	$\langle 383,33 ; 385,23 \rangle$
$\langle 3, 1, 19 \rangle$	23	384,01	$\langle 383,07 ; 384,94 \rangle$
$\langle 3, 3, 17 \rangle$	23	18,47	$\langle 18,14 ; 18,8 \rangle$
$\langle 3, 3, 19 \rangle$	25	11,05	$\langle 11,04 ; 11,07 \rangle$



### 3.6 Záver vyhodnotenia simulačných experimentov

Na základe výsledkov preskúmaného okolia je zrejmé, že naše zvolené riešenie  $\langle 2, 2, 18 \rangle$  je **najvhodnejšie**, keďže spĺňa maximálny limit 16 hodín. Všetky riešenia v okolí, ktoré majú lepší čas vybavenia objednávky ako naše, vždy vyžaduje vyšší počet pracovníkov. Tiež je vidieť, že pre fungovanie systému je kritické mať minimálne 2 pracovníkov v skupine A a minimálne 2 pracovníkov v skupine B, inak sa čas výrazne zhorší. Počet pracovníkov v skupine C je možné znížiť z počtu 18 bez zahŕnenia systému, ale požadovaný čas objednávky (maximálne 16 hodín) bude prekročený na hodnotu 19,54 hodiny.