

FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY  
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

## SIMULÁCIA MONTE CARLO

SEMESTRÁLNA PRÁCA Č. 1 Z PREDMETU DISKRÉTNÁ SIMULÁCIA

Autor: **Bc. Matej Poljak**

Cvičiaci: **Ing. Andrea Galadíková, PhD.**

Akademický rok: **2024/2025**

## Obsah

Validácia generátorov rovnomerného rozdelenia .....	4
Architektúra riešenia.....	6
Balíčky .....	6
Generátory .....	7
Implementácia stratégií dodávania súčiastok.....	8
Vlákno pre beh simulácie.....	9
Simulácia .....	9
Úlohy.....	10
Úloha č.1 .....	10
Úloha č.2 .....	10
Postup .....	10
Stratégia E .....	10
Stratégia F .....	11
Stratégia G.....	12
Optimalizácia dodávaných množstiev súčiastok pre TOP stratégiu.....	14

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1 – ukážka validácie výsledkov v programe Excel.....	4
Obrázok 2 – diskrétné empirické rozdelenie pravdepodobnosti (odberané množstvo svetlometov) .....	5
Obrázok 3 – spojité empirické rozdelenie pravdepodobnosti (pravdepodobnosť dodania objednávky do 15. týždňa vyjadrená v %) .....	5
Obrázok 4 – spojité empirické rozdelenie pravdepodobnosti (pravdepodobnosť dodania objednávky od 16. týždňa vyjadrená v %) .....	5
Obrázok 5 – štruktúra projektu semestrálnej práce .....	6
Obrázok 6 – triedy balíčku <b>common</b> .....	7
Obrázok 7 – generátory v balíčku <b>assignment_01.logic.generators</b> .....	8
Obrázok 8 – implementácia stratégií .....	8
Obrázok 9 – vlákno pre beh simulácie .....	9
Obrázok 10 – trieda so samotnou simuláciou .....	9
Obrázok 11 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu E .....	11
Obrázok 12 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu F.....	12
Obrázok 13 – vypočítanie priemerných nákladov pre všetkých kandidátov stratégie G.....	13
Obrázok 14 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu G8 s vybraným ako pravdepodobnejším dodávateľom (Y,Y,Y) .....	14
Obrázok 15 – identifikácia minimálnych priemerných nákladov pre stratégiu B pri rôzne zvolených dodávaných množstvách súčiastok.....	15
Obrázok 16 – graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu B so zmenenými množstvami dodávaných súčiastok.....	15

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 – výsledky (priemerné náklady) metódy Monte Carlo pre stratégie zásobovanie A,B,C,D .....	10
Tabuľka 2 – popis stratégie E .....	10
Tabuľka 3 – popis stratégie F .....	11
Tabuľka 4 – postup dodávania pre možnosti stratégie G .....	13
Tabuľka 5 – výsledky pre usporiadané trojice dodávateľa s väčšou pravdepodobnosťou v jednotlivých obdobiach .....	13

## Validácia generátorov rovnomerného rozdelenia

Implementované generátory je nevyhnutné pred ich použitím dôkladne otestovať či modelujú predpokladané rozdelenie pravdepodobnosti.

Postup:

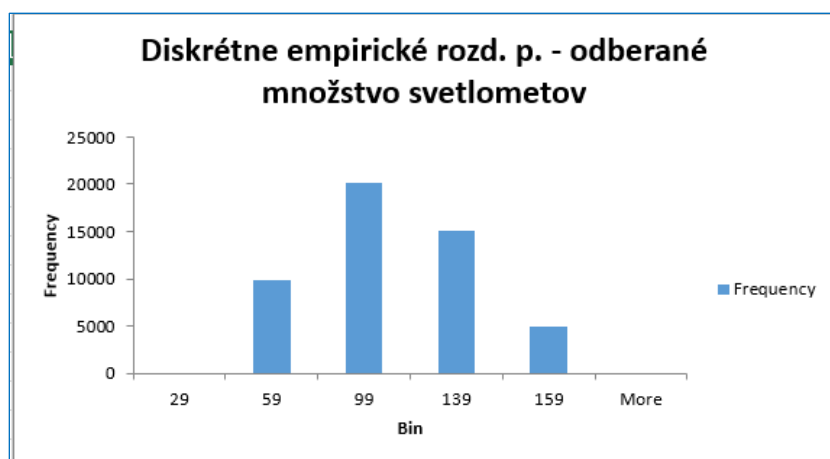
- **Krok 1:** Vytvoríme si inštanciu generátora so požadovaným rozdelením pravdepodobnosti.
- **Krok 2:** Necháme si generátorom vypísať  $n$  vygenerovaných čísel (v našom prípade 50000)
- **Krok 3:** Vygenerované vzorky vložíme do programu Excel
- **Krok 4:** Získame početnosti v závislosti od typu rozdelenia:
  - teoretické rozdelenie pravdepodobnosti
    - Diskrétné
      - Pred diskkrétne hodnoty z intervalu  $\langle min, max \rangle$  si vypočítame početnosti pre  $min, min+1, min+2, \dots, max-1, max$
    - Spojité
      - Podobne, ako pri diskrétnom rozdelení, si definujeme skupiny, ktoré môžu byť celé čísla alebo desatinné čísla a vypočítame si početnosti, ktoré k nim prislúchajú
  - empirické rozdelenie pravdepodobnosti
    - Spočítame početnosti pre intervaly – koľko hodnôt padlo do daného intervalu
- **Krok 5:** Získané početnosti pre definované skupiny vydelíme počtom vygenerovaných hodnôt celkovo (u nás 50000) a tým získame pravdepodobnosti generovania hodnôt z danej skupiny
- **Krok 6:** Porovnáme vypočítané pravdepodobnosti s požadovanými pravdepodobnosťami s prípustnou chybou (u nás 0,005) a vynesieme záver o správnosti generátora daného rozdelenia pravdepodobnosti

Ukážku realizácie validácie generátora môžeme vidieť na obrázku 1.

