



FAKULTA STROJNÍ

Ústav řízení a ekonomiky podniku

**Simulace a optimalizace
výrobního procesu olejových tanků**

**Simulation and Optimization
of the Oil Tank Production Process**

**Diplomová práce
2022**

**Vedoucí diplomové práce:
Ing. Pavel Scholz**

**Vypracoval:
Bc. Jan Prouza**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prouza** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **467347**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**
Studijní program: **Řízení průmyslových systémů**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Simulace a optimalizace výrobního procesu olejových tanků

Název diplomové práce anglicky:

Simulation and Optimization of the Oil Tank Production Process

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod – zdůvodnění zadání, cíle a úkoly práce
2. Teoretická část – výrobní management, simulace a užití simulace při optimalizaci, přístupy k modelování, simulační nástroje a popis vybraného nástroje použitého v praktické části
3. Praktická část – popis výrobního procesu, tvorba koncepčního a simulačního modelu, simulace a analýza současného stavu, návrh experimentů optimalizace a jejich simulace, vyhodnocení výsledků
4. Závěry a doporučení

Seznam doporučené literatury:

1. LAW, Averill M. Simulation modeling and analysis. Fifth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-340132-4.
2. MANLIG, František. Využití počítačové simulace výrobních systémů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-162-7.
3. BANKS, Jerry. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Atlanta: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 978-0-471-13403-9.
4. KRAJEWSKI, Lee, Naresh MALHOTRA a Larry RITZMAN. Operations Management: Processes and supply chains. 13th. Ohio: Case Western Reserve University, 2021. ISBN 978-1-292-40994-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Horejc, Ph.D. ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Pavel Scholz ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **29.09.2023**

doc. Ing. Jan Horejc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr navazujícího magisterského studia Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze

Bc. Jan Prouza

Poděkování

Tímto bych rád poděkovala panu Ing. Scholzovi za jeho cenné rady a připomínky, odborný dohled, a především za jeho ochotu a čas. Další poděkování patří zaměstnancům spol. ENGEL strojírenská s.r.o. za jejich vstřícnost při poskytování informací a dat potřebných pro vypracování diplomové práce. Poslední poděkování patří rodině, přátelům, a hlavně slečně Alisse, za bezpodmínečnou podporu.

Anotační list

Studijní obor:	Řízení průmyslových systémů
Název diplomové práce:	Simulace a optimalizace výrobního procesu olejových tanků
Autor:	Bc. Jan Prouza
Vedoucí:	doc. Ing. Jan Horejc, Ph.D.
Druhý vedoucí:	Ing. Pavel Scholz
Rozsah diplomové práce:	Počet stran: 136
	Počet obrázků: 33
	Počet grafů: 12
	Počet tabulek: 23
	Počet příloh: 6

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá optimalizací výroby olejových tanků vstřikovacích strojů společnosti ENGEL strojírenská s.r.o. K optimalizaci je využíván simulační model vytvořený v softwaru Flexsim. První část práce se zabývá výrobními procesy, jejich efektivitou, simulací, principy simulační studie a simulačním softwarem. V další části je popsána příprava a tvorba simulačního modelu, návrh optimalizačních experimentů, analýza jejich výsledků, závěry a doporučení k optimalizaci.

Klíčová slova:

simulace, optimalizace, flexsim, výroba, logistika, procesy

Abstract sheet

Field of study:	Industrial Systems Management	
Name of diploma thesis:	Simulation and Optimization of the Oil Tank Production Process	
Author:	Bc. Jan Prouza	
Supervisor:	doc. Ing. Jan Horejc, Ph.D.	
Second Supervisor:	Ing. Pavel Scholz	
Extent of diploma thesis:	Number of pages:	136
	Number of pictures:	33
	Number of graphs:	12
	Number of tables:	23
	Number of attachments:	6

Abstract:

The master thesis deals with the optimization of the production of oil tanks of injection moulding machines manufactured by ENGEL strojírenská s.r.o. For this reason a simulation model is created in Flexsim software. The first part of the thesis deals with manufacturing processes, their efficiency, simulation, simulation principles and simulation software. The next part describes the preparation and creation of the simulation model, the design of optimization experiments, the analysis of their results, conclusions, and optimization recommendations.

Key words:

simulation, optimization, flexsim, manufacturing, logistics, processes

Obsah

ÚVOD	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1 Provozní a výrobní management.....	13
1.1 Procesy	13
1.1.1 Definice procesu.....	14
1.1.2 Vstupy procesu	15
1.1.3 Operace a jednotky toku	15
1.1.4 Výstupy a zákazníci procesu.....	16
1.1.5 Dodavatelé	16
1.1.6 Druhy procesů.....	16
1.1.7 Procesy dodavatelského řetězce	18
1.1.8 Výrobní procesy	19
1.2 Efektivita výrobních procesů.....	20
1.2.1 Proč zlepšovat výrobní procesy	21
2 Simulace výrobních a logistických procesů	22
2.1 Historie simulací.....	22
2.2 Definice simulace	23
2.3 Pojmy související se simulacemi.....	24
2.3.1 Systém.....	25
2.3.2 Model	25
2.3.3 Stav systému a jeho proměnné	26
2.4 Dělení simulačních modelů	26
2.4.1 Statické a dynamické.....	26
2.4.2 Diskrétní a spojité	27
2.4.3 Deterministické a stochastické.....	28
2.5 Aplikace simulace.....	29
2.5.1 Kdy je vhodné použít simulaci.....	30
2.5.2 Chyby při použití simulace	31
2.5.3 Výhody a nevýhody užití simulací	33
2.5.4 Příklady užití simulace ve výrobě a logistice	34
3 Simulační projekt	36
3.1 Struktura simulačního projektu	37
3.2 Formulace problému	38
3.3 Definice cílů a plánu projektu	38
3.4 Tvorba koncepčního modelu.....	39
3.5 Sběr dat	39
3.6 Definice modelu a verifikace.....	42
3.7 Tvorba simulačního modelu a validace.....	43
3.8 Návrh a realizace experimentů	45
3.9 Analýza výsledků a jejich dokumentace	46
4 Simulační software.....	47
4.1 Vlastnosti a funkce simulačního softwaru	48

4.2	Software pro všeobecné využití	48
4.2.1	Arena	49
4.3	Software pro užití ve výrobním procesu	50
4.3.1	Siemens Plant Simulation	52
4.3.2	Flexsim	54
4.4	Výběr simulačního softwaru	55
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	59
5	Úvod do praktické části	60
6	Formulace problému a cílů studie	62
7	Tvorba koncepčního modelu.....	64
7.1	Proces výroby olejových tanků.....	64
7.2	Výsledný koncepční model	68
8	Sběr a práce s daty	70
8.1	Typy výrobků	70
8.2	Intervaly vstupů do výroby a přiřazení typu výrobku	72
8.3	Výrobní plány.....	76
8.4	Výrobní časy	76
9	Definice modelu a verifikace dat.....	77
10	Tvorba simulačního modelu.....	77
10.1	Nastavení modelu	78
10.2	3D model	82
10.3	Process Flow	84
10.4	Svařování robotem.....	87
10.5	Řízení logistiky	90
10.6	Verifikace modelu	96
11	Validace simulačního modelu	97
12	Návrh a realizace experimentů	100
12.1	Analýza stávajícího stavu.....	101
12.2	Experiment 1 – počet vozíků v oběhu	105
12.2.1	Nastavení experimentu	105
12.2.2	Výsledek experimentu	106
12.3	Experiment 2 – navýšení intenzity vstupů	107
12.3.1	Nastavení experimentu	107
12.3.2	Výsledek experimentu	107
12.4	Experiment 3 – změna layoutu a materiálového toku	110
12.4.1	Nastavení experimentu	111
12.4.2	Výsledek experimentu	111
12.5	Experiment 4 – kombinace všech scénářů	112
12.5.1	Nastavení experimentu	113
12.5.2	Výsledky experimentu	113
13	Návrhy a doporučení	119
13.1	Zvýšení intenzity vstupů	119
13.2	Přesun vybraných pracovišť a změna toku materiálu	120
13.3	Úprava pracoviště č.273400.....	121

13.4	Potenciální úzká místa.....	121
13.5	Určení počtu vozíčků	122
13.6	Úprava kapacity front práce	122
13.7	Zvýšení průběžné doby výroby.....	123
	Závěr	124
	Seznam zdrojů a použité literatury	126
	Seznam obrázků.....	128
	Seznam tabulek	129
	Seznam grafů	130
	Seznam příloh	131

ÚVOD

Globalizace a rostoucí konkurence nutí mnohé organizace k neustálému zlepšování svých procesů. To je dnes úkol značně obtížný, vezmeme-li v úvahu rychlost, se kterou dnes roste míra jejich složitosti. Spolu s růstem komplexity jsou stejným tempem zvyšovány nároky na celkovou flexibilitu těchto procesů, zejména pak procesů výrobních. Tento vývoj zvyšuje nároky na provozní a výrobní management, který má řízení těchto procesů na starosti. Naštěstí došlo k posunu i v rámci technologického vývoje, který dnešním manažerům zajistil možnost využít pokročilé nástroje, specificky vytvořené pro řízení, návrh a optimalizaci procesů. Jedním z těchto manažerských nástrojů je simulace. Její správné použití v rámci podnikových a výrobně-logistických procesů dokáže zvýšit šanci podniku na úspěch v dnešním tržním prostředí. A to z toho důvodu, že je nástrojem, který dokáže zachytit i tak složité procesy, jakými jsou např. komplexní výrobní systémy.

To je jeden z hlavních důvodů, proč se stala nástrojem užitým v rámci optimalizace výroby olejových tanků ve společnosti ENGEL strojírenská s.r.o. Jen málokterý z nástrojů by totiž dokázal zachytit a spolehlivě vyhodnotit tak složitý systém. Zároveň problematika optimalizace zvoleného výrobního procesu vytvořila ideální situaci, jak ověřit simulační možnosti v rámci provozu spol. ENGEL, která se již delší dobu snažila vyhodnotit, zda investovat do simulačních nástrojů.

Cílem práce bylo pomocí simulace zachytit a analyzovat výrobní proces olejových tanků, odhalit potenciální oblasti ke zlepšení, a v poslední řadě provést a vyhodnotit navržené optimalizační experimenty. Dalším cílem práce bylo představení principů simulace a možností softwaru Flexsim zadavatelům studie.

Účelem první části práce bylo poskytnout čtenáři ucelenou představu o tom, proč jsou pro management podniku důležité procesy, co vlastně procesy jsou a proč je důležité zabývat se jejich efektivitou, zejména pak efektivitou procesů výrobních. Dále následovala část věnovaná simulaci výrobních a logistických procesů, jakožto nástroje

vhodného pro zlepšování jejich efektivity. Následně byla představena metodika postupu realizace simulačního projektu. Posledním kapitola teoretické části byla věnována problematice simulačního softwaru.

Praktická část respektovala strukturu simulační studie. Nejprve byl formulován problém a cíle projektu, dále byla popsána tvorba koncepčního modelu a práce s daty. Poté následoval popis tvorby simulačního modelu. V poslední části byly navrženy a realizovány experimenty za účelem splnění cílů formulovaných v první části studie. Experimenty byly vyhodnoceny vůči stávajícímu stavu výrobního systému a na jejich základě byly formulovány patřičné závěry a doporučení.



I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Provozní a výrobní management

Řízení provozu se týká systematického navrhování, řízení a kontroly procesů a může být zdrojem konkurenční výhody pro firmy ve službách i ve výrobním sektoru.

Dnešní konkurence na rostoucích globálních trzích nenechává společnostem žádný prostor k vnitřní neefektivitě. Zákazníci jsou stále náročnější a pokud produkt nebo služba nesplňuje jejich očekávání, mají prostor k nákupu u konkurence. V případě neuspokojení zákazníků správnými produkty a službami hrozí společnostem vysoké ztráty na ziscích. Proto je důležité, aby provozní a výrobní management dokázal sladit interní aktivity a zdroje podniku s externími požadavky, jinými slovy, musí vhodně navrhnout obchodní, provozní a výrobní procesy.

Vzhledem k tomu, že se práce zaměřuje na simulaci výrobních procesů, je nutné nejprve porozumět tomu, co procesy představují. Proto je první kapitola věnována podrobné definici podnikových procesů, včetně konceptů hierarchie procesů a jejich architektury.

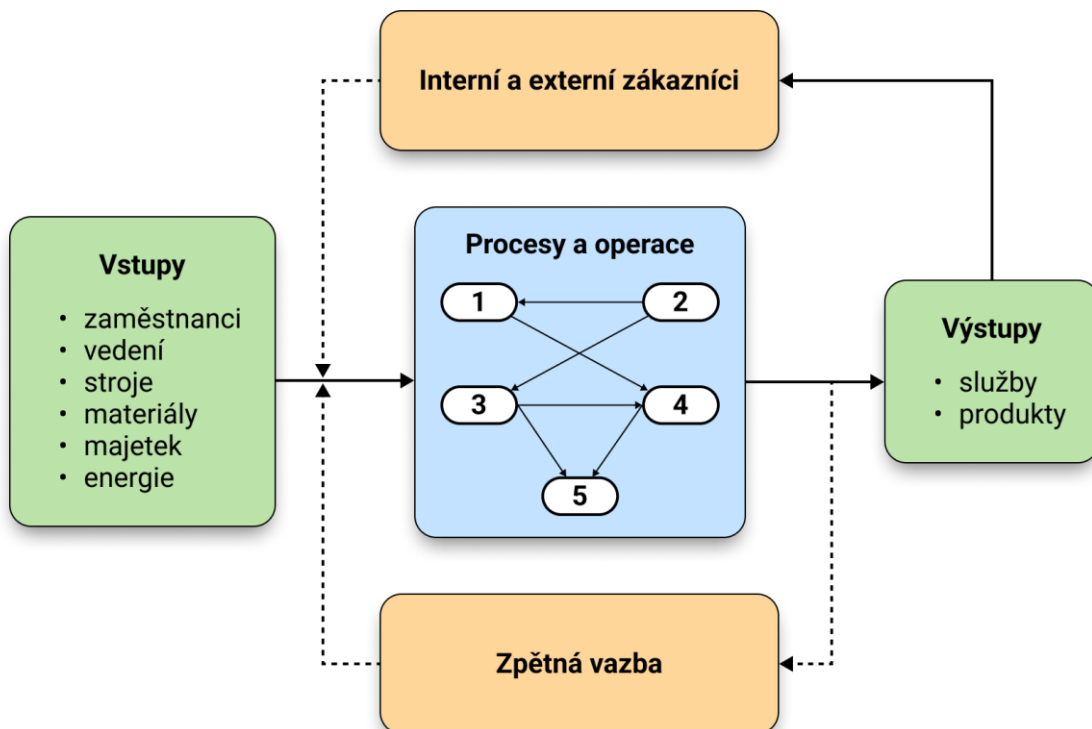
1.1 Procesy

Proces je jakákoli činnost nebo skupina činností, která přijímá jeden nebo více vstupů, transformuje je a poskytuje jeden nebo více výstupů pro své zákazníky. Proces může mít vlastní soubor cílů, může zahrnovat pracovní tok, který přesahuje hranice oddělení, a může vyžadovat zdroje z několika oddělení. Díky tomu procesy podniku poskytují velmi relevantní obraz o tom, jak společnost skutečně funguje. Z čehož vyplývá, že klíčem k úspěchu v mnoha organizacích je důkladné pochopení toho, jak jejich procesy fungují, protože organizace je jen tak efektivní, jak efektivní jsou její procesy. Z toho lze vyvodit, že operační management je relevantní a důležitou součástí každého vedení podniku, protože všechna oddělení mají procesy, které musí být efektivně řízeny, aby společnost získala konkurenční výhodu. [1]

Aby se procesy daly využít jako konkurenční výhoda, je nutné jejich detailnější pochopení. Proto je vhodné blíže prozkoumat, jaké jsou jejich kategorie, čím jsou tvořeny a jaké mají výstupy.

