



# Modelování a simulace

## **Diskrétní model výrobního procesu (SHO)**

Téma č.8

7. prosince 2020

Michal Šedý (xsedym02)  
Ondřej Pavlacký (xpavla15)

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Autoři a zdroje	1
1.2	Ověřování validity	1
<b>2</b>	<b>Rozbor tématu a použitých metod/technologií</b>	<b>1</b>
2.1	Použité postupy	2
2.2	Popis původu použitých metod/technologií	2
<b>3</b>	<b>Koncepce modelu</b>	<b>2</b>
3.1	Popis konceptuálního modelu	2
3.2	Forma konceptuálního modelu	3
<b>4</b>	<b>Architektura simulačního modelu</b>	<b>3</b>
4.1	Mapování konceptuálního modulu do simulačního modelu	3
4.2	Spouštění simulačního modelu	3
<b>5</b>	<b>Podstata simulačních experimentů a jejich průběh</b>	<b>3</b>
5.1	Postup experimentování	4
5.2	Experimenty	4
5.2.1	Experiment 1	4
5.2.2	Experiment 2	5
5.2.3	Experiment 3	6
5.3	Závěry experimentů	6
<b>6</b>	<b>Shrnutí simulačních experimentů a závěr</b>	<b>6</b>
<b>A</b>	<b>Petriho síť</b>	<b>8</b>

# 1 Úvod

Cílem této práce je navrhnout a implementovat diskrétní model simulace[1, snímek 7, 119] výrobního procesu[1, snímek 121] pro firmu SEDMA, která se zaměřuje na výrobu venkovních lavic a setů. Pomocí simulace[1, snímek 8] jsme schopni ověřit efektivitu práce a následně také simulkačními experimenty[1, snímek 33] zjistit, jestli jsme schopni zkoumaný výrobní proces optimalizovat[1, snímek 43]. Simulace nám dovoluje měnit okolnosti výroby a experimentovat bez nutnosti změn v reálném životě (například nákup nových strojů, nebo změny výrobních postupů a strageí). Další velkou výhodou je možnost simulovat delší časové úseky, které bychom museli složitě evidovat a porovnávat.

## 1.1 Autoři a zdroje

Projekt byl vypracován Ondřejem Pavlackým a Michalem Šedým.

Statistiky a výrobní procesy jsme konzultovali s panem Oldřichem Sušklebem, jedním ze spoluzakladatelů firmy a také čerpali z více než roční brigádnické zkušenosti jednoho z členů týmu (Ondřej Pavlacký).

Při implementaci a návrhu abstraktního modelu[1, snímek 41] byly použity materiály[1] a příklady poskytnuté v kurzu Modelování a simulace (IMS).

## 1.2 Ověřování validity

Při ověřování validity[1, snímek 37] byly výsledky konzultovány s mistrem ve výrobě (pan Sláma) a stálým pracovníkem (pan Pislcajt). Validace rychlosti a zmetkovitosti výrobního procesu byla ověřena na základě dat naměřených a získaných během brigádnické činnosti a také poskytnutých statistik z historie provozu. Vzhledem k tomu, že za dobu vedení statistik se nezměnily stroje ani postupy, bereme data za směrodatná.