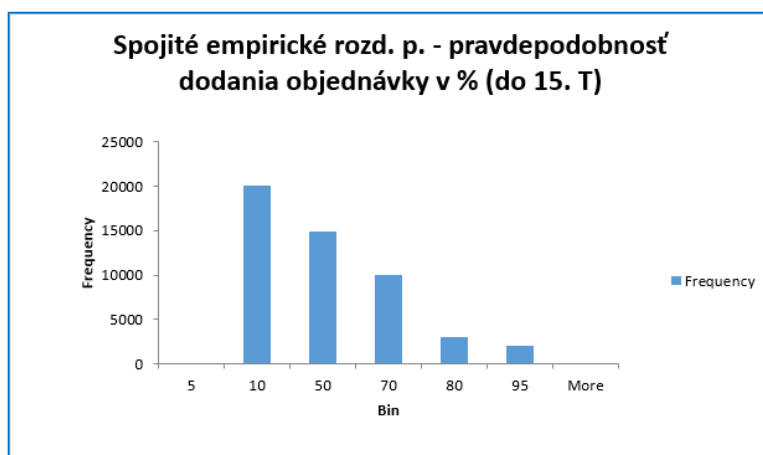
VALIDÁCIA pre Spojitý empirický generator			Pravdepodobnosť dodania %				
Je generator validný?		ANO	DODAVATEL 1 DO 15-TEHO TYZDŇA				
		max chyba =	0,005				

Obrázok 1 – ukážka validácie výsledkov v programe Excel

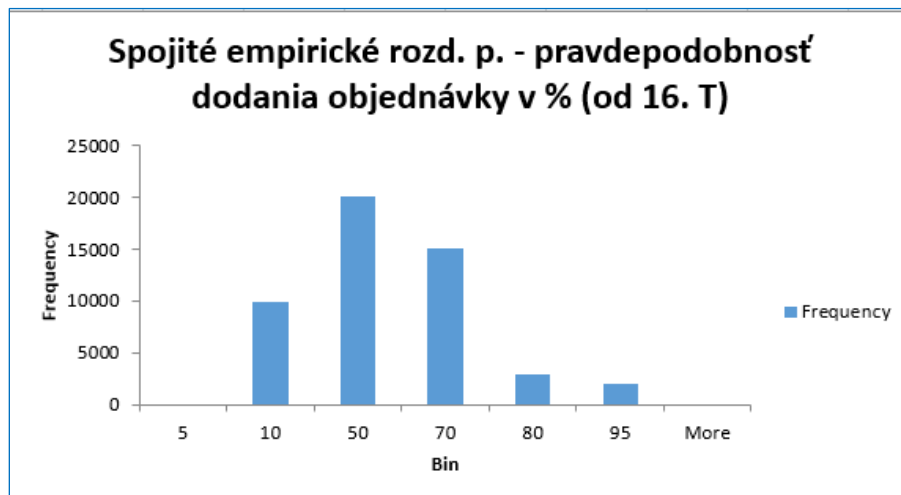
Na nasledujúcich obrázkoch 2, 3, 4 sú graficky zobrazené výsledky početností vzoriek získaných z generátorov.



Obrázok 2 – diskrétné empirické rozdelenie pravdepodobnosti (odberané množstvo svetlometov)



Obrázok 3 – spojité empirické rozdelenie pravdepodobnosti (pravdepodobnosť dodania objednávky do 15. týždňa vyjadrená v %)



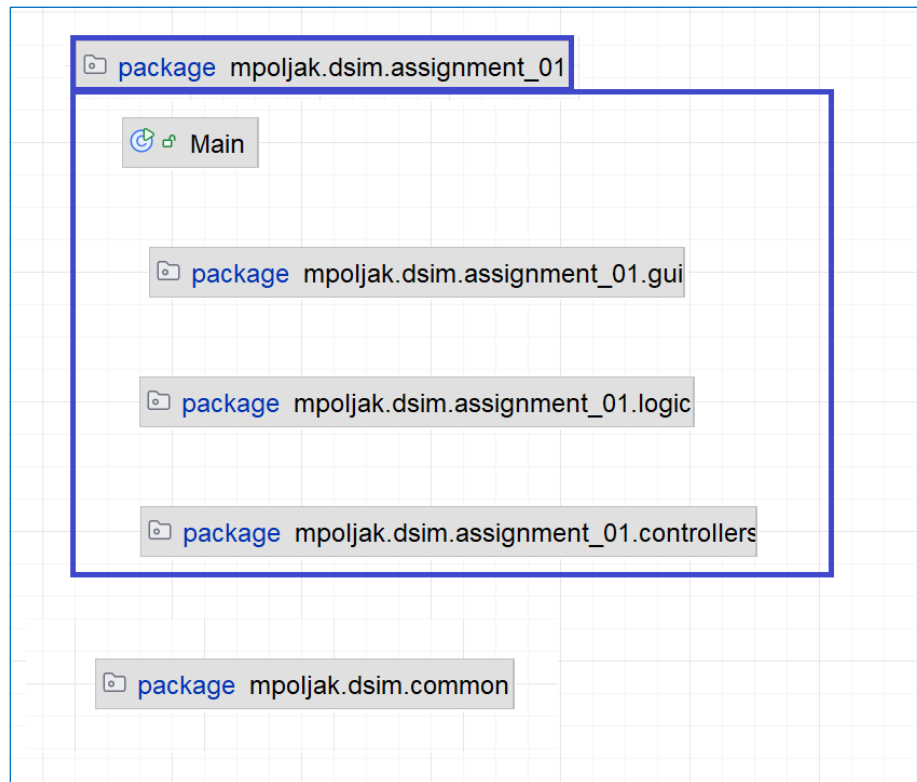
Obrázok 4 – spojité empirické rozdelenie pravdepodobnosti (pravdepodobnosť dodania objednávky od 16. týždňa vyjadrená v %)

## Architektúra riešenia

Teraz si ukážeme architektúru riešenia semestrálnej práce pomocou balíčkové diagramu a diagramov tried.