1.1.1 Definice procesu

Abychom v rámci dalšího postupu mohli procesy firmy zkoumat, je nutné nejprve pochopit, jak se proces definuje, aby nedošlo k záměně s jinými termíny, označujícími dílčí, nebo nadřazenou činnost procesu. Za zjednodušenou definici procesu by se dala považovat věta: „*Business proces popisuje, jak se něco v organizaci dělá.*“ [2]



Obrázek 1: Struktura procesu a jeho okolí

Zdroj: Vlastní dle [1]

Ovšem pro hlubší pochopení je nutný komplexnější popis dílčích částí procesu, jako jsou vstupy, výstupy a jednotlivé operace. Strukturu procesů, jejich okolí a hierarchii dílčích prvků můžeme blíže porozumět díky obrázku č.1. Z něho vybrané prvky budou charakterizovány v následujícím textu.

1.1.2 Vstupy procesu

Každý proces má vstupy a výstupy. Vstupy mohou zahrnovat kombinaci lidských zdrojů (pracovníků a manažerů), kapitálu (vybavení a zařízení), nakupovaného materiálu nebo služeb. [1] Pro ilustraci lze použít výrobní proces, kde vstupy ve formě surovin a energie vstupují do výroby a přeměňují se na požadované výstupy (výrobky). Příkladem, ve kterém vstupy a výstupy jsou informace nebo data, může být účetní proces, v němž se nestrukturovaný vstup jako jsou finanční údaje mění na strukturovaný výstup v podobě finančního výkazu. [2]

V poslední řadě lze rozlišit dva zvláštní typy vstupů: účast zákazníků a informace o výkonnosti z interních i externích zdrojů. K účasti zákazníků dochází nejen tehdy, když dostávají výstupy, ale také tehdy, když se aktivně účastní procesů, například když zákazník definuje své požadavky na výrobek nebo zakázku.

Informace o výkonnosti zahrnují interní zprávy o službách zákazníkům nebo o úrovni zásob a externí informace z průzkumu trhu, vládních zpráv nebo telefonátů od dodavatelů. Všechny uvedené druhy informací jsou důležité pro efektivní řízení procesů vedením podniku. [1]

1.1.3 Operace a jednotky toku

Za operaci lze považovat činnost, která zajišťuje část nebo celek jednoho či více procesů, a je vykonávána určitou skupinou zdrojů. Vstupní položky procesů vstupují do operací, kterými procházejí jednotky toku. Jasně pochopení jednotek toku je klíčové při modelování a navrhování procesů, protože mají bezprostřední dopad na kapacitu a výkon. Typickými jednotkami toku jsou materiály, objednávky, spisy nebo dokumenty, žádosti, zákazníci, pacienti, výrobky či hotovost. [2] Tyto jednotky lze rozřadit do 3 skupin. Do služeb, produktů a zákazníků.

Při průchodu jednotek operacemi dochází k výkonu procesu. Jednotlivé toky mezi operacemi se mohou křížit, protože jedna zakázka nebo zákazník může mít jiné požadavky (a tedy i jiné schéma toku), než další zakázka nebo zákazník. [1]

1.1.4 Výstupy a zákazníci procesu

Proces poskytuje výstupy zákazníkům. Těmito výstupy mohou být služby (které mohou mít podobu informací) nebo produkty. Každý proces v organizaci má zákazníka. Někteří z nich jsou externí zákazníci, což mohou být koncoví uživatelé nebo zprostředkovatelé (např. další výrobci, finanční instituce nebo obchodníci), kteří nakupují hotové služby nebo produkty firmy.

Další jsou interní zákazníci. To mohou být celé útvary, oddělení, další procesy či jednotliví zaměstnanci firmy, jejichž vstupy procesů jsou ve skutečnosti výstupy dřívějších procesů. V každém případě se musí procesy řídit s ohledem na zákazníka. [2]

1.1.5 Dodavatelé

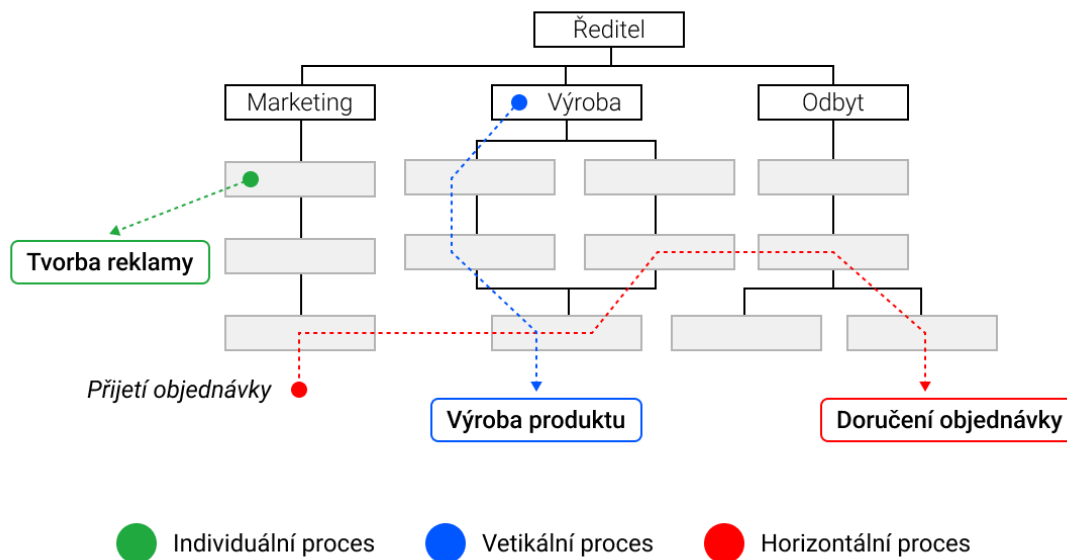
Každý proces v organizaci je závislý na dodavatelích. Externími dodavateli mohou být jiné podniky nebo jednotlivci, kteří poskytují zdroje, služby, výrobky a materiály pro krátkodobé i dlouhodobé potřeby firmy. Procesy mají také interní dodavatele, což mohou být zaměstnanci nebo procesy, které dodávají důležité informace nebo materiály v rámci podniku. [1]

1.1.6 Druhy procesů

Na základě rozsahu procesů v rámci organizace je lze rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří **individuální procesy**, které jsou prováděny jednotlivými osobami, další skupina se skládá z **vertikálních procesů**, které jsou vykonávány v rámci určité funkční jednotky nebo oddělení. Poslední je skupina **horizontálních procesů**, které zasahují do několika funkčních jednotek či oddělení. Horizontální proces může v případě dodavatelských řetězců přesahovat dokonce napříč různými společnostmi. Tuto charakteristiku lze pozorovat na obrázku č.2.

Z toho lze vyvodit, že mezi těmito typy procesů existuje určitá hierarchie. Horizontální proces lze obvykle rozložit na řadu propojených vertikálních procesů nebo podprocesů,

kteřé se skládají z řady individuálních procesů. Dále můžeme říct, že každý proces lze rozložit na jednu nebo více činností, které se skládají z řady úkolů.



Obrázek 2: Ilustrace rozsahu jednotlivých druhů procesů v rámci organizace

Zdroj: Vlastní dle [2]

Největší potenciál pro zlepšení mají nejčastěji horizontální procesy, které jsou pro organizaci klíčové a zahrnují značné množství činností. Důvodem, proč horizontální procesy nabízejí vyšší potenciál pro zlepšení ve srovnání s vertikálními či individuálními procesy je to, že se obtížněji koordinují a často trpí sub-optimalizací (situace, kdy optimalizace sub-systému podle jeho lokálních cílů vede k horšímu řešení celého systému). Důvodem této tendence k sub-optimalizaci jsou silné zájmy jednotlivých útvarů podniku. [2]

Dalším možným rozdělením procesů je dělení na dva typy: procesy služeb a výroby. Procesy služeb vidáme každý den, kdy interagujeme se společnostmi (nakupujeme výrobky), a výrobní procesy zajišťují vznik těchto výrobků. Z toho lze vyvodit, že právě výrobní procesy dávají vzniknout procesům služeb.

Důvodem tohoto rozdělení procesů jsou převážně dva klíčové rozdíly. Prvním rozdílem je povaha výstupů z procesů služeb a výroby a druhým je míra interakce se zákazníkem,

kteřá je u procesů služeb značně vyšší než u procesů výrobních. Dále se tyto procesy liší v reakční době, kapitálové náročnosti a možnostech měření jejich kvality. Zde platí, že výrobní procesy jsou kapitálově náročnější, mají delší reakční dobu, ale poskytují lepší možnosti k měření jejich efektivity. [1]

1.1.7 Procesy dodavatelského řetězce

Procesy mohou být vzájemně propojeny do dodavatelského řetězce, což je vzájemně provázaná řada procesů v rámci firmy s dalšími podniky, které produkují službu nebo výrobek pro zákazníky. Firma může mít více dodavatelských řetězců, které se liší dle poskytovaného výrobku nebo služby. Každá činnost v procesu by měla přidávat hodnotu předchozím činnostem; plýtvání a zbytečné náklady by měly být eliminovány.

Za řízení dodavatelského řetězce lze považovat synchronizaci procesů firmy s procesy jejich dodavatelů a zákazníků s cílem sladit tok materiálů, služeb a informací s poptávkou zákazníků. Správné plánování a návrh těchto procesů spolu s interní a externí koordinací v rámci dodavatelského řetězce vytváří hodnotu pro všechny zainteresované strany. [1]

V rámci dodavatelského řetězce lze rozlišit dva typy procesů: **procesy hlavní** a **procesy podpůrné**. Hlavní proces je soubor činností, které přinášejí hodnotu externím zákazníkům. Vlastníci těchto procesů a jejich zaměstnanci komunikují s externími zákazníky, budují s nimi vztahy, vyvíjejí a vyrábějí nové produkty, poskytují jim služby a komunikují s externími dodavateli.

Podpůrný proces poskytuje důležité zdroje a vstupy pro hlavní procesy a je nezbytný pro řízení podniku. Podpůrné procesy se nevyskytují pouze v provozu, ale lze je nalézt v účetnictví, financích, lidských zdrojích, informačních systémech a marketingu. Například funkce lidských zdrojů v organizaci zajišťuje mnoho podpůrných procesů, jako je nábor a přijímání pracovníků, kteří jsou potřební na různých úrovních organizace, školení pracovníků v oblasti dovedností a znalostí potřebných k řádnému výkonu svěřených povinností a stanovení motivačních a kompenzačních plánů, které odměňují zaměstnance za jejich výkon. [1]

Vzhledem k povaze textu diplomové práce se následující text bude věnovat převážně procesům hlavním, specifičtěji procesům výrobním, které lze dle výše uvedeného rozdělení v rámci dodavatelského řetězce zařadit do procesů hlavních.

1.1.8 Výrobní procesy

Výrobní procesy přeměňují materiál na produkt, který má fyzickou podobu, již říkáme výrobek. Výrobní procesy lze identifikovat tím, že transformují materiály v oblasti jejich fyzikálních vlastností, tvaru, velikosti, povrchu, spojů a materiálu. [1]

Na tomto základě se dá postavit jejich rozdělení do pěti hlavních skupin, kde první skupinu tvoří **procesy ke změně tvaru materiálů**. Ty využívají mechanickou sílu, teplo nebo jiné formy energie k dosažení změny geometrie zpracovávaného materiálu. Mezi tyto procesy lze zařadit odlévání, tváření za tepla i za studena (např. kování, vytlačování, válcování, tažení, lisování, válcování, magnetické tváření atd.), zpracování plechů (např. propichování, ohýbání, stříhání, tažení atd.) a nakonec i lisování plastů.

Další skupinou jsou procesy používané pro **obrábění dílů na pevné rozměry**. Tyto procesy zahrnují tradiční způsoby obrábění (jako je soustružení, vrtání, vyvrtávání, vystružování, protahování, frézování, broušení, lapování, honování, leštění atd.), ale i méně tradiční způsoby obrábění. To mohou být způsoby obrábění ultrazvukem, abrazivním paprskem, vodním paprskem či jejich kombinací, nebo také elektrochemické obrábění, elektrochemické broušení a elektrochemické honování. Mezi další netradiční procesy obrábění patří také obrábění elektrickým výbojem, obrábění laserovým paprskem, plazmovým obloukem nebo iontovým paprskem.

Třetí skupinu výrobních procesů tvoří **procesy povrchových úprav**. Ty zahrnují operace k odstranění nečistot, olejů, prachu apod., dále operace povrchových úprav, jako je kuličkování, pískování, a v neposlední řadě také operace povlakování, jako je galvanické pokovování a eloxování. Nakonec lze do této skupiny ještě zařadit procesy nanášení tenkých vrstev, jako je fyzikální a chemické nanášení par.

Předposlední skupina obsahuje **procesy sloužící k spojování dílů**. Mezi ty řadíme svařování, pájení, spékání, lisování, nýtování, šroubování, lepení apod.

Poslední, pátá skupina, je tvořena **procesy zlepšujícími materiálové vlastnosti**. Při těchto procesech se mění fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů působením vysoké teploty nebo rychlým či opakovaným namáháním materiálu. Do této skupiny lze zařadit žíhání, normalizaci, kalení, popouštění nebo slinování. [3]

Vzhledem k pokrokům technologie dnešní doby lze definovat ještě jednu, dodatečnou skupinu, kterou zdroje neuvádí. Jednalo by se o skupinu **procesů aditivní výroby**, která v posledních letech nabývá na oblibě a dostává se do běžné výrobní praxe.

Výstupy z výrobních procesů lze vyrábět, skladovat a přepravovat v očekávání budoucí poptávky. Pokud proces nemění vlastnosti materiálů alespoň v jedné z pěti výše uvedených oblastí, je považován za proces služeb (nevýrobní).