# 2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Každý den, ještě před začátkem pracovní doby přijede materiál, ze kterého se lavice vyrábí. Každé ráno si pracovníci ze skladu donesou potřebný materiál k pracovní stanici. Firma zaměstnává 9 zaměstnanců - 4 tesaře a 5 zámečnicků. Pracuje se na jednosměnný provoz 8 hodin denně. Tesaři zpracovávají prkna, která přišla. Jedná se o surové dřevo, tudíž je nutná povrchová úprava. Dřevo může být porušené od dodavatele a nebo ho zaměstnanec zničí přípravou na lakování. Tudíž na to může přijít hned, nebo klidně až na konci procesu. Při chybě mu trvá zhruba dalších 10 minut dřevo odepsat a zapsat vadu. Po úspěšné přípravě je dřevo lakováno. Tento proces trvá mezi 30 až 60 minutami. Barva se nechává schnout celý den a pokud správně nezaschne musí se obrousit a přelakovat. Tento proces je časově velmi náročný a trvá mezi 1 až 1,5 hodinou. Správně nalakované dřevo je připravené ke kompletaci. Zámečníci musí nařezat kovové tyče a pláty pomocí strojů, které tlakem nařezou kovy na požadované rozměry. Po nařezání je potřeba surové kovy vylisovat do požadovaných tvarů (obvykle se jedná o ohnuté rohy). Proces řezání a lisování jedné kovové součástky trvá přibližně 20 sekund. Lisy a řezačky mají poruchy rozdělené na lehké a závažné s různou dobou opravy. Při lehkých chybách stroj opraví pracovník, ale při závažné poruše musí přijít mistr a dohlížet na opravu stroje. Po vylisování je kovový materiál svařen dohromady v kovovou stojku, tento proces zabere zámečnickovi kolem 20 až 35 minut. K vytvoření jedné stojky jsou potřeba dva tlusté ohnuté pláty, tři plechy a jedna tyč. Při svařování může dojít k chybě, ale ta se opravuje převařením svárů, které trvá 35 až 40 minut. Tudíž nedochází ke ztrátě materiálu. Pokud je hotové aspoň jedno dřevo a dvě stojky může se lavice skompletovat. K desce jsou přišroubovány stojky a pokud by se náhodou lavice pokazila, odepíše se pouze dřevo. Při kompletaci se využívají také zámky. Jedná se o malé pozinkované součástky, které drží vzpěry lavičky zacvaknuté při složení. Montáž zámků na desku trvá přibližně 5 minut. Ze statistik vychází že při kompletaci laviček jsou rychlejší a o něco zručnější zámečníci, kteří jsou schopní složit lavičku i o půl hodinu rychleji. Po kompletaci se nakládají hotové lavičky do dodávky. Dodávka je značky Ford Transit<sup>1</sup> modelová řada 2005. Do dodávky se vejde 20 lavic. Dodávka

---

<sup>1</sup>[http://dashboard-light.com/vehicles/Ford\\_Transit.html](http://dashboard-light.com/vehicles/Ford_Transit.html)

odjíždí pouze při plné kapacitě. Veze hotové lavice do skladu vykupující třetí strany, nebo zákazníka. Cesta dodávky trvá 2 hodiny. Auto může odjet i na konci pracovní doby.

## 2.1 Použité postupy

Model je implementován v jazyce C++ s použitím simulační knihovny SIMLIB<sup>1</sup>.

Knihovna SIMLIB je speciálně určena k vytváření simulací a získávání dat o procesech, které jsou simulovány po předem určenou dobu.

Pro abstrakci modelu bylo vytvořeno schéma Petriho sítě[1, snímek 123].

## 2.2 Popis původu použitých metod/technologií

Pro zlepšení organizace kódu bylo použito objektově orientované programování a klasifikace do tříd v jazyce C++<sup>2</sup>.

Veškerá kompilace probíhala na serveru merlin s pomocí GNU<sup>3</sup> kompilátoru a externí knihovny SIMLIB. Tato knihovna byla představena studentům v kurzu Modelování a simulace. Autoři: Petr Peringer, David Leska a David Martinek. Byla využita k simulaci procesů a času.

Pro úpravu byly použity textové editory VIM<sup>4</sup>, Visual Studio Code<sup>5</sup> a Sublime Text<sup>6</sup>, které nám výrazně zjednodušili práci s kódem.

## 3 Koncepte modelu

Konceptuální model[1, snímek 48] zjednodušuje (zanedbává) určité aspekty reálného systému. Tato kapitola prezentuje konkrétní zjednodušení při výrobě lavíček.

Z kapitoly 2 přejímá veškeré definované kontanty (počty zaměstnanců, času obsluh atd.).

Materiál je do skladu přivezen a uskladněn dodavatelem. Tudíž není nutné modelovat logistiku spojenou s dovozem materiálu. Objemy dodávek jsou řízeny vedoucím provozu, tudíž se nestane aby zaměstnanci byli bez materiálu. Zámky, které jsou zmíněny v kapitole 2, není nutné modelovat, protože se ještě nikdy nestalo že by jich byl nedostatek. Tudíž stačí pouze přidat čas na přivrtání k desce při kompletaci.

Pokud má zaměstnanec rozpracovanou práci, vždy ji dokončí. Mohlo by se například stát, že by odešel od lakování, tudíž zůstane přesčas a svůj úkol dokončí. Žádný úkolů není tak časově náročný (maximální doba přesčasu je 2 hodiny), aby zaměstnanec neodešel z práce domů do začátku nové směny.