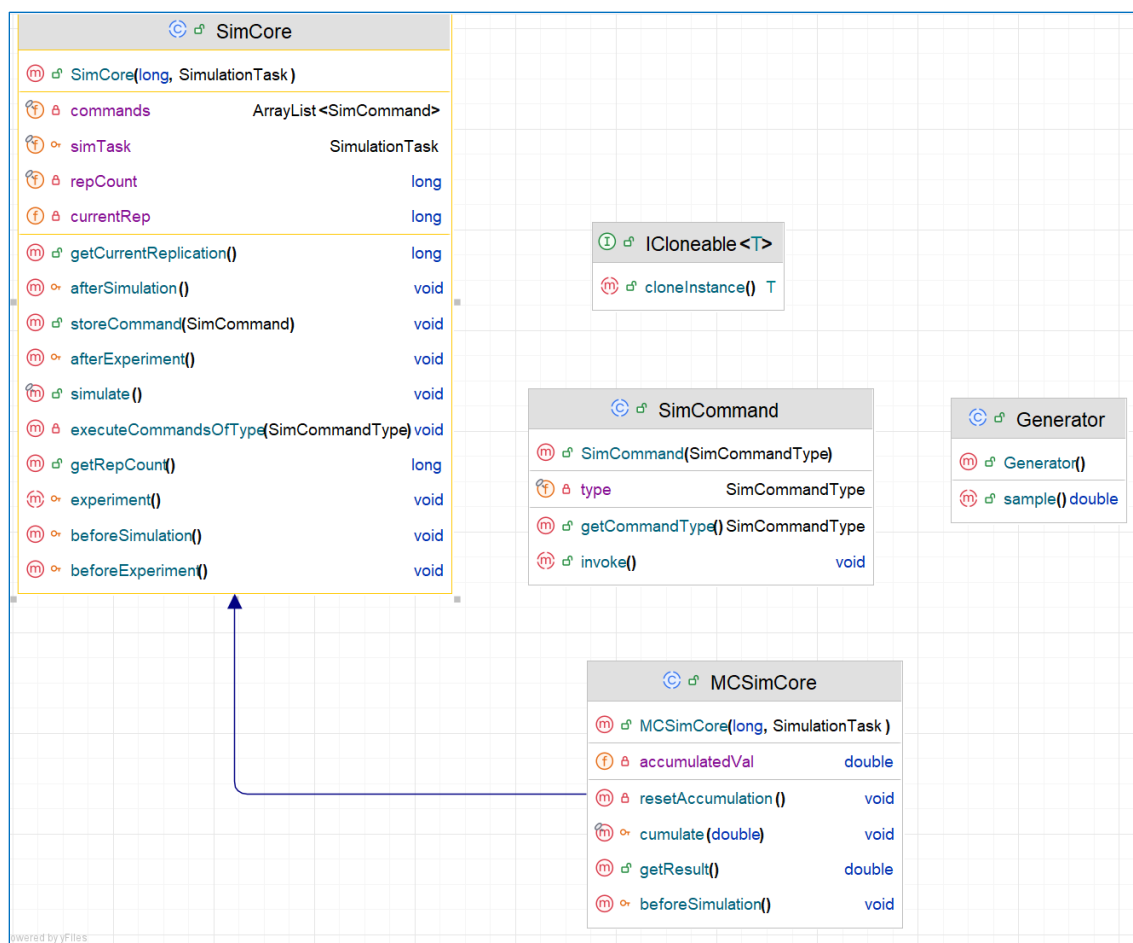
### Balíčky

Štruktúra hlavných balíčkov projektu je ukázaná na obrázku 5.



Obrázok 5 – štruktúra projektu semestrálnej práce

- Balíček **assignment\_01.gui** obsahuje grafické okno pre interakciu s používateľom pomocou triedy *SimVisualization.class*.
- V balíčku **assignment\_01.logic** nájdeme všetky implementované stratégie, empirické generátory (ktoré sme spomínali v prechádzajúcej kapitole) a aj samotnú simuláciu Monte Carlo pre minimalizovanie nákladov za skladovanie a nedodanie súčiastok pre podnikateľa Jána (trieda *CarComponentsStorage.class*).
- Balíček **assignment\_01.controller** obsahuje triedu kontrolóra *SimController.class*, ktorý spravuje interakciu medzi GUI a logikou aplikácie.
- V balíčku **common** nájdeme triedy, ktoré sa týkajú všeobecnej implementácie simulačného jadra, ktorú si ďalej vysvetlíme podrobnejšie

