

Dokumentácia projektu S3 - DIS

Viliam Holík

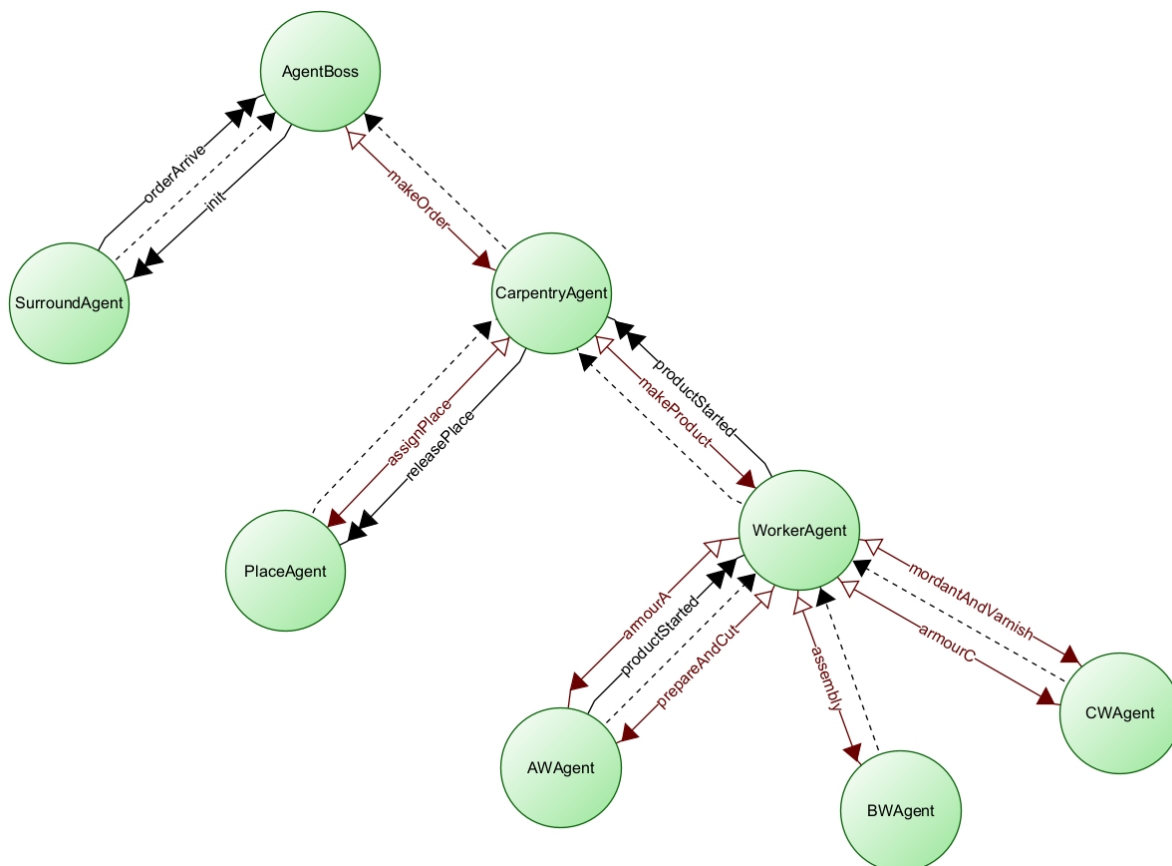
7.5.2025

1 Úvod

Táto práca sa venuje simulačnej štúdii prevádzky stolárskej dielne Najlepší nábytok, s.r.o., s cieľom nájsť efektívne a zároveň minimálne nastavenie počtu pracovníkov a montážnych miest pri splnení časového limitu 32 hodín na spracovanie objednávky. Obsahuje návrh a popis vytvoreného modelu, stratégiu montáže kovania, návrh animácie simulácie, stratégiu optimalizácie a sériu experimentov. Výsledkom je odporúčanie efektívnej konfigurácie systému, ktorá zaručuje plynulý chod výroby s čo najnižšími personálnymi nákladmi a taktiež aj nákladmi za pracovné miesta.

2 Simulačný model

Agentovo orientovaný model pre ABABuilder sa nachádza v adresári `data/` s názvom `model.xml`.



Obr. 1: Agentovo orientovaný model.

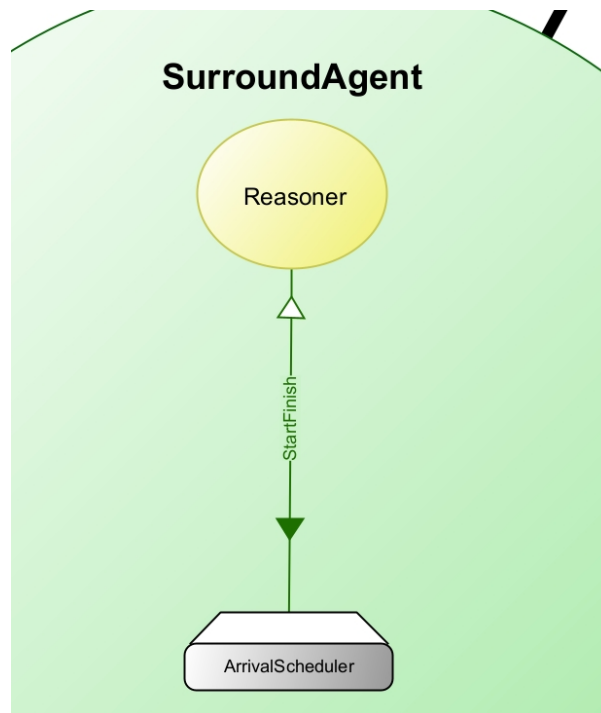
2.1 Popis agentov

AgentBoss

Hlavný agent modelu. Jeho manažér na začiatku simulácie posiela Notice správu **init** agentovi SurroundAgent, čím sa spúšťa plánovanie príchodov objednávok do systému. Po obdržaní správy **orderArrive** posiela Request správu **makeOrder** agentovi CarpentryAgent. Ten mu po ukončení výroby objednávky posiela Response správu.