### 3.1 Popis konceptuálního modelu

Model je rozdělen na několik logických celků, V hlavní větvi je symbolizován přenos materiálu ke stroji. Následně jsou materiální zpracovány stříháním na požadované kusy a lisovány. Zpracováváme tři druhy kovových surovin, tudíž jsou tři podobné větve, které se nakonec spojí v bodě svařování při požadovaném počtu kovových komponent (2 hrubé plechy, 3 tenké plechy a 1 prut) a vznikne stojka. V druhé části je modelována vykládka dřeva, jeho následné opracování a nalakování. Dřevo pak čeká den než zaschne barva a je poté (pokud nenastala chyba schnutí laku) připraveno na smontování. Firma funguje jako manufaktura, tudíž u každé práce je potřeba alespoň jeden; zaměstnanec, tudíž jsou modelovány skupiny zaměstnanců přiřazovaných k jednotlivým úkolům. U téměř každého stroje může nastat chyba, které je opravována různě dlouho (záleží na závažnosti). U manuálních činností existuje pravděpodobnost zničení materiálu, který je znehodnocen a následně vyřazen. Práce na materiálech je modelována uniformním rozložením[1, snímek 89]. Zaměstnanci

<sup>1</sup><https://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>

<sup>2</sup><https://www.cplusplus.com/>

<sup>3</sup>[https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc-3.3.6/gcc/G\\_002b\\_002b-and-GCC.html](https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc-3.3.6/gcc/G_002b_002b-and-GCC.html)

<sup>4</sup><https://www.vim.org/>

<sup>5</sup><https://code.visualstudio.com/>

<sup>6</sup><https://www.sublimetext.com/>

stíhají práci vždy v určitém časovém rozmezí. Třetí částí je modelování auta a procesu naložení hotových produktů závozníkem, tudíž nejsou zaneprázdněni ostatní zaměstnanci. Zohledněna je také cesta a poruchovost auta (která je modelována exponenciálním [1, snímek 91] rozdělením jednou za 5 let). V poslední části je modelována pracovní doba zaměstnanců (8 hodin práce, 16 volno).

### 3.2 Forma konceptuálního modelu

Pro vizualizaci modelu jsme použili Petriho síť **A**

## 4 Architektura simulačního modelu

Modelovým časem [1, snímek 21] jsou zvoleny sekundy. Nastaveny jsou také další globální konstanty pro zjednodušení práce s časem. Standardně je nastavená doba simulace na jeden týden. V případě potřeby je možné změnit délku simulace v globálních proměnných.

Při spuštění simulačního modelu [1, snímek 44] se spustí experiment s parametry zadanými v hlavičkové souboru `systemVar.hpp`. Po dokončení simulace jsou výsledky zobrazeny na standardní výstup. Je zobrazeno kolik lavic se vyrobilo a potřebných materiálů spotřebovalo. Důležitým výsledkem simulace je také množství materiálu, které se během výrobního procesu znehodnotilo a bylo nutné vyhodit. Jsou zobrazeny doby čekání a fronty ke zpracování materiálu. Informace o jednotlivých strojích a průměrné doby práce.

### 4.1 Mapování konceptuálního modulu do simulačního modelu

Pracovní hodiny jsou událost [1, snímek 169], která kontroluje pracovní dobu. V simulačním modelu jí odpovídá třída `WorkingHours`. Generování materiálu je v třídách `Generator`. Zaměstnanci si chodí do skladu pro materiály v procesu `getGoodsFromTruck`. Získané kovy se zpracovávají na 3 různých strojích, které jsou modulárně implementovány jednou třídou a to třídou `Machine`. Dřevo se opracovává v třídě `woodPrepare`, následně barví v `woodPaint` a hotové dřevo je ve třídě `woodReady`. O počtu kovů je informovaný `assemblyController` který při správném počtu spustí proces svařování `welding`. Po svaření se generuje stojka a při správném počtu stojek a hotových deskách se generuje proces `assmebling`

### 4.2 Spouštění simulačního modelu

Makefile se nachází ve složce `src` i spustitelný soubor.

Při prvním spuštění a při změnách metrik v `systemVar.hpp` je potřeba přeložit projekt `make` a `make run`

Spuštění simulace se provádí příkazem `make run`. Pokud není změněn hlavičkový soubor s konstantami je simulace spuštěna s daty získanými z provozu a délkou simulace 1 týden.

Pro vyzkoušení různých výsledků simulace použijte vlastní hodnoty v konstantách v dříve zmíněném hlavičkovém souboru.