Druhým klíčovým rozdílem mezi procesy služeb a výrobními procesy je míra kontaktu se zákazníkem. Při procesech služeb obvykle dochází k vyšší interakci se zákazníkem. Zákazníci se mohou aktivně podílet na samotném procesu, nebo mohou být v úzkém kontaktu s poskytovatelem služby, aby mu sdělili své specifické potřeby. U výrobních procesů je kontakt se zákazníkem zpravidla méně častý. [1]

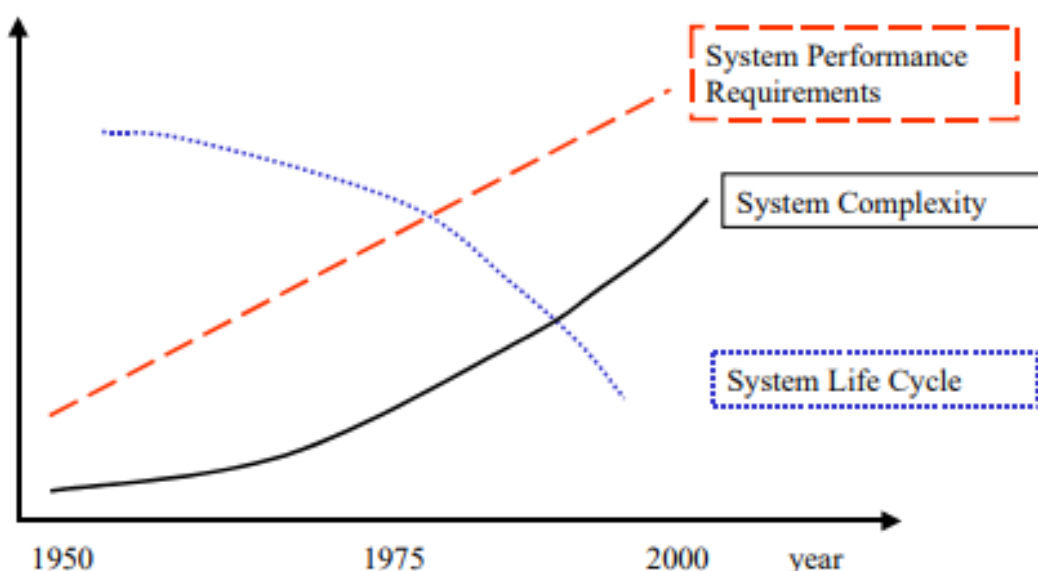
Vzhledem k tomu, že dnešní výrobní procesy nabývají vysoké komplexity a zároveň jsou jedny z nejdůležitějších procesů průmyslových podniků, tak je pro zachování jejich konkurenceschopnosti velmi důležité zajistit jejich efektivitu.

1.2 Efektivita výrobních procesů

Pouhé pochopení toho, co pojem proces znamená, jakou má architekturu, okolí, a jak se dá kategorizovat či jakou nabývá hierarchii, nestačí ke správnému procesnímu řízení. Je velmi důležité zmínit ještě samotnou efektivitu a výkonnost procesů. Tato dvojice ve své podstatě tvoří jeden z hlavních cílů celého řízení procesů, zejména pak řízení procesů výroby.

1.2.1 Proč zlepšovat výrobní procesy

Optimalizace výrobních procesů je nezbytná z mnoha důvodů. Mezi hlavní důvody firem patří schopnost obstát na trhu a udržet si svoji pozici. Tuto schopnost nejsilněji ovlivňuje chování zákazníků. Ti totiž neustále zvyšují své nároky a požadavky. S cílem dokázat těmto požadavkům vyhovět, jsou podniky nuceny své výrobní procesy neustále zlepšovat. Na obrázku č.3 je tato korelace naznačena. Všimněme si, jak se životní cykly systémů v posledních letech výrazně zkracují, s tím, jak zákazníci kladou čím dál tím větší nároky na kvalitu a šíří produktového portfolia. To vše zapříčiňuje rostoucí komplexitu a nutnost flexibility výrobních systémů a naznačuje, že efektivita výrobních procesů nabývá klíčovou roli při boji o pozice na trhu. [4]



Obrázek 3. Zvyšující se komplexita systémů

Zdroj: [4]

Z toho lze vyvodit, že v dnešní době patří k odpovědnosti výrobního managementu nejenom odpovědnost za počet vyrobených výrobků a splnění výrobních plánů, ale také odpovědnost za zajištění efektivity a flexibility celého výrobního procesu. Z toho důvodu je jedním z hlavních cílů managementu výroby tento proces neustále zlepšovat, omezovat plýtvání zdroji a zajistit, aby každá činnost procesu výroby přidávala hodnotu vzhledem k předchozím činnostem. [5]

Vzhledem k celkové komplexitě dnešních výrobních procesů je potřeba k jejich zlepšování a optimalizaci přistupovat po částech, nicméně s globálním pohledem na celý proces, aby byl vidět dopad úprav na celek. Logika říká, že nejvhodnějším postupem je nejdříve optimalizovat část procesu, kde dochází k největšímu plýtvání, tj. oblastí výroby, která je nejméně efektivní.

Ovšem odhalit, která oblast procesu výroby je nejméně efektivní bývá pro podniky složitým úkolem. Dále je třeba vymyslet, jak danou oblast zlepšit a ideálně ověřit funkčnost navrhovaného řešení. Ovšem pak následuje otázka, která oblast procesu výroby je v rámci neefektivity na druhém místě atd. Právě k odhalení těchto oblastí, návrhu řešení a ověření jeho dopadu mohou výrobní manažeři využít simulaci.

2 Simulace výrobních a logistických procesů

Počítačová simulace se nejenom díky technologickému pokroku, konceptu Průmysl 4.0 nebo tržním změnám stává v posledních letech neodmyslitelnou součástí navrhování a optimalizace podnikových procesů a systémů. Zcela zásadní je v této souvislosti totiž skutečnost, že simulace významně pomáhá při zajištění efektivity procesů, která je nutná pro zachování konkurenceschopnosti podniků. Jak se simulace vyvíjela a co simulace představuje bude vysvětleno v následujících kapitolách.

2.1 Historie simulací

Počítačová simulace, jak ji známe dnes, vznikla na počátku 50. let 20. století, v poválečném období, kvůli potřebě analyzovat náhodnost v rámci vojenských problémů. Tím matematici položili základy stochastické simulace.

Následně počítačovou simulaci začaly využívat ocelářské a letecké koncerny k řešení složitých problémů v rámci komplexních modelů. Tyto modely mohli vytvářet pouze vysoce kvalifikovaní pracovníci na sálových počítačích. K vytváření simulačních modelů se používaly obecné programovací jazyky, jako například FORTRAN, a později specializované simulační jazyky a software, jako "General Purpose Systems Simulator

(GPSS)" a SIMSCRIPT. Hlavní charakteristikou těchto jazyků byla simulace diskrétních událostí (DES), která je dnes obsažena ve většině moderních simulačních softwarů.

Ačkoli se simulace objevila již během druhé průmyslové revoluce, její širší používání začalo až s třetí průmyslovou revolucí, na přelomu 70. a 80. let 20. století. Nejprve se používala v automobilovém a těžkém průmyslu. V průběhu 80. let se simulační komunita začala zajímat o požadavky na plánování materiálů a plánování procesů v továrnách. Existovalo jen velmi málo grafických programů a většina simulací probíhala textově nebo numericky.

S pokroky v počítačové grafice v 80. letech se však animace stala nedílnou součástí simulačních programů. Tovární procesy od té doby mohly být simulovány s přidanou animací, takže zúčastněné strany (např. vedení, mistři výroby i dělníci) mohli sledovat, jak budou jejich továrny fungovat, když budou provedeny změny v určitých procesech. Animace také pomohla při dalším šíření simulace jako nástroje pro rozhodování. Počítačová grafika způsobila v simulaci revoluci. Simulace pomocí čísel se změnila na animace ikon a poté na dvourozměrné (2D) animace až k dnešní podobě 3D objektů a animací. První simulační softwary s grafickým uživatelským rozhraním (GUI), byly softwary Arena a Micro Saint, které fungovaly i na osobních počítačích s operačním systémem Windows. [6]

S tím, jak se v minulosti měnili možnosti, podoba a potenciál využití simulace v různých odvětvích podnikání, se také měnilo její obecné chápání a definice jejích funkcí i simulace samotné. A právě v čase se měnící podoba definic simulací nám může napovědět v tom, co simulace dnes znamená a k čemu ji lze doopravdy použít.

2.2 Definice simulace

Existuje mnoho definic simulace. Jednou z prvních a velmi výstižných je definice podle Dahla z roku 1965: „*Simulace je výzkumná metoda, jejíž podstata spočívá v tom, že zkoumaný dynamický systém nahradíme jeho simulátorem (modelem) a s ním*

provádíme pokusy (experimenty) s cílem získat informaci o původním zkoumaném systému.“ [7]

Mezi další definice patří věta o simulaci z roku 1976, dle Shannona, který tvrdí: *„Simulace je proces navrhování počítačového modelu systému nebo procesu a provádění experimentů s tímto modelem za účelem pochopení chování systému nebo vyhodnocení různých strategií pro jeho řízení.“ [8]*

Pro úplnost uvedu ještě jednu definici z roku 1985, od Bankse, která říká: *„Simulaci definujeme jako napodobení fungování reálného procesu nebo systému v čase. Simulace zahrnuje vytvoření umělé historie systému a její pozorování s cílem vyvodit závěry týkající se provozních charakteristik skutečného systému. Simulace se používá k popisu a analýze chování systému, ke kladení otázek typu "co kdyby" týkajících se skutečných systémů a pomáhá při jejich návrhu. Modelovat pomocí simulace lze jak existující, tak i koncepční systémy.“ [9]*

Při správném pochopení více uvedených definic si lze povšimnout, jak se vyvíjely v čase. První definice nazývala simulaci výzkumnou metodu, která spočívala v nahrazení skutečného systému určitým modelem, ovšem ne nutně počítačovým, a dále se vyjadřovala ke zkoumání systému, ale již opomíjela možnosti jeho návrhu. Časem se definice simulace rozvíjela směrem k využití počítačů a navrhování různých možností pro řízení zkoumaného systému, až se proměnila do nynější nejkompaktnější podoby dle Bankse, která zahrnuje všechny aspekty simulace, jak ji dnes známe.

2.3 Pojmy související se simulacemi

Pro hlubší pochopení simulace a realizaci studie však nestačí znát pouze definici, ale i prvky, z kterých se simulace skládá, a pojmy, které s nimi souvisí. Prvním a nejzákladnějším pojmem v rámci simulací je systém, z něhož vychází vše další.

2.3.1 Systém

Pod pojmem systém rozumíme skupinu nebo soubor vzájemně propojených prvků, které spolupracují k dosažení stanoveného cíle. [8] Soubor prvků tvořící daný systém by měl obsahovat veškeré činitele, které ovlivňují výstup. [10]

Tyto propojené prvky lze nazvat také entitami, které představují objekty vyžadující explicitní definici. Entity mohou být dynamické, nebo statické. Dynamické entity se pohybují skrz systém, zatímco statické slouží entitám dynamickým. Příkladem dynamické entity by byla zakázka pohybující se skrze výrobní závod, zatímco jednotlivá pracoviště by byla entitami statickými.

Entita může mít atributy, které se týkají pouze této entity. Atributy je třeba považovat za lokální hodnoty. Může jít např. o čas vstupu entity do výroby, či její sériové číslo. Entity mohou atributy sdílet, ale nemusí. To se odvíjí od cíle zkoumání. [9]

Systémy mohou obsahovat vysoké počty prvků (entit), které by komplikovaly možnosti se v systému orientovat a dále jej zkoumat. Aby se tomu zabránilo, je možné v rámci jednoho podniku definovat několik systémů, které lze považovat vzhledem k celkovému systému (celému podniku) za jeho sub-systémy, které spolu komunikují pomocí vstupů a výstupů.

2.3.2 Model

Pojem model obecně představuje reprezentaci skupiny objektů nebo myšlenek v určité formě. [8] Avšak v rámci simulace lze model chápat jako virtuální reprezentaci systému, která jej prezentuje v podobě kvantitativních matematických a logických vazeb, s nimiž se manipuluje za účelem poznání, jak model (systém) reaguje, a jak by reagoval v jiných scénářích. [10]

2.3.3 Stav systému a jeho proměnné

Stav systému lze definovat souborem proměnných potřebných k popisu systému v daném čase. [10]

Tyto stavové proměnné lze popsat jako informace, které nám říkají, co se v systému děje v dostatečném detailu, v daném čase. Určení stavových proměnných systému závisí na účelu experimentu, takže to, co mohou být stavové proměnné systému v jednom případě, nemusí být stejné v případě jiném, i když zkoumáme stejný systém. [9]

Po správném definování stavových proměnných systému lze sledovat rozdíl mezi modely diskrétních událostí a modely spojitými, čímž se dostáváme k dělení systémů.

2.4 Dělení simulačních modelů

Simulační modely lze nejprve dělit dle jejich závislosti na čase, a to na modely statické a dynamické. Následně můžeme simulační modely dělit podle toho, jak se mění jejich stavové proměnné v čase, nebo dle existence určité náhody (pravděpodobnosti) v rámci jejich vstupů. Všechny případy budou popsány v textu níže.

2.4.1 Statické a dynamické

Simulační modely je vhodné nejprve rozdělit podle jejich závislosti na čase na statické a dynamické. Statický simulační model, lze někdy nazvat simulací Monte Carlo. Statický model představuje systém v určitém časovém okamžiku. [11] Jinými slovy lze říct, že se statický model používá pouze v případech, kdy čas nehraje ve skutečném systému roli. [2]

Naopak dynamické modely představují systémy, které se v průběhu času mění. [11] Což je nejčastější případ výrobních systémů, kterými se text zabývá.

2.4.2 Diskrétní a spojitě

Dále je vhodné srovnání modelů dle toho, jak se proměnné systému mění v daném čase. Zde vycházíme z vědomí, že se jedná o systém dynamický, mění se v čase.

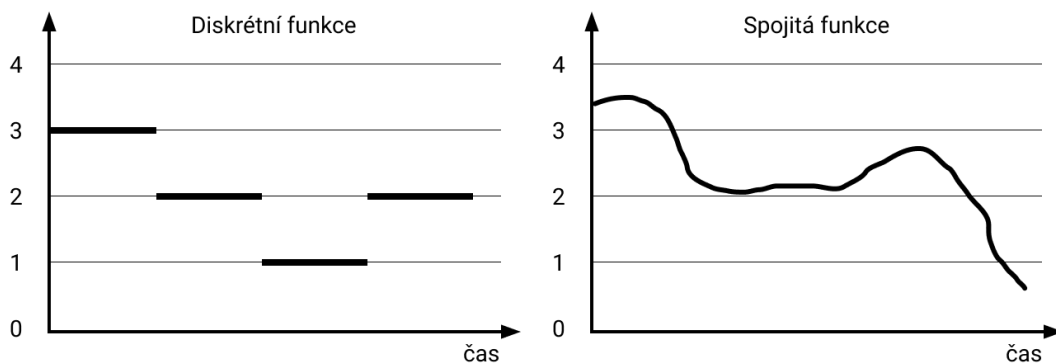
Simulaci diskretních událostí (Discrete-Event Simulation) lze definovat jako model systému, v němž se stavové proměnné mění pouze v diskretních časových bodech, v nichž dochází k určitým událostem.

Události nastávají jako důsledek činností a zpoždění a vyvolávají skokové změny v stavových proměnných. Jednotlivé entity mohou například sdílet systémové zdroje, případně vstupovat do front při čekání na dostupný zdroj, čímž doba aktivity nebo zpoždění mohou "zdržovat" entity po určitou dobu.