SurroundAgent

Agent reprezentujúci okolie systému, z ktorého prichádzajú nové objednávky do systému. Má svojho manažéra a kontinuálneho asistenta ArrivalScheduler. Asistent posiela správy svojmu manažérovi o príchode nových objednávok v časových intervaloch generovaných z exponenciálneho rozdelenia. Po prijatí tejto správy manažérom notifikuje agenta AgentBoss správou **orderArrive**.



Obr. 2: SurroundAgent

CarpentryAgent

Tento agent zastrešuje celé dianie v dielni. Má svojho manažéra. Ten po prijatí správy **makeOrder** požiada správu **assignPlace** o pridelenie pracovného miesta pre každú položku objednávky agenta PlaceAgent. Po pridelení pracovného miesta pošle Request správu **makeProduct** agentovi WorkerAgent, ktorý mu odpovie Response správou po celej výrobe produktu. Po výrobe produktu manažér pošle Notice správu **releasePlace** na uvoľnenie pracovného miesta agentovi PlaceAgent a po výrobe posledného kusu z objednávky pošle Response správu agentovi AgentBoss o ukončení objednávky. Pri obdržaní správy **productStarted** vyradí prislúchajúcu objednávku zo zoznamu doposiaľ nezačatých objednávok, ak sa tam ešte nachádza (keďže položiek objednávky môže byť viac, tak ju vyradí prvá začatá položka).

PlaceAgent

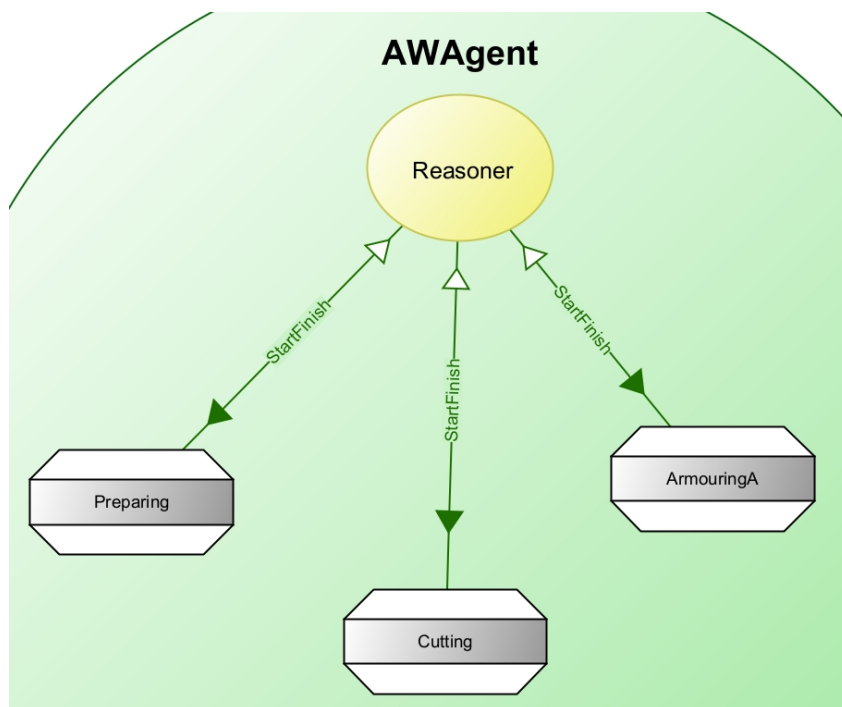
Agent zodpovedný za pridelenie a uvoľňovanie pracovných miest. Po prijatí požiadavky **assignPlace**, manažér prideli pracovné miesto s najnižším číslom ak je nejaké voľné a pošle Response správu späť agentovi CarpentryAgent, inak zaradí požiadavku do frontu na pracovné miesta. Keď manažér dostane správu **releasePlace**, uvoľní toto pracovné miesto, a ak je nejaká nespracovaná požiadavka, tak do nej rovno toto miesto prideli a pošle Response správu späť agentovi CarpentryAgent.

WorkerAgent

Zastrešujúci agent, ktorý je zodpovedný za výrobu každej položky objednávky, kde sa postupne posielajú požiadavky na jednotlivé kroky výroby jednotlivým agentom, ktorí to majú na starosti. Najskôr pošle požiadavku **prepareAndCut** agentovi AWAgent, po dokončení pošle požiadavku **mordantAndVarnish** agentovi CWAgent, a potom požiadavku **assembly** agentovi BWAgent. Ak ide o skriňu, tak sa ešte pošle požiadavka **armourC** najskôr agentovi CWAgent, ak nemá žiadneho voľného pracovníka, tak sa pošle požiadavka **armourA** agentovi AWAgent. Po vykonaní týchto požiadaviek je produkt hotový a manažér posielá Response správu **makeOrder** agentovi CarpentryAgent. Pri obdržaní Notice správy **productStarted** od agenta AWAgent túto správu len prepošle ďalej svojmu rodičovi (CarpentryAgent).

AWAgent

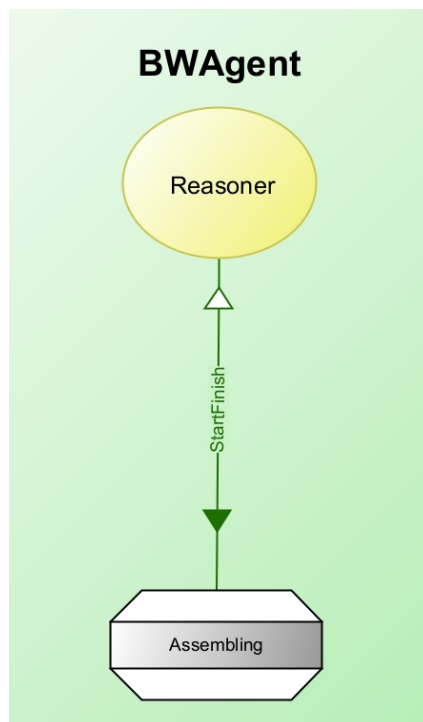
Agent ktorý zastrešuje pracovníkov A a ich prácu. Má svojho manažéra a procesy Preparing, Cutting, ArmouringA. Po obdržaní požiadavky **prepareAndCut**, ak je voľný pracovník, spustí proces Preparing (príprava) a zároveň odošle Notice správu **productStarted** svojmu rodičovi. Po tomto procese ihneď nasleduje proces Cutting (rezanie). Ak nie je voľný pracovník, tak zaradí požiadavku do prioritného frontu. Po skončení rezania posielá Response správu **prepareAndCut** agentovi WorkerAgent a zároveň ak je nejaká nespracovaná požiadavka v prioritnom fronte, tak ju spracuje (príprava+rezanie alebo montáž kovaní). Rovnaký princíp sa používa aj pri obdržaní požiadavky **armourA** s tým, že sa spustí proces ArmouringA (montáž kovaní).