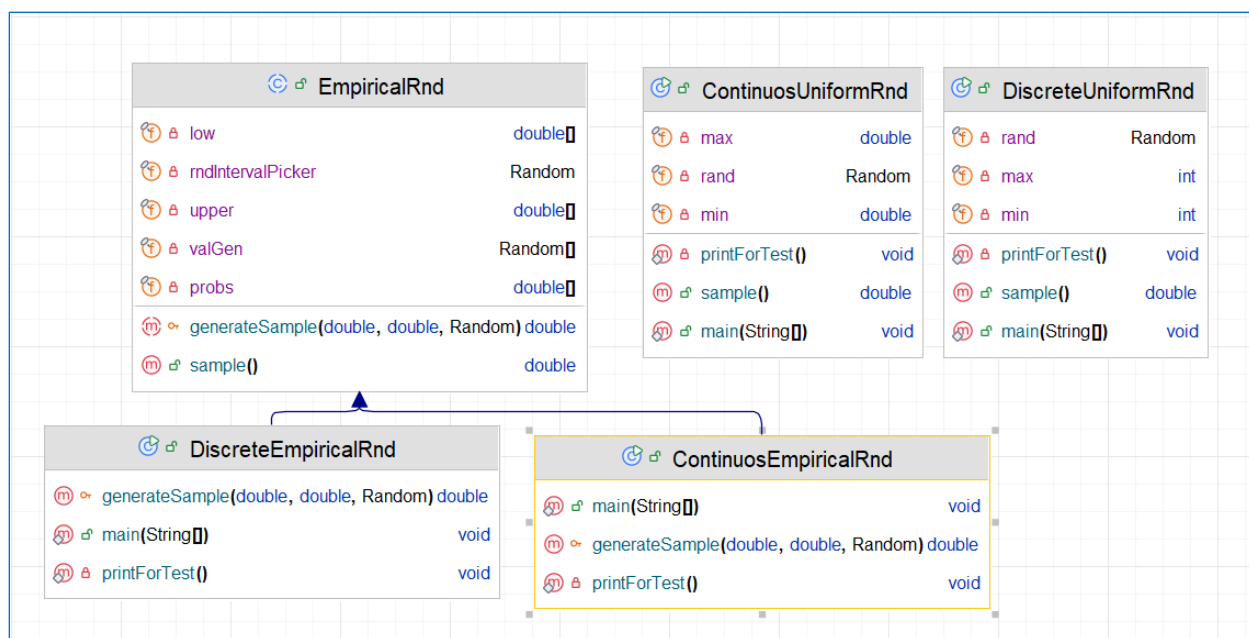


Obrázok 6 – triedy balíčku **common**

Na obrázku 6 môžeme vidieť diagram tried pre balíček **common**. Triedou so simulačným jadrom je *SimCore.class*, ktorá je abstraktná kvôli metóde *execute()*. Táto metóda predstavuje hlavnú operáciu náhodného pokusu – 1 replikácie. Trieda vie prijímať objekty implementované podľa návrhového vzoru *Command* pre vykonie potrebných operácií pred a po simulácií a náhodnom pokuse (experimente).

### Generátory

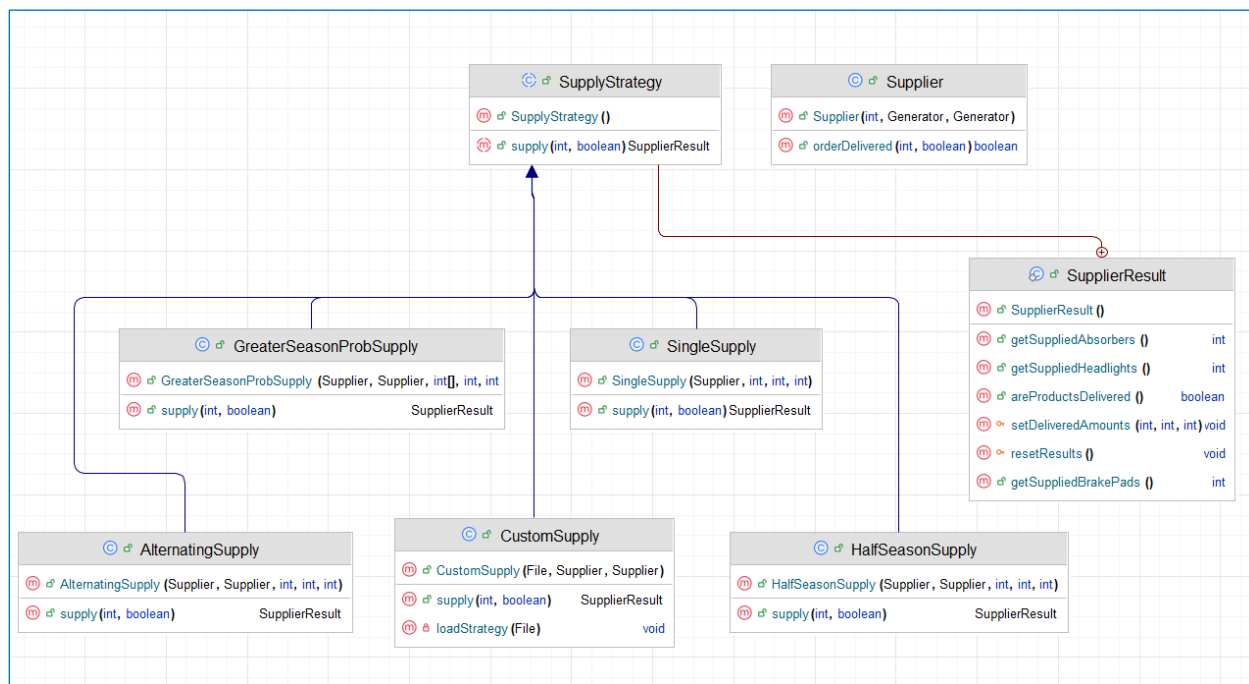
Trieda *Generator.class* je tiež abstraktná, lebo predpisuje metódu *sample()*, ktorá má vygenerovať číslo primitívneho typu *double*. Predstavuje potomka pre všetky generátory (obrázok 7) implementované v balíčku *assignment\_01.logic.generators*.



Obrázok 7 – generátory v balíčku *assignment\_01.logic.generators*

## Implementácia stratégií dodávania súčiastok

Pre jednoduché rozširovanie o nové stratégie sme si vytvorili abstraktnú triedu *SupplyStrategy.class*, ktorá obsahuje abstraktnú metódu *supply()*. Jej návratovou hodnotou je prepraková trieda (návrhový vzor *Crate*) *SupplierResult.class*. Implementované stratégie sú ukázané na obrázku 8.