Simulační model diskretních událostí se provádí v čase pomocí mechanismu, který posouvá simulovaný čas dopředu. Stav systému je aktualizován při každé události spolu se zachycením a uvolněním zdrojů, které mohou v daném okamžiku nastat. [9]

Ačkoli simulace diskretních událostí by bylo možné koncepčně provádět ručními výpočty, množství dat, která je třeba ukládat a s kterými je nutné manipulovat, vyžaduje, aby se simulace diskretních událostí prováděla za pomoci výpočetní techniky. [10]

Spojitý systém je takový, jehož stavové veličiny se mění spojitě v závislosti na čase. Příkladem takového systému by bylo letadlo pohybující se, protože stavové veličiny, jako je poloha a rychlost, se mohou vzhledem k času měnit převážně spojitě. Rozdíl funkcí obou systémů lze pozorovat na obrázku níže.



Obrázek 4: Rozdíl mezi funkcí spojitou a diskrétní

Zdroj: Vlastní dle [12]

Je nutné brát v úvahu, že jen málo systémů v praxi je zcela diskrétních nebo zcela spojitých. Některé modely jsou smíšené modely systémů diskrétních událostí i spojitých. Existují také spojitě modely, které se po určité reinterpretaci stavových proměnných systému považují za modely diskrétních událostí, a naopak. I přes to u většiny systémů převažuje jeden typ změny, a díky tomu je možné je klasifikovat jako systém diskrétní nebo spojitý. [10]

2.4.3 Deterministické a stochastické

Pokud simulační model neobsahuje žádné pravděpodobnostní (náhodné) prvky, nazývá se deterministickým. V deterministických modelech známe výstup, jakmile je specifikována množina vstupů a vztahů v modelu. I přesto může vyhodnocení výstupu zabrat velké množství výpočetního výkonu. Výhodou však je, že stačí pouze jedno provedení výpočtu, narozdíl od simulací stochastických. Tím, že model neobsahuje pravděpodobnostní prvky, bude výsledek simulaci vždy stejný.

Většina systémů však musí být modelována tak, že mají alespoň některé náhodné vstupní prvky, a ty dávají vzniknout stochastickým simulačním modelům. Mezi takové systémy řadíme většinu výrobních a skladových systémů. Stochastické simulační modely vytvářejí výstup, který je sám o sobě náhodný, a proto je třeba s ním zacházet pouze

jako s odhadem skutečných charakteristik systému, což je jedna z obecných vlastností simulace. Pro přesnější určení chování skutečného systému je vhodné simulaci víckrát opakovat a následně výsledky jednotlivých opakování statisticky vyhodnotit. [10]

Vzhledem k tomu, že výrobní procesy s sebou nesou určité množství náhodných proměnných, mění se v čase a k změnám stavu dochází převážně skokově při realizaci daných událostí, lze snadno vyvodit, že pro simulace systémů výrobních procesů se nejčastěji užívají modely diskretních událostí, které jsou stochastické a dynamické. Už tento fakt by nám měl napovědět, pro jaké aplikace je lze použít, a pro jaké ne.

2.5 Aplikace simulace

Simulační modelování se stalo základním nástrojem pro analýzu předpokládané výkonnosti, ověřování návrhů, demonstrace a vizualizace operací, testování hypotéz a provádění mnoha dalších analýz. Je preferovaným nástrojem v řadě průmyslových odvětví a v některých odvětvích je dokonce vyžadováno před většinou významných investic do výroby, což vede k rostoucí závislosti podniků na simulaci při řešení různých problémů.

Otázka, která je však často přehlížena, ale měla by být položena, je následující: Je simulační modelování tím správným nástrojem pro daný problém? V minulosti bylo simulační modelování vyhrazeno pouze pro velmi rozsáhlé nebo specializované projekty, které vyžadovaly jednoho nebo více programátorů či analytiků se specializovaným vzděláním a mnoha zkušenostmi. Ovšem nedávné rozšíření simulačního softwaru umožnilo výrazný nárůst počtu aplikací, kde mnohé z nich provádějí uživatelé bez odpovídajícího vzdělání, školení nebo zkušeností.

Ačkoli mnoho těchto projektů skončí úspěšně, simulační nástroje mohou být, a někdy také jsou, nesprávně použity. To může vést k neúspěšným projektům a vyvolat mylné obavy, že simulační modelování, resp. simulace, nebo software jsou viníky těchto neúspěchů. Uvědomění si toho, kdy je třeba použít jiné než simulační nástroje, a že simulace nemusí být vždy vhodná, by tomu mělo pomoci předejít. [13]

2.5.1 Kdy je vhodné použít simulaci

Dle odborné literatury existuje deset pravidel pro vyhodnocení, zda simulace je, či není vhodná. První pravidlo uvádí, že simulace by se neměla používat, pokud lze problém vyřešit zdravým rozumem a velmi jednoduchými matematickými postupy.

Druhé pravidlo říká, že simulace by se neměla používat, pokud je problém jednoduchý a dá se vyřešit analyticky. Napomáhá tomu fakt, že dnes již pro mnoho problému existují modely ustálených front, pravděpodobnostní modely zásob a další, které lze řešit pomocí rovnic, tj. v uzavřeném tvaru, což je mnohem méně nákladná metoda než simulace.

Další pravidlo říká, že simulace by se neměla používat, pokud je levnější provést přímé experimenty. Pokud se problém týká existujícího systému, který může být narušen nebo změněn bez negativních následků, je vždy lepší provést přímý experiment. Díky tomu se lze vyhnout otázkám, zda byl simulační model dostatečně podrobný, a zda odpovídal realitě. Výsledky přímého experimentu jsou vždy spolehlivější než výsledky simulace.

Čtvrté pravidlo říká, že se simulace nemá používat, pokud náklady převyšují úspory. Pokud simulační studie stojí 200 000 Kč a úspory mohou činit 100 000 Kč, simulace není vhodná.

Pravidla pět a šest se týkají zdrojů. Říkají, že simulace by se neměla provádět, pokud nejsou k dispozici finanční zdroje nebo čas. Pokud se odhaduje, že simulace bude stát 200 000 Kč, a rozpočet projektu je pouze 100 000 Kč, není vhodné se pouštět do simulační studie. To stejné platí pro čas. Pokud jsou výsledky vyžadovány do dvou týdnů a simulace by trvala měsíc, simulační studie se nedoporučuje.

Simulace vyžaduje data, někdy velké množství dat, proto sedmé pravidlo říká, že pokud nejsou k dispozici žádná data nebo dokonce ani odhady, simulaci není vhodné realizovat.

Osmé pravidlo se týká schopnosti ověření a validace modelu. Není-li dostatek času nebo nejsou-li k dispozici kompetentní pracovníci pro ověření přesnosti modelu, simulace není vhodná.

Deváté pravidlo říká, že simulaci nelze realizovat, pokud mají manažeři nepřiměřená očekávání, žádají-li příliš mnoho a příliš brzy. Častou příčinou nesplnění očekávání projektu bývá právě nedostatečné vzdělání rozhodujících osob o tom, co je při řešení problému pomocí simulačního modelu reálné a možné. Vedení obvykle očekává příliš mnoho a příliš rychle. Když to nejde splnit, mohou mylně obviňovat simulační technologii nebo analytika. Dalším problémem je, že lidé bez zkušeností se simulací často vyvozují, že jakmile je systém jednou modelován, bude model schopen odpovědět na jakoukoli otázku. Může být obtížné vysvětlit, zejména v pozdním stádiu projektu, že modely jsou někdy schopny odpovědět pouze na otázky, k jejichž řešení byly navrženy.

Poslední pravidlo určuje, že se simulace nemá realizovat, pokud je chování systému příliš složité nebo ho nelze definovat. Simulovaný systém musí být před simulací důkladně pochopen, jinak bude analytik stavět model na základě dohadů. Některé systémy jsou natolik složité, že sestavení přesného modelu (v rámci přijatelné časového plánu a rozpočtu) není možné. Často se jedná o případ, kdy je systém závislý na lidském chování, které je velmi složité modelovat. [13]

Pokud se podnik neřídí výše zmíněnými pravidly, je silně pravděpodobné, že jeho simulační projekt nebude úspěšný, bude zbytečně nákladný, nebo nepřinese požadované výsledky. Ovšem splnění výše zmíněných pravidel při rozhodnutí o realizaci simulační studie stále není zárukou úspěšného projektu. Při simulační studii může dojít k mnohým chybám, které zapříčiní nepřesnost modelu či celkové selhání projektu. Avšak znalostí nejčastěji opakovaných chyb při realizaci simulačních projektů tomu může podnik předejít.

2.5.2 Chyby při použití simulace

Při rozhodování, zda je simulační studie vhodná pro daný projekt, je v první řadě důležité zvážit její výhody a nevýhody. Dále je nutné zohlednit i všechny ostatní relevantní aspekty projektu. Také je dobré brát v potaz, že v některých situacích mohou být užitečné jak simulační, tak analytické modely, kdy se simulace může využít pro ověření platnosti předpokladů potřebných pro analytický model. Dalším kladem užití

analytických modelů může být fakt, že z nich mohou vyplynout vhodné alternativy řešení, které je možné prozkoumat právě následnou simulační studií. Za předpokladu, že bylo přijato rozhodnutí o použití simulace na základě výše uvedených pravidel, je třeba si stále dávat pozor na určitá úskalí, aby byla úspěšná. Mezi ty řadíme:

- Neexistenci definovaných cílů od začátku studie.
- Nezapojení celého projektového týmu od začátku studie.
- Příliš detailní, nebo naopak hrubý model.
- Nedostatečnou komunikaci s vedením v průběhu simulační studie.
- Nepochopení simulace ze strany vedení (zadavatele).
- Nedostatek lidí se znalostí metodiky simulace a statistiky v modelovacím týmu.
- Nedostatek kvalitních a relevantních údajů o systému.
- Volbu nevhodného simulačního softwaru.
- Neschopnost správně identifikovat zdroje náhodnosti skutečného systému.
- Používání nevhodných rozdělení (např. normálního, rovnoměrného nebo trojúhelníkového) pro vstupní data simulace.
- Neprovedení dostatečného množství replikací běhu simulace.
- Nedodržení zahřívacího období. [10]

Vezmeme-li v potaz tyto nejčastější chyby při použití simulací, můžeme si postupně začít tvořit obraz o realitě simulačních studií a zjistíme, že jejich užití není jednoduché, ani všespásné, že simulační projekty jsou náročné, ale na druhou stranu i přes určité nevýhody přinášejí celou řadu výhod.

2.5.3 Výhody a nevýhody užití simulací

Mezi klíčové výhody můžeme zařadit skutečnost, že simulace je především snadno pochopitelným konceptem, a proto se často snáze zdůvodňuje managementu nebo zákazníkům. Kromě toho může simulační model působit důvěryhodněji, protože jeho chování lze porovnat s chováním skutečného systému, nebo proto, že vyžaduje méně zjednodušujících předpokladů, tudíž zachycuje více skutečných charakteristik zkoumaného systému. [8]

Mezi další výhody pak můžeme např. zařadit [14]:

- Možnost testovat pravdivost jakékoli hypotézy o tom, jak nebo proč dochází k určitým jevům.
- Simulace nám umožňuje manipulovat s časem. Můžeme tak systém provozovat několik měsíců nebo let během několika minut, což nám umožňuje rychle nahlížet na dlouhé časové horizonty nebo můžeme simulaci naopak zpomalit a zkoumat systém do detailů.
- Návrh simulačního modelu pomáhá při získávání neočekávaných poznatků, které by mohly vést ke zlepšení systému.
- Simulace nám umožňuje identifikovat úzká místa v systému informačních, materiálových a výrobních toků a testovat možnosti zvýšení rychlosti toku.
- Umožňuje nám získat poznatky o tom, jak modelovaný systém skutečně funguje, a pochopit, které proměnné jsou pro výkon nejdůležitější.
- Možnost testovat nové návrhy hardwaru, fyzického uspořádání, dopravních systémů apod. lze testovat bez vynaložení prostředků na jejich pořízení.
- Simulace pomáhá při formulaci a ověřování analytických řešení.

- Možnost zkoumání nových personálních politik, operačních postupů, rozhodovacích pravidel, organizační struktury, informačních toků apod., aniž by došlo k narušení organizačních procesů v stávajícím provozu.
- Velkou předností simulace je její schopnost umožnit nám experimentovat s novými a neznámými situacemi a odpovědět na otázky "co kdyby".

I když má simulace mnoho silných stránek a výhody, má i své meze a nevýhody. Mezi nevýhody simulací se řadí [15]:

- Tvorba modelů vyžaduje speciální školení. Je to dovednost, které člověk nabude až s časem a zkušenostmi.
- Pokud dva modely sestavují dva nezávislí pracovníci, mohou být podobné, ale je velmi nepravděpodobné, že budou stejné.
- Výsledky simulací může být obtížné interpretovat. Většina simulačních výstupů jsou v podstatě náhodné veličiny, protože jsou založeny na náhodných vstupech. Tím pádem může být obtížné rozlišit, zda je pozorování výsledkem vzájemných vztahů v systému nebo náhodnosti.
- Simulační modelování a analýza mohou být drahé a časově náročné. Šetření na zdrojích pro tvorbu modelu by mohlo vést k simulaci nebo analýze nedostačující pro řešení daného problému.
- Někdy je simulace používána v případech, kdy by stačil, nebo by byl dokonce vhodnější, analytický model.

2.5.4 Příklady užití simulace ve výrobě a logistice

Na základě pravidel použití simulace a jejích výhod a nevýhod můžeme vyvodit fakt, že je velmi efektivním nástrojem pro aplikaci ve výrobě. Prakticky však žádná výroba není stejná, a proto nelze říci, že tvorba simulační studie bude stejně efektivní pro jakýkoliv

výrobní závod. V mnoha případech se však simulace může stát funkčním nástrojem průmyslových podniků a pomoci jim k získání náskoku před konkurencí.

Díky tomu, že výrobní systémy poskytují mnoho možností pro využití simulace, tak se v nich využívá již řadu let. Důvodů pro tak velké využití simulace je několik, mj. [9]:

- Motivace je pro výrobce potřebná, aby si udrželi konkurenceschopnost.
- Ve výrobě se uplatňuje vysoká úroveň automatizace, která se dá efektivně simulovat.
- Je třeba testovat nové prozákaznické orientované výrobní strategie.
- Výrobní systémy jsou poměrně dobře definovány.
- Výrobní systémy a systémy pro manipulaci s materiálem jsou obvykle příliš složité pro jiné analytické techniky.

V rámci snahy udržet si konkurenceschopnost v souvislosti s měnícími se podmínkami na trhu je třeba přizpůsobit řízení společností. S tím také pomáhá simulace, která dává odpovědi na řadu otázek, které pomáhají správně se přizpůsobit těmto změnám trhu.