Obr. 3: AWAgent

BWAgent

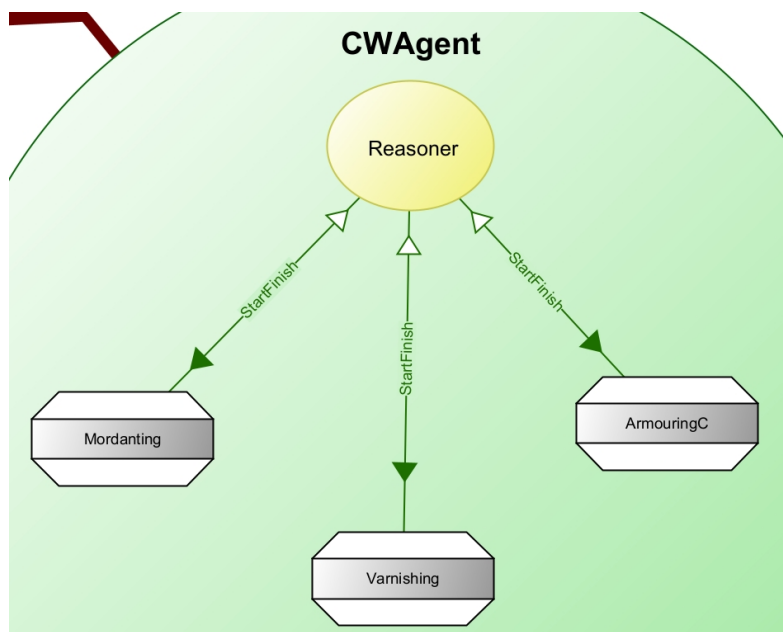
Agent zastrešujúci pracovníkov B a ich prácu. Má svojho manažéra a proces Assembling. Po obdržaní požiadavky **assembly**, ak je voľný pracovník, spustí proces Assembling (skladanie). Ak nie je voľný pracovník, tak zaradí požiadavku do prioritného frontu. Po skončení skladania posielá Response správu agentovi WorkerAgent a zároveň ak je nejaká nespracovaná požiadavka v prioritnom fronte, tak ju spracuje (spustí proces skladania).



Obr. 4: BWAgent

CWAgent

Agent ktorý zastrešuje pracovníkov C a ich prácu. Má svojho manažéra a procesy Mordanting, Varnishing, ArmouringC. Po obdržaní požiadavky **mordantAndVarnish**, ak je voľný pracovník, spustí proces Mordanting (morenie) a následne ihneď po ňom Varnishing (lakovanie) ak je potrebné (iba 15 % objednávok). Ak nie je voľný pracovník, tak zaradí požiadavku do prioritného frontu. Po skončení rezania posíla Response správu **mordantAndVarnish** agentovi WorkerAgent a zároveň ak je nejaká nespracovaná požiadavka v prioritnom fronte, tak ju spracuje (morenie+lakovanie). Pri obdržaní požiadavky **armourC** sa agent pozrie či má nejakého voľného pracovníka, ak áno tak spustí proces ArmouringC (montáž kovaní), inak posíla správu späť, aby tento úkon vykonala skupina pracovníkov A.



Obr. 5: CWAgent

3 Životný cyklus objednávky v systéme

Po príchode novej objednávky do systému pozostávajúcej z položiek, kde každá položka predstavuje konkrétny výrobok (skriňa, stôl alebo stolička), sa pre každú položku priradí pracovné miesto a následne sa spracuje.

Spracovanie položky prebieha v niekoľkých po sebe idúcich krokoch:

- **Príprava materiálu** – základná vstupná fáza, v ktorej sa zabezpečí prichystanie materiálu v sklade.
- **Rezanie** – rozrezanie materiálu podľa požiadaviek konkrétného výrobku.
- **Morenie** – aplikácia moridla pre zlepšenie estetického vzhľadu a ochrany.
- **Lakovanie** – voliteľný krok, ktorý sa vykoná len v 15 % prípadoch, podľa špecifikácie položky.
- **Skladanie** – fyzické zloženie komponentov do finálneho výrobku.
- **Montáž kovaní** – špeciálny krok, ktorý sa vykonáva len pre položky typu RACK (skriňa). Táto operácia prebieha podľa stratégie opísanej v ďalšej sekcii.

Po úspešnom vykonaní všetkých krokov sa považuje položka objednávky za dokončenú. Samotná objednávka je však ukončená až vtedy, keď sú spracované všetky jej položky. Tento mechanizmus zabezpečuje správne sledovanie stavu objednávky a umožňuje sledovanie priebehu výroby na úrovni jednotlivých položiek.

4 Implementácia

4.1 Stratégia pre montáž kovaní

Montáž kovaní sa vykonáva výhradne pre položky objednávky typu RACK (skriňa). Tento proces je špecifický tým, že môže byť vykonaný na dvoch rôznych pracoviskách v závislosti od aktuálnej dostupnosti pracovníkov.

Ako už bolo spomenuté vyššie, keď agent WorkerAgent zistí, že je potrebné vykonať montáž kovaní pre položku typu RACK, odošle správu agentovi CWAgent. Ak má CWAgent k dispozícii voľného pracovníka, montáž sa vykoná okamžite. V prípade, že všetci pracovníci agenta CWAgent sú momentálne obsadení, úloha sa presmeruje do agenta AWAgent, ktorý je schopný túto činnosť taktiež vykonať. Týmto spôsobom sa zabezpečuje plynulosť výrobného procesu aj pri dočasnej nedostupnosti špecializovaných kapacít.