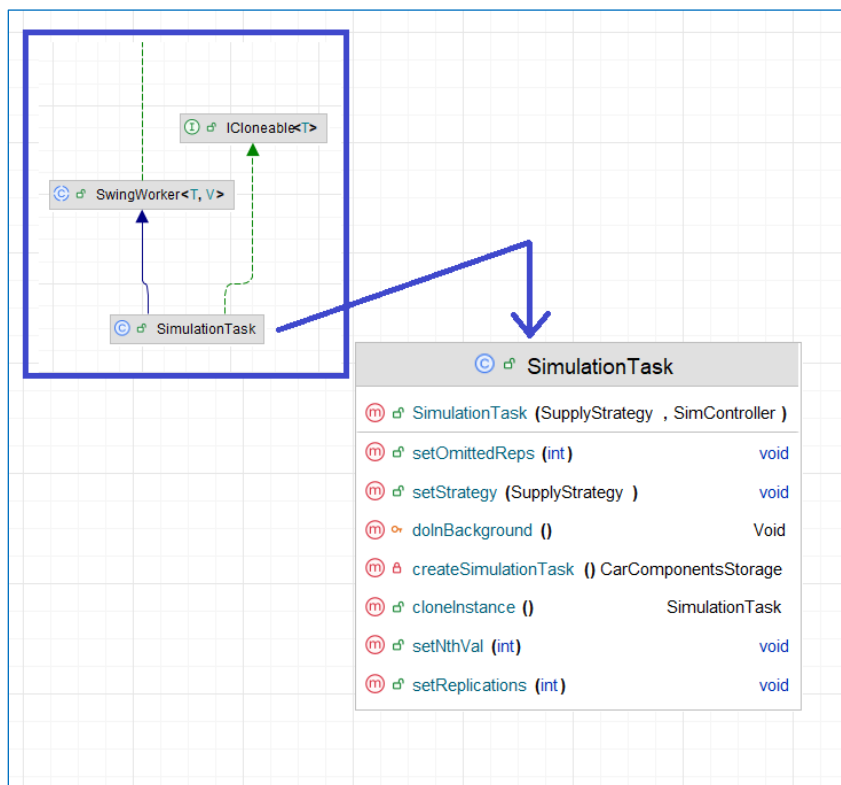


Obrázok 8 – implementácia stratégií



## Vlákno pre beh simulácie

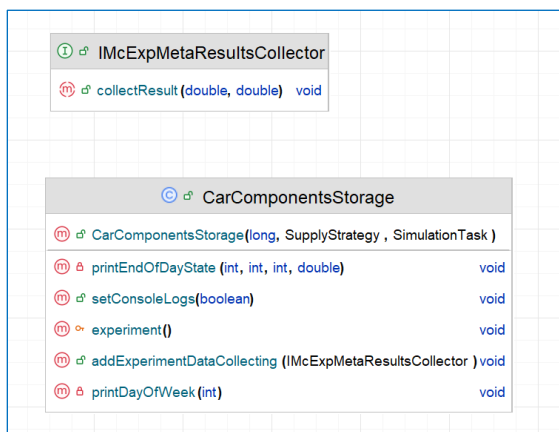
Pre beh simulácie na inom vlákne kvôli interakcií s GUI a vykresľovaní grafov sme si vytvorili triedu *SimTask.class*, ktorá realizuje predka *SwingWorker.class* (obrázok 9).



Obrázok 9 – vlákno pre beh simulácie

## Simulácia

Trieda pre simuláciu minimalizovania nákladov pre podnikateľa Jána je *CarComponentsStorage.class* (obrázok 10). Pre vykresľovanie 1 replikácie sme si vytvorili rozhranie *IMcExpMetaResultsCollector*, pod ktorým môžeme vytvoriť objekty, ktoré budú schopné získavať dáta do logicky oddelenej časti ako napríklad GUI.



Obrázok 10 – trieda so samotnou simuláciou

## Úlohy

### Úloha č.1

Keďže je našim cieľom minimalizovať náklady, vyberieme zo stratégií A,B,C,D tú, ktorá má po vykonaní dostatočne veľkého počtu replikácií pomocou metódy Monte Carlo najmenšie priemerné náklady. Výsledky simulácií týchto stratégií sú uvedené v tabuľke 1.

Počet replikácií	Stratégia A	Stratégia B	Stratégia C	Stratégia D
$10^5$	23085	11635	15945	15685
$10^6$	23082	11621	15950	15681
$10^7$	23085	11630	15949	15690

Tabuľka 1 – výsledky (priemerné náklady) metódy Monte Carlo pre stratégie zásobovanie A,B,C,D

Z tabuľky 1 môžeme vidieť, že už  $10^5$  replikácií nám prinieslo tie isté výsledky so zanedbateľným rozdielom voči simulácií s  $10^7$  replikáciami. Najviac sa oplatila stratégia B so zásobovaním počas celého obdobia len dodávateľom 2.

### Úloha č.2

Výsledky nami vymyslenými stratégiami budeme porovnávať s priemernými nákladmi stratégie B, keďže dosahovala najmenšie náklady, ktoré sa pokúsime teraz ešte znížiť.

#### Postup

Najprv vyskúšame iba meniť dodávateľov v rôznych týždňoch bez zmeny počtov dodávaných súčiastok. Následne vyberieme najlepšiu stratégiu a skúsime zmeniť množstvá produktov.

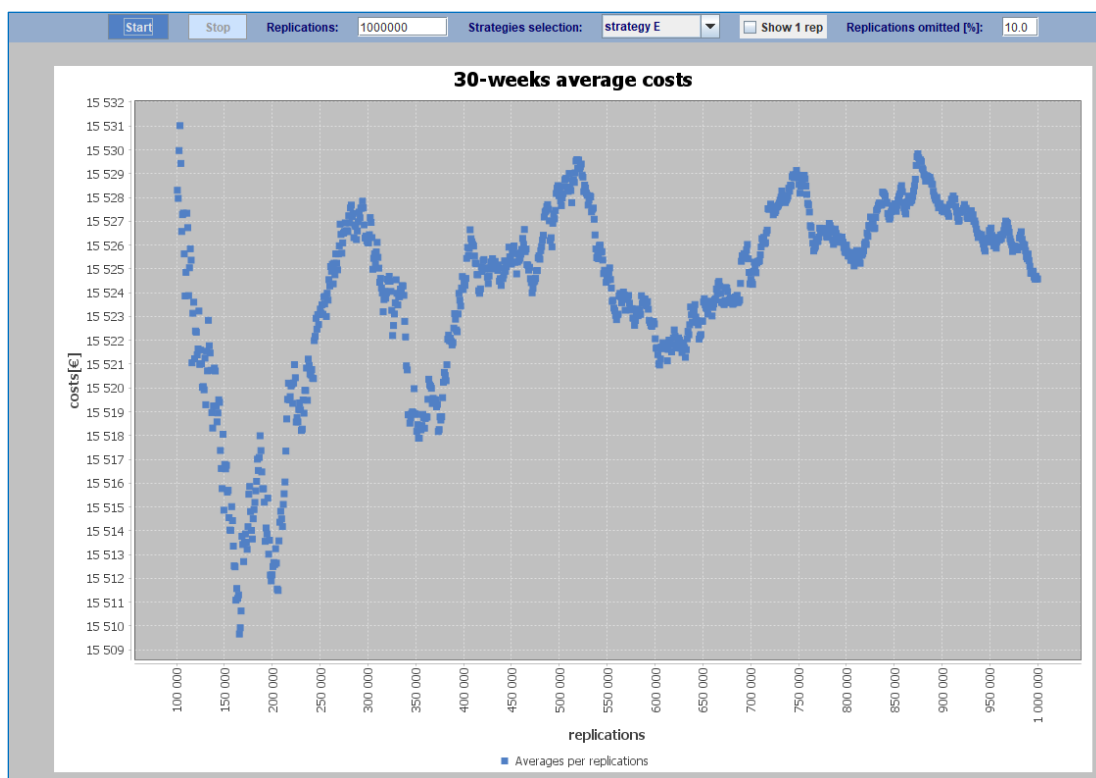
V nasledujúcich dvoch stratégiách E a F a v nasledujúcej stratégii vyskúšame, aký by malo dopad na celkové priemerné náklady, keby prvých 15 týždňov dodával jeden dodávateľ a druhú polovicu sledovaného obdobia druhý dodávateľ.