Mezi takové otázky např. patří [9]:

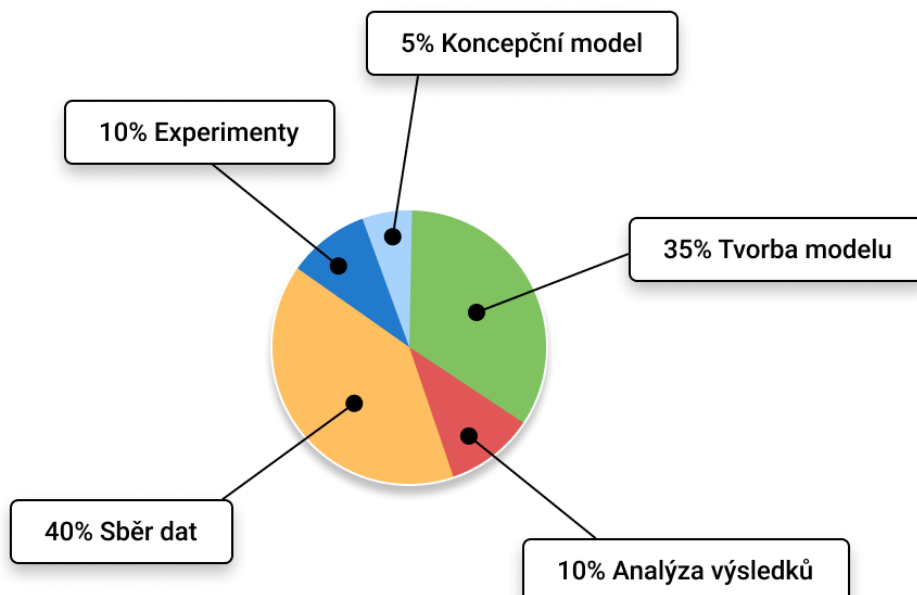
- Kdy by se mělo pořídit další výrobní zařízení?
- Kolik lidí bude příští měsíc potřeba ke splnění výroby objednávek?
- Lze přijmout novou zakázku, aniž by došlo ke zpoždění výroby dalších?
- Jak bude nový závod fungovat za pět let?
- Jak lze snížit zásoby rozpracované výroby a zkrátit dobu cyklu při současném zvýšení průchodnosti?
- Kde se nachází úzká místa ve výrobě?

- Jaký je vhodný počet manipulačních zařízení?
- Jaký je nevhodnější layout výroby?
- Jaká výrobní strategie přinese nejlepší výsledky?

Na všechny tyto otázky lze s určitou přesností odpovědět simulační studií, vypracovanou dle pravidel správného simulačního projektu.

3 Simulační projekt

Když se podnik rozhodne realizovat simulační projekt, obvykle většinu času a úsilí věnuje modelování simulačního modelu a práci s daty, ve vybraném softwaru, a jen zřídka věnuje dostatek času přípravě a projektovému plánování. Na obrázku č.5, který ukazuje obvyklé rozložení času mezi vybrané fáze simulační studie lze pozorovat, že 55 % času je většinou věnováno fázi sběru dat a tvorbě samotného modelu a pouze 5 % koncepčnímu modelování.



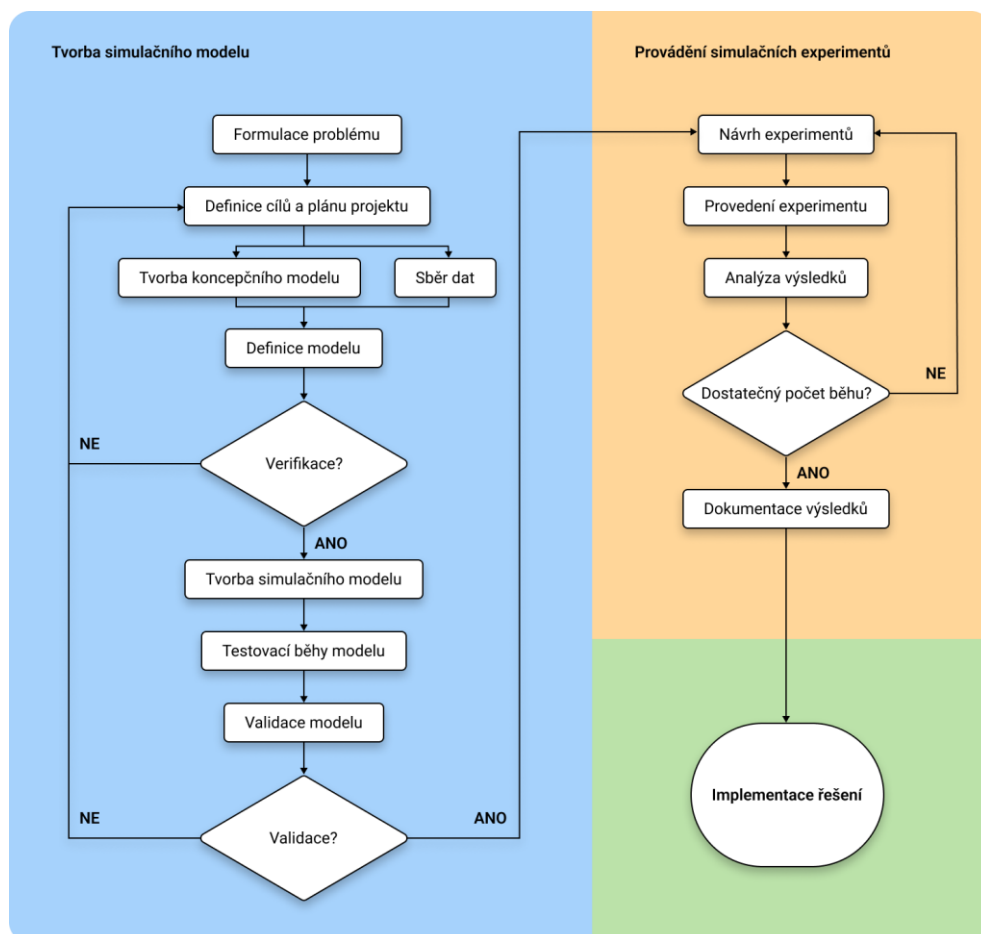
Obrázek 5: Časová dotace na jednotlivé části projektu

Zdroj: Vlastní dle [16]

V důsledku toho se může simulační projekt stát značně komplikovaným a nepřinést podniku požadované výsledky. Je nutné si uvědomit, že stejně tak jak tomu je u jiných podnikatelských projektů, tak i úspěch simulačního projektu je do značné míry založen na úspěšném řízení a pochopení všech jeho fází, jejich úskalí a nároků. [16]

3.1 Struktura simulačního projektu

Simulační projekt je procesem interpretačních, vývojových a analytických kroků. Tyto kroky obecně zahrnují formulaci problému, konceptualizaci modelu, sběr dat, tvorbu modelu, verifikaci, validaci, analýzu, dokumentaci a implementaci. Hierarchii a posloupnost těchto kroků lze pozorovat na obrázku níže. Detailnější náplň vybraných kroků je vysvětlena v následujících podkapitolách.



Obrázek 6: Kroky simulační studie

Zdroj: Vlastní dle [12] a [4]

3.2 Formulace problému

Při formulaci problému se jedná hlavně o samotnou identifikaci problému a následně jasné vymezení cílů studie, aby byl jasný její účel, proč se problémem zabýváme, jaké otázky si budeme klást a jak je chceme zodpovědět. Tato činnost se zpravidla realizuje ve spolupráci zadavatele a realizátora studie. Klíčové je přesně a srozumitelně definovat řešené problémy a na základě této definice určit, jestli je pro tento problém simulace vhodným nástrojem. Až poté je možné stanovit hlavní a vedlejší cíle studie. [4]

3.3 Definice cílů a plánu projektu

Simulační projekt bez jasně stanovených cílů je téměř nemožné úspěšně realizovat. Protože právě cíle určují směr, kterým se bude projekt ubírat a zároveň nám pomáhají k samotnému pochopení problému, který se snažíme řešit. V této fázi musí realizátor studie prostřednictvím diskusí se zadavatelem získat představu o řešeném systému a o problémech, které byly formulovány v předchozím kroku. Vzhledem k tomu, že zadavatelé jsou často v oblasti simulací relativně nezkušení, může se stát, že všechny potenciální cíle neodhalí. V takovém případě by jim měl asistovat realizátor studie s připravenými návrhy dalších cílů. Je však nutné vzít v potaz, že v dalších fázích studie se mohou objevit nové poznatky o systému, a že bude nutné některé cíle přehodnotit, vyloučit, či přidat nové. Proto by se při vytyčování cílů mělo počítat s určitou flexibilitou. Poté, co jsou vymezeny hlavní i vedlejší cíle studie, je vhodné navrhnout časový plán realizace, vytvořit koncepční model a shromáždit veškerá data, která souvisejí s cíli studie. [17]

Jako příklad možných definic cílů simulační studie lze uvést [18]:

- Ověření dopadu přidání hlavního dopravníku na systém.
- Jaká úzká místa nebo kapacitní problémy mohou vzniknout při změně layoutu?
- Analýza vytížení pracovišť po zavedení změn.

3.4 Tvorba koncepčního modelu

Tvorba koncepčního modelu a sběr dat jsou dvě úzce propojené činnosti (fáze), které se navzájem silně ovlivňují. Z dat lze vyčíst, jak systém funguje a pomáhají se sestavením koncepčního modelu, a naopak z koncepčního modelu vyplývá, jaká data jsou ještě třeba pro zaplnění prázdných míst, aby bylo možné úspěšně naplnit cíle studie.

V rámci koncepčního modelování se nejprve určují prvky, které je třeba zahrnout do simulačního modelu, stejně tak jako úroveň podrobností pro každý z nich. Následně se z jejich seznamu skládá samotný koncepční model. Z toho by dále mělo vyplynout, jaký bude rozsah a úroveň detailu daného modelu. Rozsahem modelu se rozumí to, co by mělo být do modelu ze systému zahrnuto, a úroveň detailu je myšlena, jak název napovídá, hloubka podrobností, do kterých se bude každý prvek modelu zkoumat.

Základním pravidlem je zahrnout pouze nezbytný rozsah a úroveň podrobností, jež jsou nutné pro splnění cílů projektu. Pokud bude navržený model příliš detailní, může být velmi náročné posbírat veškerá data a sestavit kompletní simulační model. Na druhou stranu je zřejmé, že pokud model nebude dostatečně podrobný, pak výsledky studie nebudou dosahovat požadované přesnosti. Proto je klíčové správné stanovení těchto parametrů.

Dále je třeba zmínit, že tvorba koncepčního modelu by měla být značně nezávislá na vybraném softwaru pro realizaci studie, ale naopak by mělo dojít k výběru softwaru až v další fázi projektu na základě navrženého konceptu. Zde je však nutné zmínit skutečnost, že to není vždy možné, ať už z důvodu vlastnění aktuální licence na software, či důvodu alokovaného rozpočtu na nákup potenciálního softwaru.

Díky seznamu prvků modelu a požadavkům na úroveň detailu modelu můžeme následně určit, jaká data budou potřeba. [19]

3.5 Sběr dat

Data jsou potřebná nejen k sestavení simulačního modelu, ale také k ověření jeho platnosti. Požadavky na data lze rychle identifikovat ze seznamu prvků koncepčního

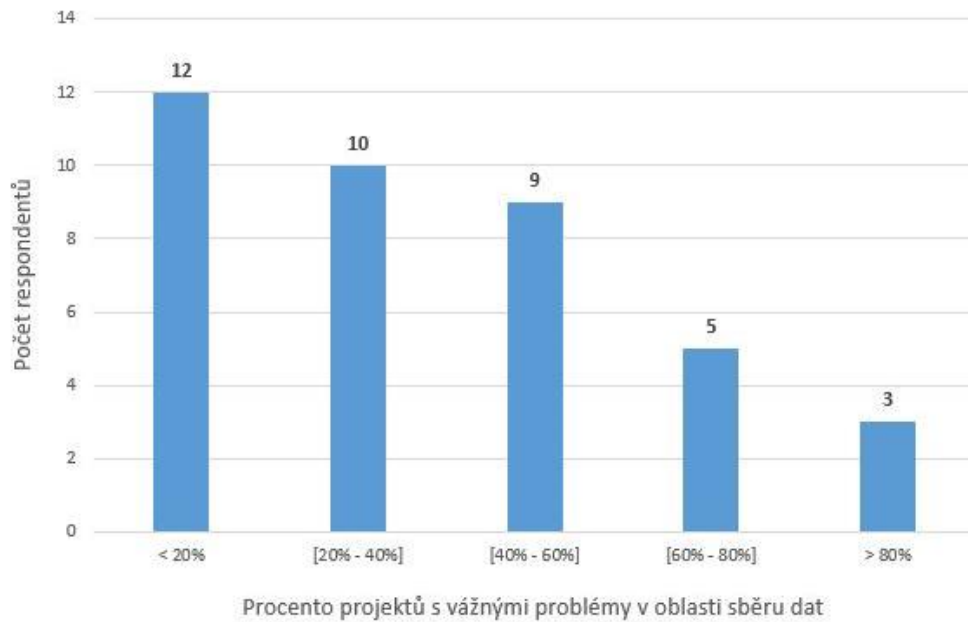
modelu, přičemž úroveň detailu přesně ukazuje, jaké informace jsou pro každý prvek potřebné. Avšak ne všechny údaje jsou snadno dostupné. Rozlišujeme tři základní kategorie dat:

- Dostupné
- Nedostupné, ale shromažďovatelné
- Nedostupné a neshromažďovatelné

Je očividné, že data z poslední kategorie budou při studii představovat jeden z hlavních problémů. Ten lze nejjednodušeji řešit odhadem jejich hodnot, který provedou experti na daný systém, nebo lze použít dostupná data z obdobného systému. Pro tyto odhady se dále doporučuje určení odpovídajícího statistického rozdělení. Je však možné, že výsledky založené na odhadovaných údajích budou značně nepřesné. Proto je dobré po jejich odhadu provést citlivostní analýzu, aby se zjistilo, jak moc bude jejich případná nepřesnost ovlivňovat výsledky. [17]

V souvislosti se sběrem dat je třeba zdůraznit to, že tato fáze bývá obecně jednou z nejkritičtějších fází projektu, protože přesnost modelu a s tím i samotná úspěšnost studie je přímo závislá na jejich kvalitě a dostupnosti. Ostatně k zdůraznění toho, jak je tato fáze projektu kritická, a že téměř každý simulační projekt je v této fázi nejkomplicovanější nám mohou posloužit nálezy studie: *A pilot survey on data identification and collection in simulation projects*. [20]

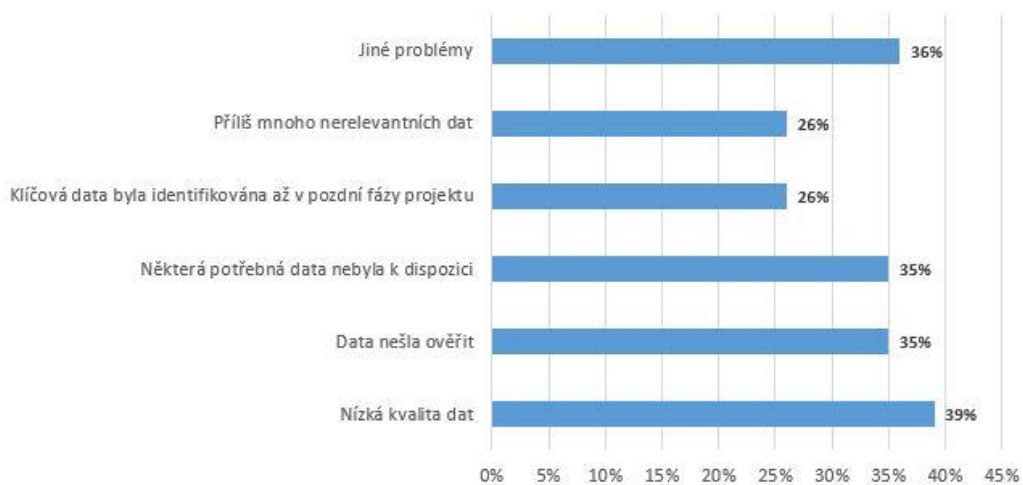
Ve studii se dotázali celkem 39 respondentů se zkušenostmi v simulačním modelování, kdy nejvíce respondentů mělo 5-10 let zkušeností v oboru a vytvořili desítky simulačních modelů. Respondenti byli tázáni skrz dotazník otázkou, jak často se setkali se závažnými problémy s daty. Výsledkem bylo, že v průměru 43 % projektů (17 respondentů) mělo vážné problémy při zjišťování a sběru dat, což lze pozorovat na grafu č.1.