Túto stratégiu som navrhol s ohľadom na očakávané zaťaženie pracovísk. Predpokladám, že pracovníkov typu C bude v systéme viac, keďže ich výrobné operácie sú časovo náročné. V dôsledku toho je vyššia pravdepodobnosť, že aspoň jeden pracovník C bude voľný v čase príchodu požiadavky na montáž. Na druhej strane, pracovníci typu A vykonávajú kratšie operácie, a tak je pravdepodobné, že aj keď sú pri príchode požiadavky zaneprázdnení, niektorý z nich čoskoro ukončí svoju aktuálnu činnosť a bude schopný montáž realizovať. Táto kombinácia prispieva k vyváženému a na môj pohľad efektívnemu rozdeleniu práce.

4.2 (Prioritný) front správ

Na zabezpečenie správneho poradia spracovania správ medzi agentmi sa v systéme využívajú prioritné fronty správ. Každá správa obsahuje referenciu na položku z objednávky (objekt typu Product), pričom prioritná správa sa určuje na základe atribútov tejto položky.

Porovnávanie správ prebieha v metóde `compareTo`, kde sa najskôr porovnávajú časy začiatku spracovania (`startTime`) jednotlivých produktov, čo reprezentuje čas príchodu objednávky do systému. V prípade rovnosti sa správy porovnávajú podľa času predchádzajúceho ukončenia výrobnéj fázy (`prevTime`). Tento spôsob zabezpečuje, že produkty, ktoré prišli skôr alebo boli skôr spracované, majú prednosť.

Tento prioritný front sa využíva v agentoch AWAgent, BWAgent a CWAgent, ktoré reprezentujú jednotlivé pracovné skupiny a ich činnosti. Vďaka tomu je zabezpečené korektné a konzistentné plánovanie výrobných operácií v závislosti od poradia spracovania.

Na druhej strane, agent PlaceAgent, ktorý zabezpečuje priradenie pracovných miest, využíva len obyčajný FIFO front správ. Dôvodom je, že správy k tomuto agentovi prichádzajú presne v takom poradí, v akom boli produkty vyrobené, a teda nie je potrebné ich triediť podľa priority.

4.3 Logovanie výsledkov

Výsledky simulácie sa zaznamenávajú do logovacieho súboru prostredníctvom mechanizmu presmerovania štandardného výstupu (stdout). Za túto funkcionálnu triedu `LoggerInitializer`, ktorej metóda `initLogging()` nastaví štandardný výstup aplikácie tak, aby smeroval do textového súboru. Názov výstupného súboru je dynamicky generovaný na základe aktuálneho dátumu v tvare `yyyy-MM-dd`, čím sa zabezpečuje oddelenie logov podľa dní. Súbor sa ukladá do adresára `logs` s názvom `out_YYYY-MM-DD.txt`, pričom výstup sa do súboru vždy pripája (append).

Tento prístup umožňuje jednoduché dohľadanie výstupov simulácií. Po vykonávaní viacerých replikácií simulácie sú do výstupného súboru zapísané základné informácie o konfigurácii a výsledky. Pre každý beh simulácie sa do logu zaznamenáva počet pracovníkov skupín A, B, C, počet pracovných miest, počet replikácií, použitý random seed a výpis vybraných štatistík. Tento výstup poskytuje prehľad o vykonaných experimentoch a umožňuje následné spracovanie výsledkov.

5 Animačné zobrazenie simulácie

Animačné zobrazenie poskytuje vizuálnu reprezentáciu priebehu simulácie výroby v dielni. Je navrhnuté tak, aby prehľadne zobrazovalo aktuálny stav všetkých kľúčových entít v reálnom čase a umožnilo sledovať dynamiku výrobného procesu.

Rozloženie priestoru - Pracovný priestor je rozdelený na dve hlavné časti:

- **Sklad** – umiestnený na pravej strane obrazovky. V tomto priestore sú na začiatku simulácie všetci pracovníci a odtiaľ sa presúvajú na pracovné miesta.
- **Pracovná plocha dielne** – obsahuje očíslované pracovné stoly, ktoré reprezentujú jednotlivé pracovné miesta. Stoly sú rozložené do mriežky.

Zobrazenie pracovníkov - Každý pracovník je reprezentovaný očíslovanou vizuálnou entitou spolu s jeho typom (A/B/C). Pohyb pracovníkov je animovaný, aby bolo možné vizuálne sledovať ich presun. Stav pracovníka je farebne odlíšený:

- **Zelená farba** – pracovník je voľný, momentálne nepracuje,
- **Červená farba** – pracovník aktuálne vykonáva činnosť.

Zobrazenie pracovných miest - Pracovné stoly sú očíslované a farebne označené podľa ich aktuálneho stavu:

- **Zelené miesto** – voľné, čaká na priradenie položky objednávky,
- **Červené miesto** – obsadené, priradená položka objednávky na ktorej sa pracuje.

Zobrazenie položiek objednávky - Počas simulácie sú v priestore vizualizované aj jednotlivé položky objednávky, pričom je možné sledovať ich aktuálny stav. Pre každú položku je zobrazená aktuálna fáza výroby.

Progres bar činností - Každá činnosť vykonávaná pracovníkom je doplnená vizuálnym indikátorom priebehu vo forme progres baru. Tento prvok umožňuje sledovať, ako dlho ešte bude konkrétna činnosť trvať.

Cieľ animačného zobrazenia - Hlavným cieľom animácie je umožniť používateľovi sledovať simuláciu v interaktívnej forme a lepšie pochopiť správanie systému, identifikovať úzke miesta vo výrobe, a vizuálne validovať logiku modelu.



Obr. 6: Rozloženie navrhnutého animátora.

6 Experimenty

Cieľom experimentov je nájsť optimálne nastavenie parametrov systému, konkrétne:

- počty pracovníkov v skupinách A, B a C,
- a počty pracovných miest.

Pri porovnávaní jednotlivých konfigurácií sa používa **počet replikácií 1000** a zafixovaný **random seed = 42**, aby boli výsledky reprodukovateľné a porovnateľné.