Při změně konstant soubor znovu přeložte pomocí `make clean, make` a `make run`

## 5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Experimenty byly prováděny pro časový interval 1 roku. Nejdůležitější jsou hodnoty vyrobených lavíček. Mezi další sledované hodnoty patří zmetkovitost, hromadění zbytečného materiálu na skladě a vytíženosti linek. Podle výsledků experimentů zkusíme experimentovat s limity provozu a následně hledat slabá místa a následně je zkusit optimalizovat.

## 5.1 Postup experimentování

Spustíme simulaci a necháme ji s danými parametry proběhnout. Výsledky zapíšeme a vyhodnotíme postup a změnu konstant pro další experiment a porovnáme rozdíly spolu s výhodami a nevýhodami zvoleného postupu.

## 5.2 Experimenty

### 5.2.1 Experiment 1

První experiment má za úkol ověřit validitu modelu. Používáme data, které nám byla poskytnuta a bereme jako výchozí bod a podle jeho výsledků budeme upravovat další experimenty.

Dřevaři	Zámečníci	Doba	<b>Hotové lavičky</b>
4	5	1 rok	6 449

Hotové pláty	Hotové plechy	Hotové pruty	Hotové desky
1893	16856	5054	6 941

Zničené pláty	Zničené plechy	Zničené pruty	Zničené desky
4	5	1 rok	355

Experimentem jsme zjistili že je model validní na základě poskytnutých dat od firmy.

### 5.2.2 Experiment 2

Cílem druhého experimentu je zjistit limity provozu - navýšili jsme příjem kovů a zrušili omezení přiděleného materiálu na den

Dřevaři	Zámečníci	Doba	<b>Hotové lavičky</b>
4	5	1 rok	5 950

Hotové pláty	Hotové plechy	Hotové pruty	Hotové desky
28401	74152	50932	6 969

Zničené pláty	Zničené plechy	Zničené pruty	Zničené desky
10661	29173	12453	350

Výsledkem experimentu s neřízenou organizací práce a téměř nevyčerpatelnými zdroji kovu vyplývá, že efektivita výroby laviček klesne o 8%. Pokud jsme snížili zámečnickům kompletace laviček, tak se jejich produkce mnohonásobně sníží, ale produkce časově nenáročných kovových dílů strmě vzroste.

### 5.2.3 Experiment 3

V tomto experimentu jsme se pokusili koupit lepší stroj, který by měl menší poruchovost a rychleji by řezal kovy. Starý stroj měl pravděpodobnost lehké poruchy 4% - oprava trvá 30s a šance na těžkou poruchu je 1% - opravuje se 5 minut

Minimální doba pro nařezání dlouhého plátu na stroji je 2050 sekund

U nového stroje je pravděpodobnost lehké chyby 1% - oprava 30s a šance těžké poruchy je pravděpodobnost 0,25%, stroj je rychlejší a zvládne nařezat velký plát za 1435 sekund

Střední doba obsluhy [s]	Směrodatná odchylka [s]
2897	415

Tabulka 1: Starý stroj

Střední doba obsluhy [s]	Směrodatná odchylka [s]
1663	226

Tabulka 2: Nový stroj

Zakoupením nové řezačky materiálů jsme schopni zrychlit proces řezání o 43% a snížit chybovost o 75%

### 5.3 Závěry experimentů

Bylo provedeno 7 experimentů, jeden z nich byl ověření validity modelu, kterou jsme potvrdili.

Nečekaně nejvíce proces urychlí nákup nových strojů, protože poměr zaměstnanců oproti poměru materiálu je vyvážený, ale s novou řezačkou jsme schopni proces řezání zrychlit a snížit chybovost, tudíž i snížit náklady na spotřebovaný materiál, chybovost při řezu klesne 75%.

Při navýšení pracovní síly se počet vyrobených laviček se téměř nezmění, protože stroje jsou obsazené a dřevo musí aspoň den schnout, tudíž existuje prodleva kdy větší množství zaměstnanců nemá práci.

Experimenty s navýšením příjmu materiálu jsou neefektivní a nemají žádný kladný vliv. Pouze se hromadí obrovské množství materiálu ve skladu.

## 6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Simulačními experimenty jsme potvrdili, že nejefektivnějším způsobem optimalizace je řízení provozu mistrem, kdy zaměstnanci nedělají práci, která není potřeba. Při volném průběhu zaměstnanci vykazují horší výsledky přibližně o 8%.

Nejlépeších výsledků jsme dosahovali při zakoupení nové řezačky a následně i nového lisu. Změna počtu zaměstnanců neměla z hlediska zrychlení práce smysl. Poměr zaměstnanců k počtu materiálu je vyvážený.