Graf 1: Proporce projektů s vážnými problémy v oblasti sběru dat

Zdroj: Upraveno dle [20]

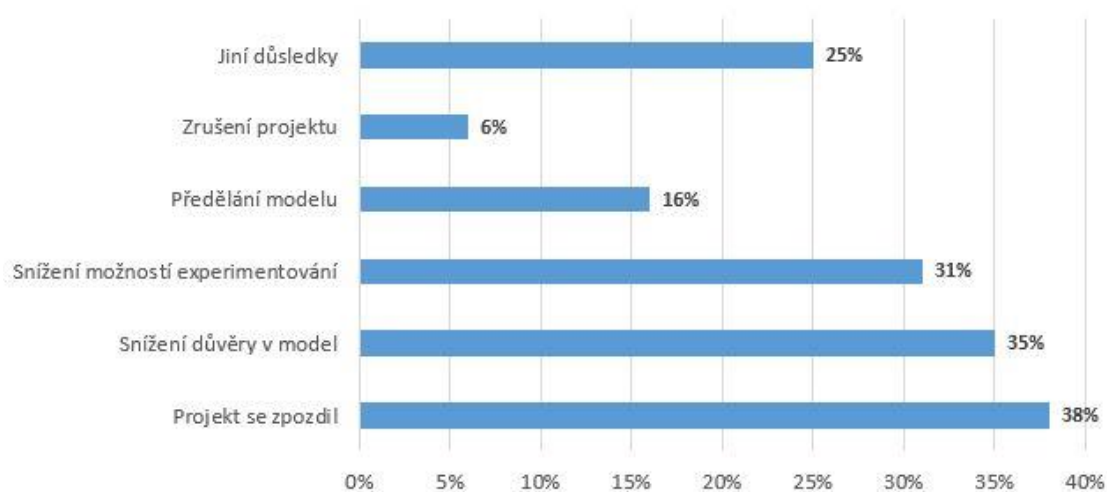
Mezi ně konkrétně patřily problémy s: nízkou kvalitou dat, ověřitelností, dostupností, relevancí a pozdní identifikací. Přesné výsledky lze vidět na grafu č.2. Respondenti dále komentovali kategorii „Jiné problémy“, kde se nejčastěji objevovali poznatky o tom, že sami zadavatelé často nerozuměli svým datům, nebo nevěnovali dostatečnou pozornost jejich předání realizátorům studie.



Graf 2: Proporce konkrétních problémů s daty napříč projekty

Zdroj: Upraveno dle [20]

Výzkum se také zajímal o to, jaký dopad tyto problémy s daty mají na simulační projekt. Z pěti možných důsledků se celkem 11 (38 %) respondentů shodlo, že problémy s daty nejčastěji způsobí zpoždění projektu. Následovalo snížení důvěry v model a snížení možností pro provádění experimentů. Některé simulační projekty byly kvůli problémům s daty dokonce kompletně zrušeny. To vše ukazuje, jak závažné dopady mají problémy s daty na simulační studie, a jak je důležité, aby sami zadavatelé již před zahájením projektu s daty dokázali efektivně pracovat. [20]



Graf 3: Poměr důsledků problémů s daty na simulační projekty

Zdroj: [20]

3.6 Definice modelu a verifikace

Definicí modelu se rozumí správná dokumentace všech jeho proměnných, jejich atributů a funkcí, což je jednou z nejdůležitějších částí sestavování simulačního modelu. Pokud je to možné, měla by se tato definice provést v rámci simulačního softwaru. Důvodem je, že čím složitější je logika v rámci modelu, tím více informací o proměnných a attributech, jejich použití a funkcích je třeba zdokumentovat, s čímž může většina simulačních softwarů pomoci, protože provádí dokumentaci automaticky.

V rámci této dokumentace se doporučuje užívat komentáře a poznámky, které slouží pro budoucí usnadnění pochopení logiky modelu pro osoby, jež jej budou užívat. Je vhodné

komentovat i věci, které se v danou chvíli nezdají podstatné, protože mohou mít velký význam v budoucnu, když nebude jasné, proč byl model vytvořen právě takovým způsobem. Tyto komentáře také slouží pro zadavatele modelu při jeho verifikaci.

Verifikací modelu je myšlena kontrola správnosti vstupních dat a jeho předpokladů. Při ověřování modelu by se mělo zkontrolovat, že všechna data zadaná do modelu odpovídají dokumentaci. [16]

3.7 Tvorba simulačního modelu a validace

Stavbu modelu je nejlepší provádět v malých iterativních krocích. Pro každou část se nejprve zadají základní údaje a až poté se prohloubí podrobnost jednotlivých prvků na požadovanou úroveň. Zároveň je vhodné průběžně aktualizovat dokumentaci. Pokud se dokumentování nechá až na konec, je pravděpodobné, že se na mnoho detailů zapomene, a dokumentace bude neúplná, nebo že se dokumentace vůbec nevytvoří.

Po vytvoření modelu následuje jeho validace. Což je proces kontroly správnosti modelu. Validace modelu musí zajistit, aby se každý prvek modelu choval zamýšleným způsobem. Tento krok je velmi důležitý, ale přesto je často přehlížen. Experimentování totiž nesmí začít, dokud se zadavatel a realizátor studie neshodnou, že je model správný, jinými slovy, že model dostatečně přesně reprezentuje skutečný systém. Důležité je také potvrzení toho, že model dokáže naplnit cíle projektu. Dnes existuje celá řada metod, které lze pro validaci modelu využít. [17]

Tyto metody lze rozdělit do šesti kategorií na základě důvěryhodnosti jejich hodnocení. Úroveň formálnosti každé kategorie se zvyšuje od velmi neformálních po zcela formální. S rostoucí formálností každé metody se také zvyšuje i její složitost. Je třeba zmínit, že některé metody mají podobné charakteristiky, což je způsobeno tím, že se metody z různých kategorií překrývají. I přesto lze mezi metodami validace pozorovat rozdíly. Metody validace se dělí do následujících kategorií [21]:

- Kategorie neformálních metod

- Kategorie statických metod
- Kategorie dynamických metod
- Kategorie symbolických metod
- Kategorie omezených metod
- Kategorie formálních metod

Neformální metody validace jsou řazeny mezi nejčastěji používané. Jejich název vychází z faktu, že jsou jejich výsledky do značné míry závislé na lidském uvažování a subjektivitě a nevyužívají žádné přísnější matematické formalismy. Mezi neformální metody patří: audit, desk-checking, face validation, inspekce, revize, Turingův test a walk-through.

Je na místě zmínit, že se mnohdy jedná o cizí pojmy z oblasti informačních technologií, pro které neexistují vhodné české alternativy. Vzhledem k tomu by pro jejich pochopení byl nutný bližší popis, pro který však kvůli rozsahu textu není místo.

Statické metody validace se zabývají hodnocením přesnosti statického modelu na základě vlastností jeho zdrojového kódu. Statické techniky nevyžadují spuštění modelu, ale pouze zhodnocení kódu jako takového. Tyto techniky jsou velmi populární a široce používané, přičemž je k dispozici mnoho automatizovaných nástrojů, které pomáhají při jejich exekuci. Statické techniky pomáhají při validaci získat informace o struktuře modelu, použitých technikách, postupu kódování, toku dat a řízení modelu, syntaktické přesnosti a modelové konzistenci. Řadíme mezi ně: kontrolu konzistence, analýzu toku dat, analýzu založenou na grafech, sémantickou analýzu, strukturální analýzu a syntaktickou analýzu.

Dynamické techniky validace již spuštění simulace (modelu) vyžadují, protože jsou určeny k vyhodnocení modelu a jeho kódu na základě chování při simulaci, což mají společné se **symbolickými metodami validace**, které však ve vysoké míře využívají spíš grafické zobrazování namísto hodnocení kódu.

Dynamické techniky se často používají ve třech krocích, kdy je hotový model vybaven měřícím kódem, následně se spustí, a nakonec jsou jeho výstupy analyzovány. Mezi tyto metody lze zařadit: black-box testing, bottom-up testing, debuggování, execution monitoring, execution profiling, execution tracking, field testing, grafické srovnání, prediktivní validaci, regresivní testování, senzitivní analýzu, statistické testování a další.

Mezi symbolické techniky patří: grafy příčin a následků, analýza rozdělení, analýza cest a symbolické provádění.

K posouzení správnosti modelu na základě **omezených metod** se používají techniky kontroly tvrzení, hraniční analýzy a induktivních tvrzení.

Formální metody validace jsou založeny na formálním matematickém důkazu správnosti. Pokud je realizovatelná, tak je nejefektivnějším prostředkem modelové validace. Bohužel metody formálního důkazu správnosti, vzhledem k jejich složitosti, nelze jednoduše použít ani na přiměřeně složitých simulačních modelech. Mezi nejznámější formální techniky se řadí: metoda indukce, odvození, X-kalkulu, logické dedukce, predikátového kalkulu, predikátové transformace a důkazu správnosti. [21]

3.8 Návrh a realizace experimentů

Jakmile je model úspěšně validován, je vhodné navrhnout experimenty. Ty se, stejně jako všechny ostatní fáze simulačního projektu, provádí iterativním způsobem, tak, že se postupně přechází mezi výběrem experimentů, jejich realizací, a nakonec analýzou výsledků, z které mnohdy získáme další inspiraci pro nové experimenty. Avšak před samotnou realizací experimentů je nutné určit čas zahřívacího období, vhodný počet simulačních replikací i samotnou délku každého simulačního běhu. [17]

Zahřívací období zajišťuje, aby při zahájení sběru výsledků byl model v reálném stavu. Kdyby model v reálném stavu nebyl, došlo by u těchto výsledků k výraznému zkreslení. Tato fáze funguje tak, že se před shromažďováním výsledků nechá model běžet po dobu "zahřívání", kdy např. u modelu výrobní továrny dochází k naplnění výrobního procesu

jednotlivými díly. Tím se model dostává do realistického stavu svého provozu, a simulace nezačíná s „prázdným“ závodem.

Druhým rozhodnutím je, jak **dlouho by měl simulační běh trvat**. Některé systémy mají přirozený bod ukončení, například konec pracovní doby, ale existuje mnoho systémů, který takový bod nemají, např. výrobní závod. Pro takové systémy platí, že čím delší běh simulace nastavíme, tím přesnější výsledky dostaneme.

V poslední řadě je třeba rozhodnout, jaký **počet replikací experimentu** bude realizován. Každá další replikace se provádí opětovným zapnutím simulace se změnou náhodných čísel se stejným scénářem. Čím vyšší provedeme počet replikací, tím větší vzorek dat získáme, a tím zvýšíme důvěryhodnost celé simulační studie.

Po určení výše uvedených proměnných následuje otázka výběru vlastních experimentů. V případě, že se simulační projekt realizuje již s předdefinovanými cíli pro porovnání několika alternativních scénářů, můžeme tento krok považovat za hotový. Obtížnější situace nastává v případě, kdy je cílem simulační studie pouhé nalezení nějakého cíle, např. optimální nastavení výrobní linky, aniž by byly definovány prostředky k jeho dosažení. V takovém případě lze měnit řadu proměnných současně, s čímž velmi rychle narůstá i počet simulačních běhů. Pokud by byly určeny 4 experimentální proměnné, z nichž by každá mohla nabývat tří různých hodnot, bylo by třeba otestovat celkem 81 scénářů, a v případě 8 replikací pro každý scénář bychom museli provést 648 simulačních běhů. V případě nedostatečného výpočetního výkonu by se pak celá experimentální fáze simulační studie mohla značně protáhnout. [17] [10]

3.9 Analýza výsledků a jejich dokumentace

Ověření toho, do jaké míry bylo dosaženo cílů projektu lze provést analýzou výsledků. V této fázi je třeba brát v potaz, že výsledky jsou pouhé odhady toho, jak se bude skutečný systém chovat. Proto je vhodné použít intervaly spolehlivosti a testy hypotéz, které můžou určit, jak důvěryhodné výsledky jsou.

Při vyvozování závěrů a definování doporučení v dokumentaci je třeba pamatovat na to, že simulace je pouhým nástrojem pro podporu rozhodování, a ne rozhodnutím samotným. Proto je třeba před sestavením seznamu doporučení vzít v úvahu i širší vlivy kontextu organizace.

Výsledky by následně měli být komunikovány písemnou, či ústní formou všem stranám, které se projektu účastnili. Nejlépe ucelenou formou závěrečné zprávy projektu. V takové zprávě je vhodné zopakovat řešený problém, projektové cíle a představit simulační model, dále lze přejít k experimentům, jejich výsledkům, závěrům a doporučením. Spolu se závěrečnou zprávou by měly být odevzdány i dokončené dokumenty, které vznikaly v průběhu celého projektu. Mezi ně patří: specifikace projektu, modelová dokumentace, uživatelská dokumentace, revize projektu a zápisy z jednání projektového týmu. Tyto dokumenty slouží k usnadnění budoucích projektů, které daný model používají nebo z něj vycházejí. [17]

4 Simulační software

Jedním z nejdůležitějších rozhodnutí, které může simulační studii ovlivnit, je výběr simulačního softwaru. Pokud bude zvolen software příliš jednoduchý, hrozí nedostatečná funkčnost nebo neflexibilní nastavení proměnných systému. Na druhou stranu, pokud je použitý software příliš složitý, může být tvorba modelu matoucí a zúčastněné strany se ztratí v přílišných možnostech, které software nabízí v rámci tvorby modelu i interpretace výsledků.

Veškerý simulační software, který je v současnosti na trhu, musí splňovat některé základní požadavky založené na charakteristikách diskrétních simulačních modelů. Mezi tyto klíčové funkce se řadí např. možnost generovat pseudonáhodná čísla podle určité pravděpodobnosti nebo s určitým rozdělením, rozhodování o posloupnosti operací, automaticky zapisovat a mazat data, shromažďovat výsledky, interpretovat je a odhalovat konflikty. Dále existují vlastnosti a funkce softwarů, které se liší v závislosti na konkrétním poskytovateli, ty jsou blíže popsány v dalších kapitolách.

4.1 Vlastnosti a funkce simulačního softwaru

Nejzákladnější a nejdůležitější vlastnost, kterou musí simulační software mít, je definována jako „flexibilita modelování“. Flexibilita modelování v tomto případě znamená schopnost modelovat systém způsobem, že jeho provozní procesy mohou dosáhnout jakékoli úrovně složitosti. Vliv na flexibilitu modelu mají hlavně schopnosti softwaru nastavovat a upravovat vlastnosti jednotlivých entit a systémových proměnných při simulaci.