6.1 Kritériá optimalizácie

Cieľom optimalizácie je:

- **minimalizovať počet pracovníkov** – keďže ide o opakujúce sa prevádzkové náklady,
- **minimalizovať počet pracovných miest** – ako jednorazové fixné náklady,
- zabezpečiť, aby **priemerná doba vybavenia objednávky neprekročila 4 pracovné dni**, t. j. **32 pracovných hodín**.

Z pohľadu optimalizačnej stratégie je podľa mňa efektívnejšie najskôr optimalizovať počty pracovníkov, ktoré predstavujú pravidelné mzdové náklady, a až následne počet pracovných miest, ktoré sú fixné investície a typicky nie sú tak nákladovo citlivé na mierne zmeny.

6.2 Úvodný experiment

Ako počiatočný bod experimentovania bola zvolená konfigurácia:

pracovníci A/B/C = 50/50/100, pracovné miesta = 200

Štatistika	Priemer	Interval spoľ. 95%
Čas vyhotovenia obj. [h]	10.4183	< 10.4149, 10.4217 >
Vyťaženie prac. A [%]	9.6433	< 9.6322, 9.65452 >
Vyťaženie prac. B [%]	9.7200	< 9.7087, 9.7312 >
Vyťaženie prac. C [%]	38.4241	< 38.3792, 38.4690 >
Vyťaženie prac. miest [%]	23.3983	< 23.3711, 23.4255 >
Nezačaté objednávky	0.0	< 0.0000; 0.0000 >

Tabuľka 1: Výsledky simulácie pre konfiguráciu 50/50/100/200.

V tejto konfigurácii bolo pozorované, že všetky pracovné skupiny aj pracovné miesta sú relatívne málo vyťažené, pričom priemerná doba vybavenia objednávky bola približne 10,5 h. Táto konfigurácia teda predstavuje "minimálnu" možnú hodnotu pre priemerný čas vyhotovenia objednávky.

6.3 Optimalizácia počtu pracovníkov – fáza 1: Skupina B

Keďže skupina B spracováva fázy, ktoré sú nezávislé od predchádzajúcich krokov (za predpokladu, že skupiny A a C stíhajú svoju prácu včas), optimalizácia sa začína práve s touto skupinou. Jej počet pracovníkov má priamy vplyv na priechodnosť celého systému, a zároveň je výhodné začať optimalizáciu so zložkou, ktorá má minimálny počet závislostí v procese.

V ďalších experimentoch sa teda testujú rôzne počty pracovníkov v skupine B, pričom ostatné parametre zostávajú nezmenené, a sleduje sa vplyv na priemernú dobu vybavenia objednávky. V tabuľke pre porovnanie sa nachádza počet pracovníkov skupiny B, priemerný čas vybavenia objednávky a priemerné vyťaženie skupiny B.

Testované konfigurácie sú:

pracovníci A/B/C = 50/X/100, pracovné miesta = 200

Počet B	Čas [h]	Interval spoľ. 95%	Vyťaženie B [%]	Interval spoľ. 95%
3	390.8635	< 389.82795, 391.8991 >	99.6661	< 99.6619, 99.67023 >
4	188.1312	< 186.9867, 189.2756 >	99.5890	< 99.5824, 99.5956 >
5	18.5995	< 18.2438, 18.9552 >	96.7836	< 96.6929, 96.8743 >

Tabuľka 2: Výsledky simulácií pre konfigurácie 50/X/100/200.

Ako možno vidieť z tabuľky výsledkov experimentov, najnižší počet **pracovníkov skupiny B**, pri ktorom je ešte stále priemerná doba vybavenia objednávky nižšia ako 32 hodín, je **5**. Pre nižšie hodnoty už priemerný čas prekračuje výrazne definovanú hranicu a teda nespĺňa kritérium. Hodnota 5 tak predstavuje minimálne akceptovateľné nastavenie pre túto skupinu z pohľadu výkonnosti aj nákladov.

6.4 Optimalizácia počtu pracovníkov – fáza 2: Skupina C

Po zafixovaní počtu pracovníkov v skupine B na hodnotu 5, sa ďalšia fáza optimalizácie zameriava na skupinu C. Pracovníci tejto skupiny zodpovedajú za fázy morenia a lakovania – pričom lakovanie sa vykonáva len pre 15% objednávok, ale ide o časovo náročné procesy. Okrem toho, ako bolo uvedené vyššie, montáž kovaní sa najskôr vykonáva pracovníkmi skupiny C, a len v prípade ich nedostupnosti sa presúva na skupinu A.

Preto je dôležité, aby pracovníci skupiny C stíhali predovšetkým svoju hlavnú prácu, ktorou je morenie a lakovanie. Montáž kovaní je síce priradená najskôr im, avšak ak nie sú v danom momente dostupní, presúva sa tento úkon do skupiny A. Z toho dôvodu nie je nutné, aby pracovníci skupiny C stíhali aj montáž kovaní – ich primárnou úlohou ostáva vykonávať morenie a lakovanie v primeranom čase. Ak by ich bolo príliš málo, hrozí oneskorenie týchto kľúčových fáz výroby, čo by mohlo nepriamo ovplyvniť celkový čas vybavenia objednávky.

V tejto fáze sa teda pri zafixovaní hodnoty B = 5 hľadá minimálny počet pracovníkov skupiny C tak, aby bola zachovaná požiadavka na priemerný čas vybavenia objednávky pod 32 hodín.

Testované konfigurácie sú:

pracovníci A/B/C = 50/5/X, pracovné miesta = 200

Počet C	Čas [h]	Interval spoľ. 95%	Vyťaženie C [%]	Interval spoľ. 95%
20	474.6685	< 473.6823, 475.6546 >	99.8584	< 99.8551, 99.8617 >
30	211.8968	< 210.7480, 213.0456 >	99.7853	< 99.7798, 99.7908 >
40	18.7935	< 18.4547, 19.1322 >	94.2453	< 94.1525, 94.3382 >
39	19.6558	< 19.2971, 20.0145 >	96.3404	< 96.2492, 96.4317 >
38	24.9286	< 24.3784, 25.4788 >	98.0958	< 98.0269, 98.1648 >
37	40.0778	< 39.1791, 40.9765 >	99.1454	< 99.1068, 99.1839 >

Tabuľka 3: Výsledky simulácií pre konfigurácie 50/5/X/200.