#### Stratégia E

Stratégia E je popísaná tabuľkou 2:

Dodávateľ	Obdobie	Tlmiče	Brzdové doštičky	Svetlomety
Dodávateľ 1	Do 15-teho T	100	200	150
Dodávateľ 2	Od 16-teho T	100	200	150

Tabuľka 2 – popis stratégie E



Obrázok 11 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu E

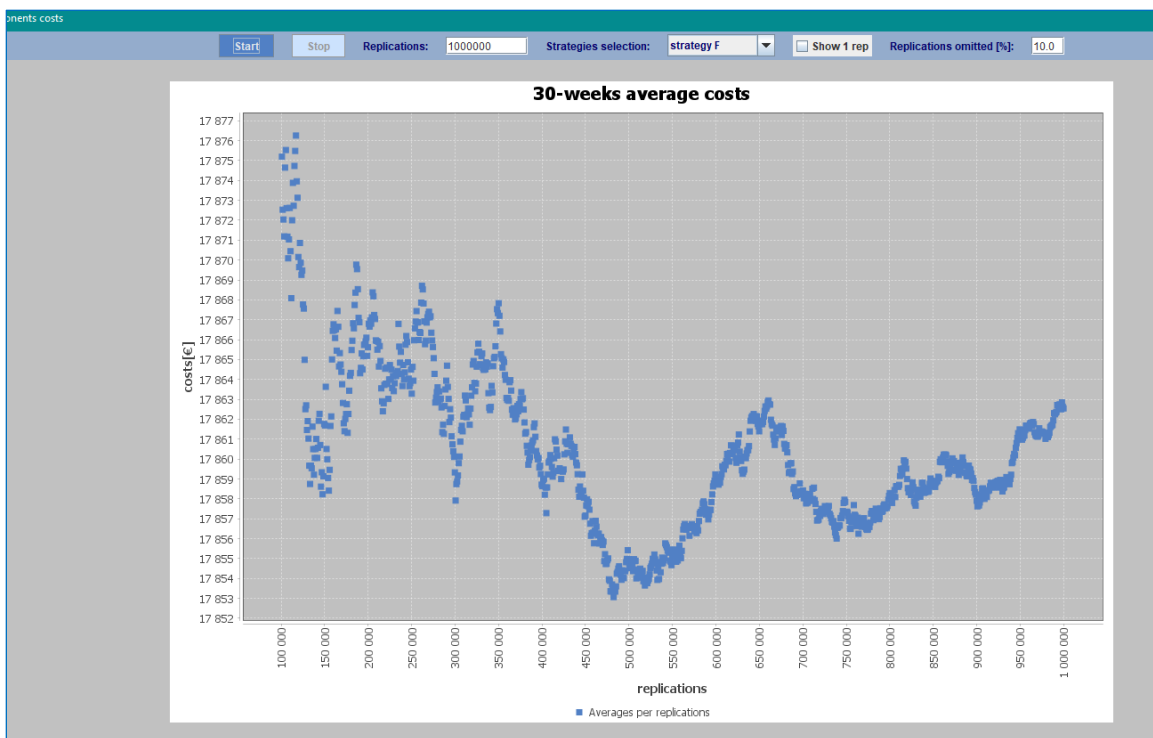
Náklady stratégie E vyšli v priemere 15525, čo je o 4000 jednotiek viac ako pre stratégiu B.

## Stratégia F

Stratégia F je popísaná tabuľkou 3:

Dodávateľ	Obdobie	Tlmiče	Brzdové doštičky	Svetlomety
Dodávateľ 2	Do 15-teho T	100	200	150
Dodávateľ 1	Od 16-teho T	100	200	150

Tabuľka 3 – popis stratégie F



Obrázok 12 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu F

Z obrázku 12 môžeme vidieť, pre  $10^6$  replikácií sme dostali priemerné náklady približne 17860, čo je o dosť horšie ako náklady pre stratégiu B.

### Stratégia G

Zaujímavé bude vyskúšať vyberať dodávateľa na týždennej báze s istou pravdepodobnosťou. Aby mali šancu sa obaja realizovať, vytvoríme si 3 obdobia po 10 týždňov s tým, že v každom období bude mať jeden z dvoch dodávateľov väčšiu pravdepodobnosť ako ten druhý. Nemá veľmi zmysel im prideliť rovnakú pravdepodobnosť, lebo to sme v podstate vyskúšali pomocou stratégie C a D, kde sa dodávatelia každý týždeň menili. Skúsime prideliť v každom období jednému z dodávateľov pravdepodobnosť  $2/3$  a druhému iba  $1/3$ . Vznikne nám tak 8 možností ako môžeme prideliť každému dodávateľovi pravdepodobnosť v danom období. Všetkých týchto 8 možností vyskúšame odsimulovať a ako stratégiu G pomenujeme tú, ktorá bude mať najmenšie náklady.