Druhou důležitou vlastností je uživatelská přívětivost simulačního softwaru. Základem pro dosažení maximální využitelnosti je přehledná grafická prezentace programu (UI), nebo jeho doplňkových produktů (uživatelské manuály, instruktážní videa atd.).

Další důležitou funkcí je schopnost softwaru vytvořit hierarchické uspořádání. To se používá k seskupování entit do stále větších sad, z nichž každá může být použita samostatně v jiných simulačních studiích.

Mezi další důležité vlastnosti a funkce simulačního softwaru patří rychlost simulačních výpočtů, využitelnost vytvořených simulačních modelů pro všechny (nejen toho kdo ho vytvořil), schopnost kooperace s ostatními podnikovými softwary, simulace nákladů, úroveň technické podpory, cena softwarové licence a v poslední řadě jeho flexibilita.
[10]

Právě flexibilita softwaru je do značné míry ovlivněna jeho univerzalitou z hlediska účelu jeho využití. Na tomto základě lze simulační softwary rozdělit na softwary pro všeobecné využití a softwary se specifickým zaměřením, tím může být např. zaměření na výrobu.

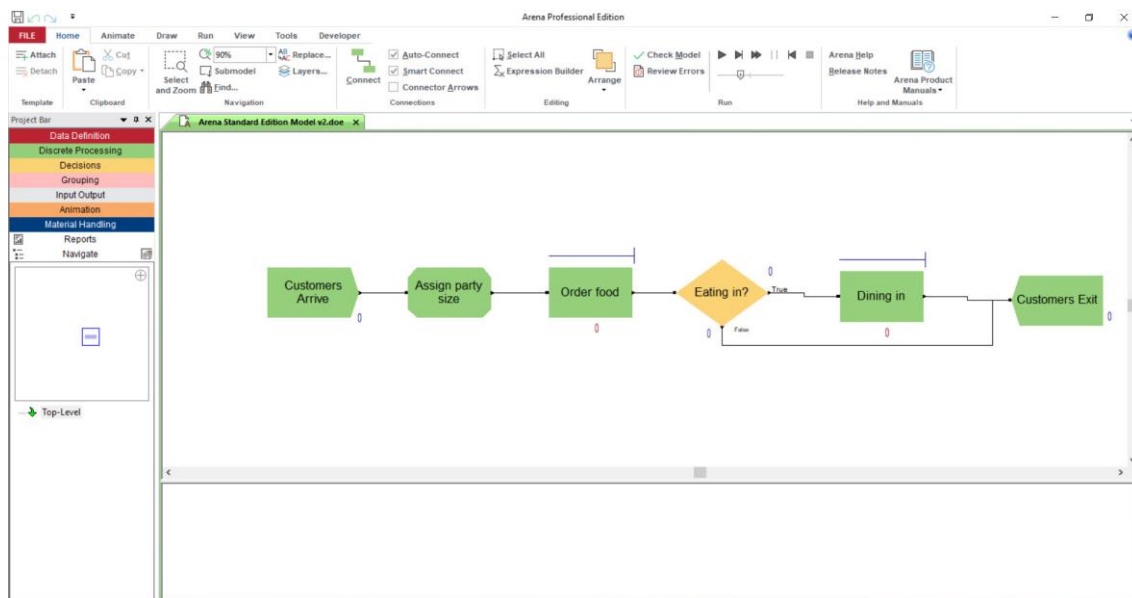
4.2 Software pro všeobecné využití

Obecný simulační software lze použít pro jakoukoli aplikaci, ale může mít speciální funkce pro určité aplikace (např. pro výrobu nebo služby). Naproti tomu aplikačně orientovaný simulační software je určen hlavně k použití pro určitou aplikaci, jako je

výroba, zdravotnictví nebo komunikační sítě. Příkladem softwaru pro všeobecné využití může být např. software Arena, který je blíže představen v textu níže. [10]

4.2.1 Arena

Arena je komerční univerzální simulační software, který vyvíjí a prodává společnost Rockwell Automation. Software je běžně využíván pro aplikace, jako je výroba, dodavatelské řetězce, vojenská obrana, zdravotnictví a kontaktní centra. Existují dvě různé verze programu: Standard Edition a Professional Edition. Program Arena usnadňuje vývoj a provádění počítačových simulačních modelů. Poskytuje přístup k základnímu simulačnímu jazyku SIMAN prostřednictvím prostředí, které umožňuje sestavovat modely pomocí metodiky přetahování vývojových diagramů. Prostedí Arena má panely, které umožňují přístup ke konstrukcím modelovacího jazyka. Kromě toho prostředí poskytuje přístup k běžným simulačním činnostem, jako je animace modelu, spuštění modelu a zobrazení výsledků, pomocí panelu nástrojů a nabídek. Rozhraní simulačního softwaru Arena je zobrazeno na obrázku níže [22]



Obrázek 7: Rozhraní simulačního softwaru Arena

Zdroj: [23]

4.3 Software pro užití ve výrobním procesu

Ačkoliv lze výrobní systémy simulovat za pomoci softwaru pro všeobecné využití, tak nástroje specializované na simulace výrobních systémů mohou v závislosti na složitosti výrobního procesu modelování výrazně zjednodušit a urychlit.

Simulační softwary zaměřené na simulaci výroby jsou specifické možnostmi modelování funkcí, jež lze najít ve většině výrobních systémů. Na trhu existuje mnoho různých simulačních programů zaměřených na výrobu a každý z nich má své silné i slabé stránky. Některé programy disponují snadným použitím na úkor nižší flexibility, zatímco jiné se zaměřují na vyšší flexibilitu, ale jejich použití je obtížnější. Nejlepší programy umožňují uživateli kombinovat snadno použitelné funkce s flexibilnějšími funkcemi vyšší úrovně. Mezi hlavní aspekty výrobních systémů, na něž se softwary pro simulaci výrobních procesů zaměřují, patří zdroje, manipulace s materiálem, řídicí logika, pracoviště, mezisklady, plánování zakázek, data o zpracování výrobků a reporty. Jednotlivé aspekty jsou blíže rozebrány v textu níže. [24]

Zdroje

Většinu výrobních systémů tvoří zdroje, jako jsou výrobní zařízení, pracovní síla a materiály. Dostupnost zdrojů je obvykle definována pracovními směny nebo dostupností a spotřebou materiálu. Zdroje jsou často seskupovány do skupin a následně přidělovány k pracovištím dle pravidel výběru. Často se stane, že je stejný zdroj ve více skupinách. Schopnost flexibilně modelovat zdroje a skupiny zdrojů spolu s odpovídajícími směny je klíčovým požadavkem ve většině výrobních aplikací. [24]

Manipulace s materiálem

V mnoha případech zařízení pro manipulaci s materiálem významně ovlivňují výkonnost celého výrobního systému. Mezi tato zařízení patří AGV, dopravníky, závěsné jeřábové systémy apod. Obecně se jedná o komplexní systémy, které není snadné modelovat. S tím mohou pomoci právě softwary s vestavěnými funkcemi k jejich modelování. [24]

Řídicí logika

V typickém výrobním systému se úloha přesouvá z jednoho pracoviště na druhé. Řídicí logika pro tento tok entit v systému může být založena na logice push, pull nebo na jejich specifické kombinaci. Pro každou třídu řídicí logiky jsou nutné speciální modelovací funkce. V rámci některých systémů jsou dále vyžadovány flexibilní funkce, které umožňují specifikovat detaily a výjimky v této řídicí logice. [24]

Pracoviště

Zpracování úlohy na pracovišti obvykle zahrnuje více fází (např. seřízení, zpracování, výdej). Každá fáze navíc může vyžadovat jinou sadu prostředků pro její nastavení. Na některých pracovištích může k těmto fázím docházet i souběžně, proto je žádoucí, aby vybraný software s tímto aspektem počítal. [24]

Mezisklady

V mnoha výrobních systémech je kapacita meziskladů omezená a představuje úzké místo výrobního procesu. Plný mezisklad může zablokovat následující i předchozí pracovní stanici. Modelování takového aspektu je při simulaci výrobních procesů značně důležité. [24]

Plánování zakázek

V mnoha systémech se každý typ výrobku může řídit vlastním procesním plánem. Tento plán definuje tok materiálu výrobou a informace pro zpracování zakázky. Procesní plány se mohou lišit od jednoduchých přímočarých sekvencí až po složité sítě zahrnující dílčí sestavy a paralelní operace. [24]

Data

Existuje několik různých způsobů, jak definovat údaje o zpracování úloh (časy zpracování, potřebné zdroje atd.) v rámci výrobního systému. Ve výrobních systémech

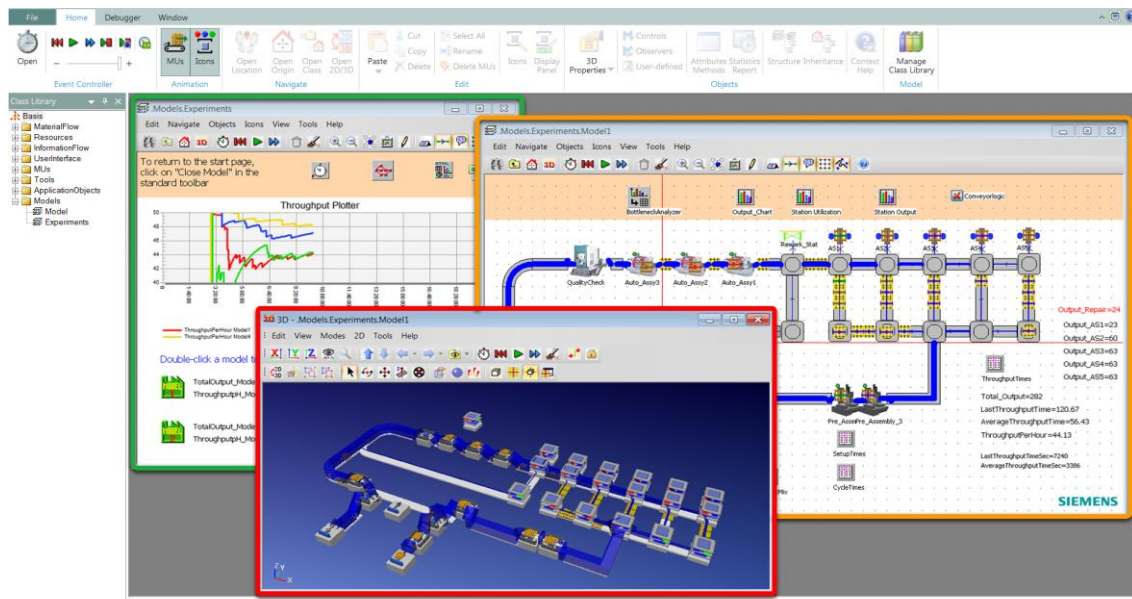
jsou údaje o zpracování často součástí plánu výroby. V modelu však mohou být tytéž údaje vlastností pracovní stanice nebo vybrané entity. Mnoho systémů kombinuje tyto reprezentace dat zakázek, pracovišť a zdrojů. V takovém případě jsou data o zpracování rozdělena mezi plán procesu, pracovní stanici a vybrané zdroje. Je důležité, aby každý modelovací nástroj dokázal reprezentovat více typů těchto datových struktur. [24]

Reporty

Proces interpretace výsledků simulace výroby a logistiky je v mnoha případech podobný interpretaci výsledků jakéhokoliv jiného stochastického modelu. Existují však speciální reporty zaměřené přímo na výrobu. Důležité prvky těchto reportů mohou být metriky jednotlivých zařízení, nebo údaje o čase zpracování úlohy či nákladech. [24]

4.3.1 Siemens Plant Simulation

Software Plant Simulation se řadí mezi jedny z nejpoužívanějších programů používaných pro simulaci výrobních systémů a zahrnuje veškeré výše zmíněné aspekty potřebné pro simulaci výroby. Plant Simulation umožňuje modelovat, simulovat, zkoumat a optimalizovat logistické a výrobní systémy, včetně jejich procesů. V rámci modelu lze analyzovat materiálové toky, využití zdrojů a logistiku všech úrovní, plánování výroby od globálních výrobních zařízení až po malé závody a konkrétní linky.



● 3D náhled ● 2D náhled ● Okno analýzy

Obrázek 8: Uživatelské rozhraní softwaru Plant simulation

Zdroj:

Software používá simulaci diskretních událostí a statistické analýzy pro optimalizaci manipulace s materiálem, logistiky, využití strojů a požadavků na pracovní sílu. Za tímto účelem využívá grafickou vizualizaci, funkce pro tvorbu grafů a reportů a nástroje pro experimentování, které umožňují vyhodnocení chování výrobních systémů. Software dále disponuje modulem pro optimalizaci výrobních systémů, který využívá genetické algoritmy.

Modely lze využít k zefektivnění průchodnosti, odstranění úzkých míst a minimalizaci rozpracovanosti. Grafické výstupy pro automatickou detekci úzkých míst, analýzu propustnosti, využití strojů, zdrojů a zásobníků, Sankeyho diagramy a Ganttovy diagramy patří k mnoha nástrojům, kterými software disponuje pro posouzení výkonnosti výrobních systémů. Simulační modely dále zohledňují interní a externí dodavatelské řetězce, výrobní zdroje a obchodní procesy a umožňují dynamicky analyzovat dopad různých variant výroby.

Plant Simulation dále obsahuje integrovaný analyzátor energie, který zobrazuje aktuální, maximální a celkovou spotřebu energie. Integrovaný energetický plotter dynamicky vizualizuje spotřebu energie během simulace, což umožňuje sledovat spotřebu energie během pracovní doby i plánovaných přestávek. Umožňuje tak graficky vizualizovat spotřebu energie a identifikovat oblasti pro potenciální úspory.

V rámci Plant Simulation lze také propojit virtuální model závodu s reálným řízením závodu a simulovat tak skutečnou výrobu. Díky tomuto lze testovat a optimalizovat řízení, automatizaci, dopravu materiálu a celý výrobní provoz. Lze připojit buď virtuální (softwarový) programovatelný logický automat (PLC), nebo skutečný (hardwarový) PLC z reálného prostředí. [25]

4.3.2 Flexsim

Flexsim je výkonný a snadno použitelný simulační nástroj, který umožňuje uživateli vytvořit trojrozměrný simulační model. Flexsim se stejně tak, jako Plant Simulation, řadí mezi nástroje simulující diskrétní události, který poskytuje realistické grafické animace a rozsáhlé přehledy výkonnosti, které umožňují identifikaci úzkých míst výroby a vyhodnocení jejich alternativních řešení.