Na základe experimentov možno konštatovať, že minimálny počet **pracovníkov skupiny C**, ktorý ešte spĺňa podmienku priemernej doby vybavenia objednávky kratšej než 32 hodín, je **38**. Pri tomto nastavení je zabezpečený dostatočný výkon v hlavných úlohách tejto skupiny (morenie a lakovanie).

6.5 Optimalizácia počtu pracovníkov – fáza 3: Skupina A

Poslednou optimalizačnou fázou je určenie minimálneho počtu pracovníkov skupiny A. Títo pracovníci zohrávajú kľúčovú úlohu už v počiatočných fázach výrobného procesu, konkrétne pri príprave materiálu a rezaní. Okrem toho sú zodpovední aj za montáž kovaní v prípadoch, keď nie je k dispozícii voľný pracovník zo skupiny C.

Z tohto dôvodu je ich pracovná záťaž ovplyvnená nielen objemom prichádzajúcich objednávok, ale aj aktuálnou dostupnosťou pracovníkov skupiny C. Ak skupina C nestíha montovať kovania, úloha prechádza práve na pracovníkov A, čo môže viesť k výraznému zvýšeniu ich vyťaženia.

Cieľom tejto fázy optimalizácie je preto nájsť taký minimálny počet pracovníkov skupiny A, ktorý zabezpečí plynulé zvládnutie ich hlavných úloh (príprava materiálu, rezanie) a zároveň dokáže absorbovať aj záťaž spôsobenú montážou kovaní bez prekročenia stanovenej hranice priemernej doby vybavenia objednávky (32 pracovných hodín).

Momentálne sú teda zafixované hodnoty $B = 5$ a $C = 38$ a testované konfigurácie sú:

$$\text{pracovníci A/B/C} = X/5/38, \text{ pracovné miesta} = 200$$

Počet A	Čas [h]	Interval spoľ. 95%	Vyťaženie A [%]	Interval spoľ. 95%
3	385.7097	< 384.6821, 386.7372 >	99.9517	< 99.9488, 99.9546 >
4	184.4585	< 183.2598, 185.6573 >	99.8994	< 99.8934, 99.9054 >
5	57.4355	< 56.3639, 58.5071 >	99.4887	< 99.4585, 99.5189 >
6	25.8418	< 25.2658, 26.4177 >	92.8490	< 92.7186, 92.9794 >

Tabuľka 4: Výsledky simulácií pre konfigurácie X/5/38/200.

Na základe experimentov možno skonštatovať, že minimálny počet pracovníkov skupiny A, ktorý zabezpečí splnenie kritéria priemernej doby vybavenia objednávky pod 32 hodín, je **6**. Hodnota 6 zároveň poskytuje určitú rezervu pre optimalizáciu počtu pracovných miest.

6.6 Optimalizácia počtu pracovných miest

Po optimalizácii počtu pracovníkov v jednotlivých skupinách ($A = 6$, $B = 5$, $C = 38$) nasleduje posledná fáza experimentu – optimalizácia počtu pracovných miest. Tieto predstavujú fixné náklady a nemajú priamy vplyv na pravidelné výdavky, ako je to v prípade pracovníkov, preto sú optimalizované až v závere.

Cieľom tejto fázy je zistiť najnižší možný počet pracovných miest, ktorý umožní, aby pracovníci mohli bez výrazného zdržania vykonávať svoje činnosti a zároveň bola zachovaná požadovaná úroveň výkonnosti systému. Ako hodnotiace kritérium sa používa priemerná doba vybavenia objednávky menšia ako 32 hodín ako aj v predošlých optimalizáciach, pri 1000 replikáciách a s použitím fixného random seed 42.

V tejto fáze sú už zafixované hodnoty pre všetky pracovné skupiny a testované konfigurácie sú:

$$\text{pracovníci A/B/C} = 6/5/38, \text{ pracovné miesta} = X$$

Počet p.m.	Čas [h]	Interval spoľ. 95%	Vyťaženie p.m. [%]	Interval spoľ. 95%
50	57.4310	< 56.3826, 58.4794 >	96.1033	< 96.0736, 96.1329 >
60	28.9318	< 28.2568, 29.6068 >	93.0414	< 92.9247, 93.1581 >
59	28.5442	< 27.8796, 29.2088 >	93.2623	< 93.1501, 93.3746 >
58	29.0815	< 28.4158, 29.7472 >	93.5760	< 93.4734, 93.6786 >
57	30.3207	< 29.5857, 31.0557 >	93.9214	< 93.8249, 94.0180 >
56	32.4366	< 31.6954, 33.1779 >	94.3678	< 94.2847, 94.4510 >

Tabuľka 5: Výsledky simulácií pre konfigurácie 6/5/38/X.

Z týchto experimentov vyplýva, že optimálny počet pracovných miest pri ktorom je splnené kritérium 32 hodín je **57**.