Pre jednoduchšie označenie možností označíme dodávateľa 1 písmenom X a dodávateľa 2 písmenom Y. Vytvoríme teda všetkých 8 usporiadaných trojíc s dodávateľom s pravdepodobnosťou  $2/3$ , kde prvé X alebo Y predstavuje dodávateľa s pravdepodobnosťou  $2/3$  pre prvé obdobie (10 týždňov). Objednávané množstvá ponecháme tak ako boli definované v zadaní.

Postup si môžeme ešte ukázať na príklade pre usporiadanú trojicu (Y,X,Y), ktorý je ukázaný v tabuľke 4.

Obdobie	Dodávateľ	Tlmiče	Brzdové platníčky	Svetlomety
Týždeň 1-10	p(vybraný dodávateľ 1) = 1/3 p(vybraný dodávateľ 2) = 2/3	100	200	150
Týždeň 11-20	p(vybraný dodávateľ 1) = 2/3 p(vybraný dodávateľ 2) = 1/3	100	200	150
Týždeň 21-30	p(vybraný dodávateľ 1) = 1/3 p(vybraný dodávateľ 2) = 2/3	100	200	150

Tabuľka 4 – postup dodávania pre možnosti stratégie G

Výsledky všetkých možností ukazuje tabuľka 5.

Možnosť	Usporiadaná trojica	Priemerné náklady
1	(X,X,X)	15681
2	(X,X,Y)	15688
3	(X,Y,X)	15685
4	(X,Y,Y)	15683
5	(Y,X,X)	15680
6	(Y,Y,X)	15691
7	(Y,X,Y)	15685
8	(Y,Y,Y)	15686

Tabuľka 5 – výsledky pre usporiadané trojice dodávateľa s väčšou pravdepodobnosťou v jednotlivých obdobiach

Na obrázku 13 je zobrazený výpočet nákladov pre všetky usporiadané trojice.

usporiadané trojice dodávateľov s väčšou pravdepodobnosťou pre dané obdobie (10 týždňov)

Výsledky simulácií

```

// SupplyStrategy strategyD = new AlternatingSupply(supplier2, supplier1, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG1 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{1,1,1}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG2 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{1,1,2}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG3 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{1,2,1}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG4 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{1,2,2}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG5 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{2,1,1}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG6 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{2,2,1}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG7 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{2,1,2}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);
SupplyStrategy strategyG8 = new GreaterSeasonProbSupply(supplier1, supplier2, new int[]{2,2,2}, DEFAULT_ORDER_A, DEFAULT_ORDER_B, DEFAULT_ORDER_H);

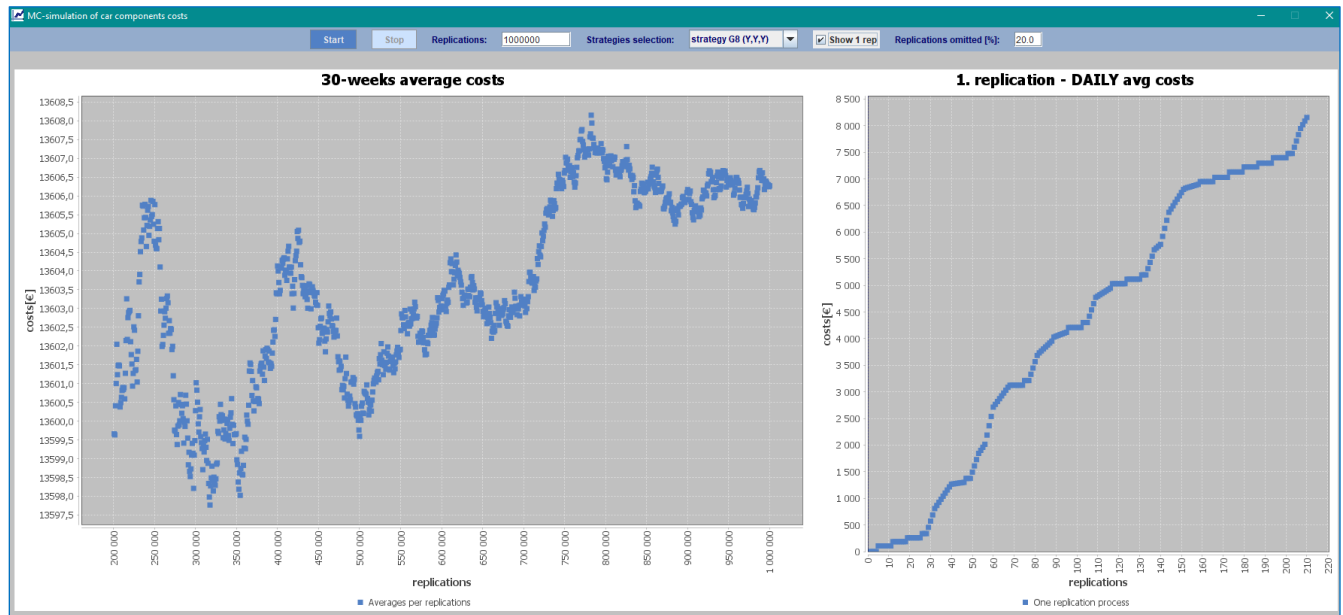
// tests execution
int replications = 1_000_000;
// testSimulation("strategy A", strategyA, replications);
// testSimulation("strategy B", strategyB, replications);
// testSimulation("strategy C", strategyC, replications);
// testSimulation("strategy D", strategyD, replications);
testSimulation("strategy G1", strategyG1, replications);
testSimulation("strategy G2", strategyG2, replications);
testSimulation("strategy G3", strategyG3, replications);
testSimulation("strategy G4", strategyG4, replications);
testSimulation("strategy G5", strategyG5, replications);
testSimulation("strategy G6", strategyG6, replications);
testSimulation("strategy G7", strategyG7, replications);
testSimulation("strategy G8", strategyG8, replications);

Run StrategiesTester
* AV6 costs (strategy G1): 19174.0 [€]
* AV6 costs (strategy G2): 17101.0 [€]
* AV6 costs (strategy G3): 15978.0 [€]
* AV6 costs (strategy G4): 14140.0 [€]
* AV6 costs (strategy G5): 18569.0 [€]
* AV6 costs (strategy G6): 15452.0 [€]
* AV6 costs (strategy G7): 16490.0 [€]
* AV6 costs (strategy G8): 13619.0 [€]