Vytvořený nástroj byl konzultován s vedoucím provozu a následně na něm byly vyzkoušeny způsoby změny provozu.

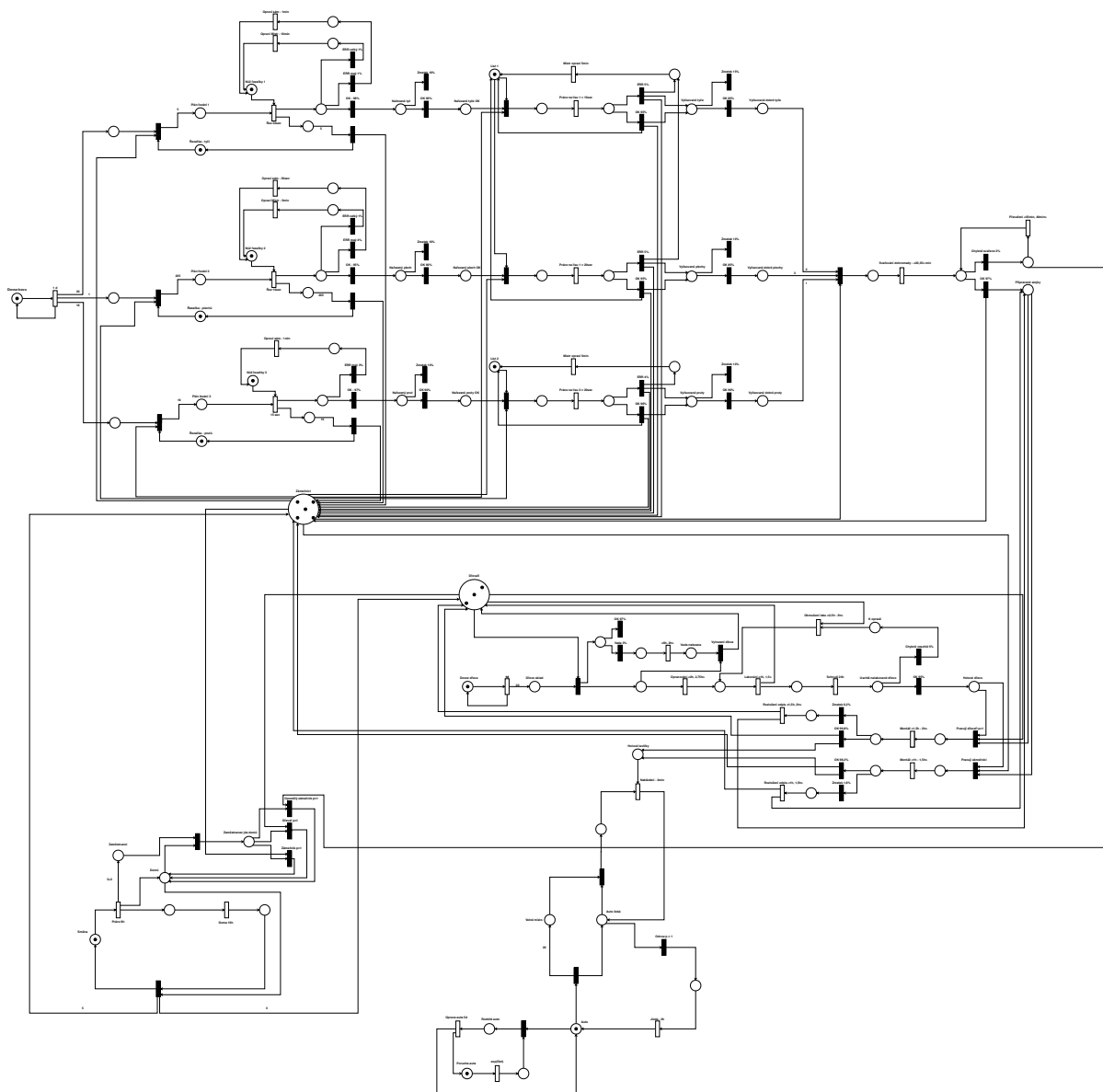
Výsledný nástroj simuluje výrobní proces firmy SEDMA. Program je implementován v jazyce C++ za použití simulační knihovny SIMLIB a jeho parametry jsou volitelné a měnitelné. Výstupem programu jsou statistické informace o výrobním procesu za určitý čas.



## Literatura

- [1] Peringer, P.; Hrubý, M.: Modelování a simulace, Text k přednáškám předmětu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. 21. září 2020. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>

## A Petriho síť



Obrázek 1: Petriho síť