6.7 Podrobné výsledky simulácie

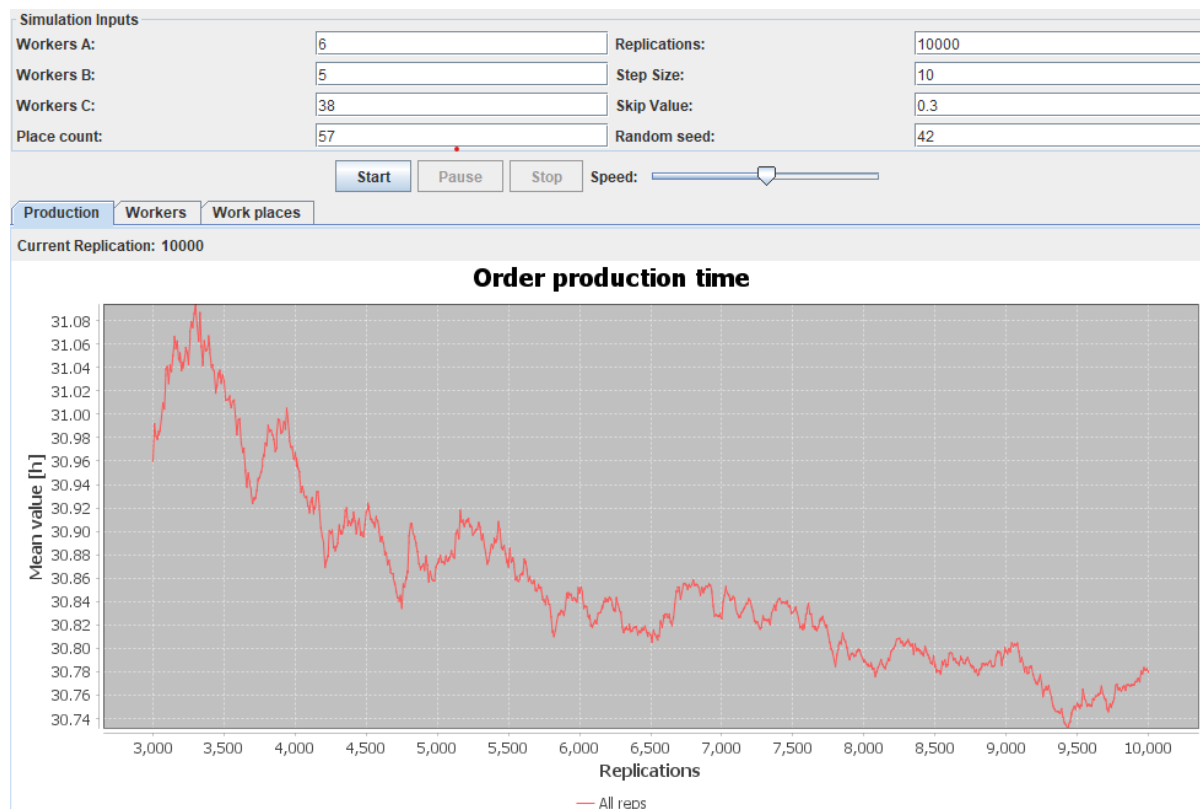
Na záver bola vykonaná rozsiahlejšia simulácia s cieľom overiť správanie systému pri optimalizovaných parametroch. Pre túto simuláciu boli použité nasledovné parametre získané aj z predošlých experimentov:

- Počet pracovníkov skupiny A: **6**
- Počet pracovníkov skupiny B: **5**
- Počet pracovníkov skupiny C: **38**
- Počet pracovných miest: **57**
- Počet replikácií: **10 000**
- Random seed: **42**

Cieľom tejto simulácie je poskytnúť presnejší pohľad na výkonnosť systému pri dlhodobom nasadení. Výsledky boli spracované do tabuliek a zahŕňajú okrem priemernej doby vybavenia objednávky aj ďalšie štatistické ukazovatele.

Štatistika	Min	Max	Priemer	Interval spoľ. 95%
Čas vyhotovenia obj. [h]	13.5480	91.0136	30.7796	< 30.5543, 31.0050 >
Vyťaženie prac. A [%]	83.1748	92.9663	90.2994	< 90.2726, 90.3263 >
Vyťaženie prac. B [%]	90.9872	97.6465	95.7782	< 95.7595, 95.7969 >
Vyťaženie prac. C [%]	92.9583	99.2504	97.7781	< 97.7603, 97.7959 >
Vyťaženie prac. miest [%]	86.0591	96.1959	94.0071	< 93.9783, 94.0360 >
Nezačaté objednávky	4.5332	166.5843	38.9405	< 38.4802, 39.4009 >
Počet prijatých obj.	3788	4237	3984.50	< 3983.26, 3985.74 >
Počet ukončených obj.	3737	4051	3899.42	< 3898.64, 3900.21 >

Tabuľka 6: Výsledky simulácie pre konfiguráciu 6/5/38/57 s 10 000 replikáciami.



Obr. 7: Graf ustáľovania hodnoty pre priemerný čas vyhotovenia objednávky.

Pracovník	Priemer [%]	Interval spoľ. 95%
Skupina A		
1	90.3083	< 90.2812, 90.3354 >
2	90.3052	< 90.2782, 90.3323 >
3	90.3010	< 90.2740, 90.3281 >
4	90.2989	< 90.2718, 90.3259 >
5	90.2938	< 90.2667, 90.3208 >
6	90.2895	< 90.2624, 90.3165 >
Skupina B		
1	95.7915	< 95.7727, 95.8103 >
2	95.7856	< 95.7668, 95.8045 >
3	95.7778	< 95.7590, 95.7966 >
4	95.7707	< 95.7518, 95.7896 >
5	95.7654	< 95.7465, 95.7842 >
Skupina C		
1	97.8657	< 97.8474, 97.8840 >
2	97.8750	< 97.8567, 97.8933 >
3	97.8754	< 97.8571, 97.8937 >
4	97.8766	< 97.8582, 97.8949 >
5	97.8776	< 97.8593, 97.8960 >
6	97.8684	< 97.8501, 97.8866 >
7	97.8613	< 97.8431, 97.8795 >
8	97.8536	< 97.8353, 97.8718 >
9	97.8460	< 97.8276, 97.8643 >
10	97.8393	< 97.8209, 97.8577 >
11	97.8388	< 97.8205, 97.8571 >
12	97.8302	< 97.8119, 97.8485 >
13	97.8257	< 97.8074, 97.8439 >
14	97.8217	< 97.8034, 97.8400 >
15	97.8105	< 97.7922, 97.8288 >
16	97.8076	< 97.7893, 97.8258 >
17	97.7995	< 97.7811, 97.8178 >
18	97.7967	< 97.7784, 97.8149 >
19	97.7862	< 97.7679, 97.8045 >
20	97.7780	< 97.7597, 97.7962 >
21	97.7751	< 97.7567, 97.7934 >
22	97.7684	< 97.7501, 97.7866 >
23	97.7595	< 97.7413, 97.7778 >
24	97.7523	< 97.7340, 97.7706 >
25	97.7460	< 97.7278, 97.7643 >
26	97.7412	< 97.7230, 97.7594 >
27	97.7328	< 97.7144, 97.7511 >
28	97.7252	< 97.7070, 97.7434 >
29	97.7165	< 97.6983, 97.7348 >
30	97.7105	< 97.6923, 97.7287 >
31	97.6979	< 97.6795, 97.7163 >
32	97.6945	< 97.6761, 97.7128 >
33	97.6848	< 97.6664, 97.7032 >
34	97.6821	< 97.6639, 97.7003 >
35	97.6740	< 97.6557, 97.6922 >
36	97.6657	< 97.6474, 97.6841 >
37	97.6572	< 97.6389, 97.6756 >
38	97.6510	< 97.6327, 97.6693 >

Tabuľka 7: Vyťaženie pracovníkov jednotlivých skupín pre konfiguráciu 6/5/38/57.