```

Obrázok 13 – vypočítanie priemerných nákladov pre všetkých kandidátov stratégie G

Z obrázku 13 je zrejmé, že ak vyberieme ľubovoľného dodávateľa s pravdepodobnosťou 2/3 pre ľubovoľné obdobie (10 týždňov), tak najlepšie výsledky dosahuje usporiadaná trojica (Y,Y,Y) a to približne 13620 jednotiek nákladov. Začína sa nám spolu so stratégiou B a stratégiou G8 potvrdzovať, že väčšiu spoľahlivosť dodávania súčiastok bude dosahovať dodávateľ 2. Graf priebehu simulácie pre usporiadanú trojicu (Y,Y,Y) je na obrázku 14.



Obrázok 14 - graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu G8 s vybraným ako pravdepodobnejším dodávateľom (Y,Y,Y)

Ako záver môžeme prehlásiť, že stratégia B vykazuje najmenšie náklady za 30 týždňov prevádzky pri dodávaných množstvách jednotlivých súčiastok podľa zadania.

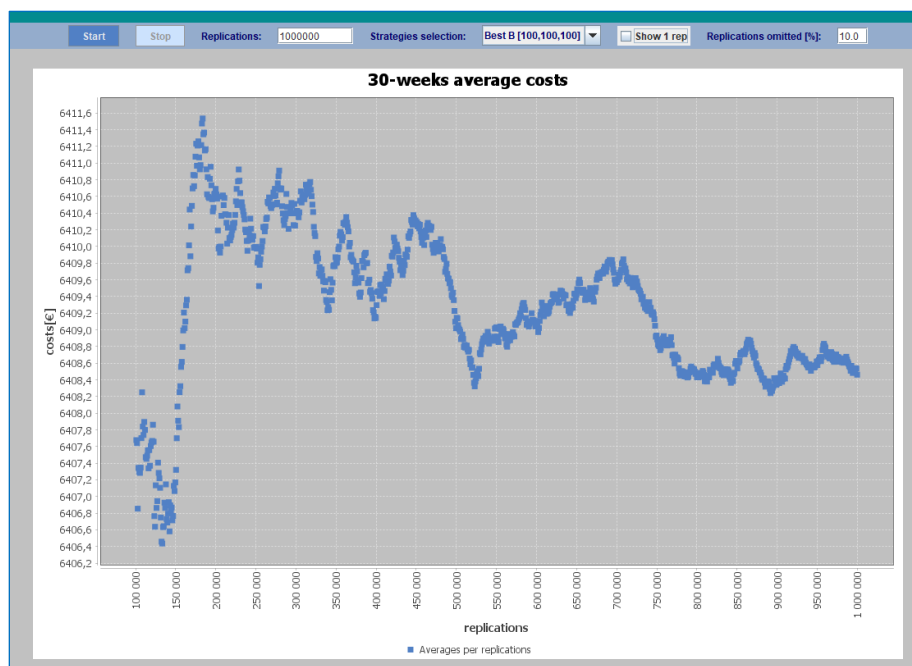
### Optimalizácia dodávaných množstiev súčiastok pre TOP stratégiu

Ako najmenej nákladnú stratégiu z nami vyskúšaných sme označili stratégiu B. Teraz skúsime iteratívne spúšťať stratégiu B s rôznymi množstvami dodávaných produktov (hodnoty budú kombinácie troch čísel, ktoré môžu nadobúdať hodnoty 100,125,150,175,200) s cieľom nájsť čo najlacnejšiu konfiguráciu. Výsledky programu sme si nechali vypísať na konzolu a následne sme ich nainportovali do csv súboru (viď obrázok 15), kde sme našli najlacnejšiu kombináciu dodávaných množstiev. Táto kombinácia obsahuje z každého typu súčiastky po 100 dodávaných kusov.

	A	B	C	D	E	F	G	H
avg costs	A	B	C	D	zhoda			
1	6403,49	100	100	100	1	min		6403,49
2	7327,21	100	100	125	0			
3	8771,76	100	100	150	0			
4	10896,6	100	100	175	0			
5	13802,15	100	100	200	0			
6	6843,8	100	125	100	0			
7	7755,34	100	125	125	0			
8	9204,24	100	125	150	0			
9	11346,97	100	125	175	0			
10	14240,86	100	125	200	0			
11	7428,6	100	150	100	0			
12	8341,37	100	150	125	0			
13	9780,76	100	150	150	0			
14	11909,75	100	150	175	0			
15	14786,3	100	150	200	0			
16	8206,1	100	175	100	0			
17	9126,29	100	175	125	0			
18	10563,42	100	175	150	0			
19	12676,87	100	175	175	0			
20	15556,54	100	175	200	0			
21	9255,1	100	200	100	0			
22	10178,41	100	200	125	0			
23	11591,09	100	200	150	0			
24	13728,73	100	200	175	0			
25	16638,22	100	200	200	0			
26	7518,86	125	100	100	0			
27	8440,6	125	100	125	0			
28	9876,55	125	100	150	0			
29	11987,03	125	100	175	0			
30	14836,46	125	100	200	0			
31	7947,42	125	125	100	0			

Obrázok 15 – identifikácia minimálnych priemerných nákladov pre stratégiu B pri rôzne zvolených dodávaných množstvách súčiastok

Následne sme si vykreslili graf (obrázok 16) priebehu pre stratégiu B s aktualizovanými dodávanými množstvami.



Obrázok 16 – graf priebehu simulácie priemerných nákladov pre stratégiu B so zmenenými množstvami dodávaných súčiastok