P.m.	Priemer [%]	Interval spol. 95%	P.m.	Priemer [%]	Interval spol. 95%
1	95.4477	< 95.4378, 95.4575 >	30	94.4010	< 94.3777, 94.4243 >
2	95.4345	< 95.4244, 95.4447 >	31	94.3266	< 94.3023, 94.3510 >
3	95.4206	< 95.4105, 95.4307 >	32	94.2534	< 94.2279, 94.2789 >
4	95.4036	< 95.3932, 95.4140 >	33	94.1725	< 94.1459, 94.1991 >
5	95.3825	< 95.3720, 95.3930 >	34	94.0905	< 94.0626, 94.1184 >
6	95.3661	< 95.3555, 95.3768 >	35	94.0038	< 93.9745, 94.0330 >
7	95.3375	< 95.3266, 95.3483 >	36	93.9142	< 93.8838, 93.9446 >
8	95.3187	< 95.3075, 95.3298 >	37	93.8167	< 93.7848, 93.8486 >
9	95.2942	< 95.2828, 95.3056 >	38	93.7197	< 93.6861, 93.7534 >
10	95.2672	< 95.2556, 95.2788 >	39	93.6082	< 93.5731, 93.6433 >
11	95.2466	< 95.2347, 95.2584 >	40	93.5045	< 93.4676, 93.5414 >
12	95.2143	< 95.2022, 95.2265 >	41	93.3791	< 93.3405, 93.4177 >
13	95.1911	< 95.1786, 95.2035 >	42	93.2596	< 93.2191, 93.3001 >
14	95.1581	< 95.1452, 95.1710 >	43	93.1353	< 93.0932, 93.1774 >
15	95.1284	< 95.1152, 95.1415 >	44	93.0109	< 92.9666, 93.0551 >
16	95.0967	< 95.0832, 95.1103 >	45	92.8767	< 92.8301, 92.9232 >
17	95.0647	< 95.0508, 95.0787 >	46	92.7333	< 92.6850, 92.7817 >
18	95.0273	< 95.0128, 95.0417 >	47	92.5876	< 92.5367, 92.6386 >
19	94.9908	< 94.9758, 95.0058 >	48	92.4403	< 92.3873, 92.4934 >
20	94.9493	< 94.9338, 94.9648 >	49	92.2794	< 92.2240, 92.3347 >
21	94.9078	< 94.8917, 94.9239 >	50	92.1163	< 92.0583, 92.1742 >
22	94.8607	< 94.8440, 94.8773 >	51	91.9475	< 91.8870, 92.0081 >
23	94.8121	< 94.7948, 94.8294 >	52	91.7769	< 91.7139, 91.8399 >
24	94.7575	< 94.7395, 94.7756 >	53	91.5892	< 91.5233, 91.6550 >
25	94.7079	< 94.6891, 94.7268 >	54	91.4016	< 91.3330, 91.4703 >
26	94.6489	< 94.6292, 94.6686 >	55	91.2070	< 91.1355, 91.2785 >
27	94.5941	< 94.5737, 94.6145 >	56	91.0137	< 90.9390, 91.0883 >
28	94.5371	< 94.5159, 94.5583 >	57	90.8067	< 90.7290, 90.8843 >
29	94.4719	< 94.4496, 94.4941 >			

Tabuľka 8: Vyťaženie pracovných miest pre konfiguráciu 6/5/38/57.

7 Záver

Na základe analýzy zadania som určil stratégiu montáže kovania a zároveň postup optimalizácie. V rámci tohto postupu som najskôr optimalizoval počet pracovníkov a až následne počet pracovných miest.

Výsledky simulácií potvrdzujú, že takto zvolená stratégia mi umožňuje udržať čas potrebný na vyhotovenie jednej objednávky pod stanoveným limitom 32 hodín, čo zodpovedá 4 pracovným dňom. Priemerný čas vyhotovenia objednávky dosiahol hodnotu 30.7796 hodín s 95% intervalom spoľahlivosti (30.5543, 31.0050).

Využitie pracovníkov v jednotlivých skupinách sa pohybovalo priemerne v rozmedzí 90% až 98%, pričom najviac vyťažená bola skupina C. V prípade pracovných miest sa priemerné využitie pohybovalo na úrovni 94%. Priemerný počet nezačatých objednávok v systéme bol približne 39.

V priebehu simulovaného obdobia (249 pracovných dní) bolo prijatých v priemere 3984 objednávok, z ktorých sa podarilo dokončiť 3900. Tieto hodnoty potvrdzujú stabilitu a efektivitu systému pri dodržaní požadovaných časových limitov.

Na základe výsledkov simulácií som určil optimálne nastavenie systému na 6 pracovníkov v skupine A, 5 pracovníkov v skupine B a 38 pracovníkov v skupine C, pričom systém využíva 57 pracovných miest. Táto konfigurácia zabezpečuje rovnomerné zaťaženie pracovných zdrojov a stabilný tok výroby.

Na základe týchto výsledkov môžem konštatovať, že mnou navrhnutá stratégia je vhodná pre optimalizáciu výroby – zabezpečuje vyvážené využitie ľudských aj technických kapacít, minimalizuje počet oneskorených objednávok a umožňuje dodržať stanovený časový rámec spracovania objednávky.