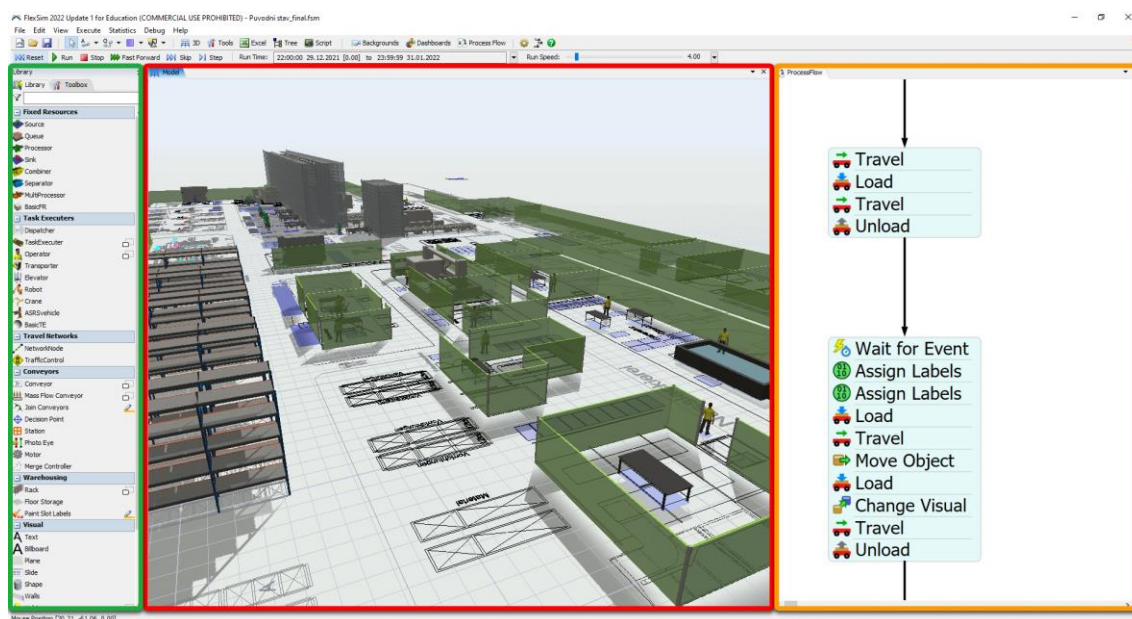
Flexsim je dodáván s knihovnou před-konfigurovaných výrobních objektů (zařízení, logistické prvky, entity), které lze použít k rychlému sestavení modelu. Tyto objekty lze následně přizpůsobit dle vlastností systému s ohledem na řídicí logiku, zdroje, manipulaci apod.

Program dále disponuje nástrojem Process Flow, který umožňuje za pomoci předpřipravených bloků aktivit vytvářet základní nebo složitou logiku v prostředí vývojových diagramů. To udržuje logiku řízení modelu na jednom místě a umožňuje její škálovatelnost a propojení s 3D modelem, který se dá tímto způsobem řídit. Process Flow a další rozhraní softwaru lze vidět na dalším obrázku.

V rámci softwaru lze dále využít i skriptovací jazyk FlexScript, který je podobný jazyku C++. Ten tvoří vstupní bránu k dalším simulačním příkazům, které umožňují psát

jednoduché příkazy k rozšíření možností modelu. Software byl také navržen s otevřenou architekturou postavenou na jazyku C++. Díky tomu jej lze rozšířit doplňky, které rozšiřují software o další funkce.

Mezi další přednosti softwaru patří funkce ExpertFit, která vezme data shromážděná v reálném systému a následně určí, které rozdělení pravděpodobnosti je nejlépe reprezentuje. [26] [27]



● Knihovna objektů
 ● 3D náhled
 ● Process Flow

Obrázek 9: Rozhraní softwaru Flexsim

Zdroj: vlastní

4.4 Výběr simulačního softwaru

Po důkladném seznámení s nabídkou simulačních softwarů na trhu stojí podnik před rozhodnutím, který software pro simulační studii použije (zakoupí). Při výběru simulačního softwaru je důležitých mnoho funkcí a faktorů, na které se musí brát ohledy. Ty byly blíže specifikovány v kapitole 4.1. Při hodnocení a výběru simulačního softwaru se lze řídit následujícími radami.

Není vhodné zaměřovat se pouze na jednu funkci, jako je např. uživatelská přívětivost. Je nutné zvážit všechny klíčové funkce, jako je možnost dosáhnout potřebné úrovně detailu, snadné učení se práce se softwarem či podpora od dodavatele.

Další důležitou vlastností simulačního softwaru je rychlost provádění výpočtů. Tím není myšlena pouze rychlost výpočtů při experimentech, ale i rychlost vývoje modelu. Během optimalizace modelu se může mnohokrát stát, že model doběhne do bodu v simulovaném čase, kdy se vyskytne chyba, a kvůli tomu bude třeba simulaci opakovat.

Také je vhodné brát veškerá reklamní tvrzení s určitým nadhledem. Mnohé reklamy komunikují pouze pozitivní vlastnosti softwaru. Stejně tak při demonstraci softwaru dodavatelé často prezentují pouze ukázkový problém, který je připraven pro představení možností softwaru, ale reálný problém může vytvořit nové patové situace. [11]

V případě rozhodování mezi výše uvedenými softwary pro simulaci výrobních systémů můžeme vyjít ze studie: „*A Comparison Analysis of the Computer Simulation Results of a Real Production System*“, jejímž cílem bylo porovnat výsledky simulace získané právě ze softwaru FlexSim a Plant Simulation, a zjistit, zda se kvalita jejich simulace liší, a tím pádem, zda na volbě softwaru v tomto ohledu vůbec záleží.

Pro simulaci byla použita data skutečného výrobního systému a výzkumníci provedli simulaci pro 1 h a 8 h dlouhou pracovní směnu. Hlavními výrobními ukazateli, které studie sledovala, byly: vytížení pracovišť, využití mezikladů a operátorů a průchodnost výrobou.

Výsledkem studie bylo zjištění, že rozdíl ve výsledcích simulace získaných pro oba balíky je nepatrný. V rámci vytížení pracovišť byly rozdíly mezi simulačními modely menší než 2 % a s rostoucí dobou simulace se ještě snižovaly. Větší reportované rozdíly ostatních výrobních ukazatelů byly způsobeny pouze rozdílnou vzdáleností mezi jednotlivými pracovišti v obou modelech. Z toho důvodu výzkumníci došli k závěru, že rozdíly ve výsledcích simulací jsou skutečně velmi malé, a že při výběru simulačního softwaru by měly být zohledněny hlavně další faktory, jako je cena softwaru, jeho údržba a uživatelská přívětivost. [28]

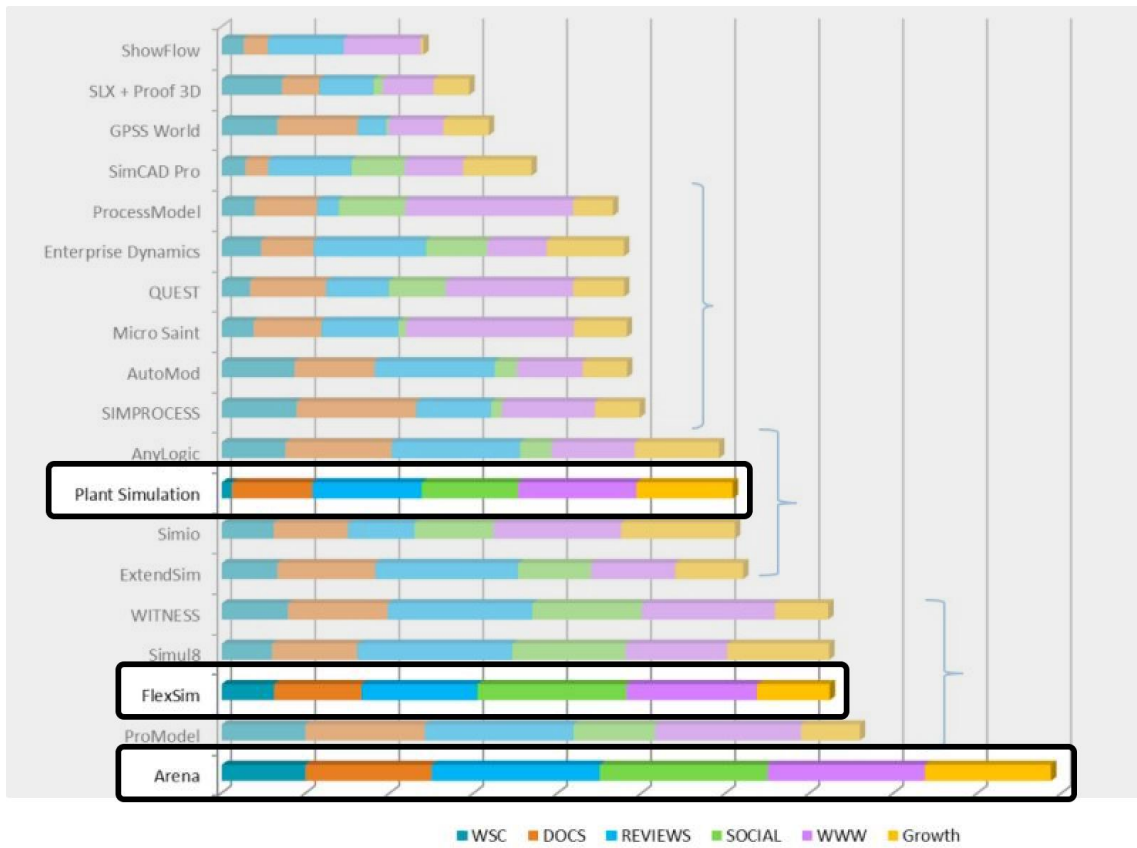
Další pomůckou při výběru simulačního softwaru může být míra použití v praxi. Ta může ukazovat, jaký je obecný názor odborníků v odvětví na kvalitu jednotlivých softwarů, i například to, kolik vzdělávacích materiálů můžeme k softwaru potenciálně najít, či zda v budoucnu snáze najdeme odborníky, kteří v softwaru umí pracovat. Tomuto tématu se věnovala jiná studie, pod názvem: „*Discrete Simulation Software Ranking – A Top List of the Worldwide Most Popular and Used Tools.*“

Snahou autorů studie bylo měření intenzity používání nebo přítomnosti informací o softwarech v různých zdrojích, místo hodnocení funkcionalit jednotlivých nástrojů, které může být ovlivněno značnou mírou subjektivity. Autoři změřenou intenzitu nazvali jako „*popularitu*“. Měření bylo prováděno několika různými způsoby, včetně výskytu na webu a vědeckých publikacích s názvem nástroje a jménem dodavatele.

Je zřejmé, že větší „*popularita*“ nezajišťuje větší kvalitu nebo to, že simulační nástroj lépe odpovídá svému účelu. Avšak dle autorů studie může existovat určitá pozitivní korelace mezi kvalitou a měřenou „*popularitou*“. Je však na místě k výsledkům studie přistupovat s odstupem a mít na paměti její přístup k hodnocení softwarů a nebrat výsledné hodnocení jako jediný ukazatel při výběru simulačního softwaru.

Studie pracovala se seznamem 19 nejoblíbenějších simulačních nástrojů a zkoumala intenzitu jejich zmínek ve vědeckých publikacích, recenzích, databázích, a přítomnost na sociálních sítích a ve vyhledávacích trendech.

Závěrem studie bylo, že obecně nejoblíbenějším nástrojem je software Arena, který vynikal nad ostatními nástroji v řadě faktorů. Poté studie definovala druhou skupinu nejoblíbenějších simulačních nástrojů, do které byl zařazen právě software Flexsim. Software Plant Simulation byl až v další skupině, což může naznačovat, že program Flexsim dokáže uživateli přinést obecně (teoreticky) vyšší hodnotu. [29]



Graf 4: Výsledky studie zkoumající popularitu simulačních softwarů

Zdroj: Upraveno dle [29]



II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 Úvod do praktické části

Praktická část se bude zabývat reálným problémem průmyslového podniku ENGEL strojírenská spol. s.r.o. Zadání simulační studie vzniklo v oddělení projektového řízení, které se zabývá inovacemi a jejich zaváděním ve výrobě. Společnost se simulacemi dosud žádné zkušenosti neměla, ale zajímá se o jejich užití, hlavně z důvodů chystaných změn výrobních procesů, udržení své pozice na trhu, konkurenceschopnosti a také inovační politiky celého podniku.

Simulační studie se zabývá výrobním závodem podniku ENGEL strojírenská spol. s.r.o., což je dceřiná společnost firmy ENGEL AUSTRIA GmbH. Ta vyvíjí a vyrábí vstřikovací stroje na plastové výrobky a jejich doplňky k automatizaci. Své výrobky a služby nabízí jako komplexní řešení, které tvoří vstřikovací stroje, podpora procesů, projektování nástrojů, automatizace, servis a školení. Společnost byla založena v roce 1945 Ludwigem Engelem a do dnešní doby je zcela vlastněna rodinou. Společnost vlastní celkem 9 továren v Evropě a další v Severní Americe a Asii, cca 7 000 zaměstnanců a obrát 1,5 miliardy EUR ročně.



Obrázek 10: Vstřikovací stroj vyrobený spol.

ENGEL Zdroj: [30]

Závod spol. ENGEL strojírenská s.r.o. v Kaplici byl otevřen v roce 2000 a společnost zde vyrábí podsestavy pro výrobu výše zmíněných vstřikovacích strojů. V rámci simulační studie byla zkoumána pouze část výroby závodu v Kaplici, a to konkrétně výroba olejových tanků, jež tvoří nedílnou součást vyráběných sestav pro vstřikovací stroje.



Obrázek 11: Olejový tank svařovaný robotem

Zdroj: [30]

Realizace simulační studie byla postavena na základě principů simulačního projektu, které byly blíže zkoumány v kapitole 3. V první řadě byl přesně formulován problém, kterým se studie zabývala a definovány její cíle, následně byla sesbírána a zanalyzována data o reálném systému a vytvořen koncepční model. Výstupy analýzy dat a koncepčního modelu byly verifikovány. Dalším krokem byla tvorba simulačního modelu v softwaru Flexsim a jeho validace. Po validaci modelu byl analyzován aktuální stav systému a byly detailně specifikovány a realizovány experimenty. V poslední řadě byly výsledky experimentů řádně prostudovány a zdokumentovány. Na tomto základě vznikla finální doporučení pro společnost.

6 Formulace problému a cílů studie

Prvním krokem simulační studie bylo definovat základní charakteristiky reálného systému, a především účel celé simulační studie. Nejprve společnost představila výrobu olejových tanků formou online prezentace. Díky této prezentaci bylo možné vytvořit odhad rozsahu studie a předběžně zhodnotit její náročnost a proveditelnost. Následně byla realizována osobní prohlídka závodu, která odhad doplnila o důležité detaily a umožnila vznik již ucelené představy o náročnosti projektu (včetně popisu toku materiálu výrobou). Při osobním setkání byl vytvořen záznam o všech podstatných částech systému a zodpovězeny prvotní otázky týkající se problému. Součástí návštěvy byla také diskuse na téma dostupnosti dat týkajících se provozu daného systému. Díky této spolupráci bylo možné formulovat samotný problém i účely studie.

Jedním z prvních účelů (cílů) studie je vůbec prvotní seznámení podniku s principem simulací. Podnik totiž řeší otázku zavedení simulačního softwaru do výroby, a tato studie může přinést odpovědi na to, zda bude investice do simulací podniku dávat smysl. Ovšem pro ověření principu a možností simulací je nejvhodnější řešit skutečný problém.

Jako problém studie byla vybrána právě výroba olejových tanků pro vstřikovací stroje, která je dostatečně komplexní na to, aby prověřila možnosti vybraného simulačního softwaru, ale stále dost pochopitelná, aby se v ní dokázali orientovat i lidé, kteří se se simulacemi teprve seznamují. Další účely studie jsou již blíže specifikovány na základě vybraného problému.

Druhým cílem studie bylo analyzovat aktuální stav výroby. To by mělo zahrnovat hodnocení vytížení pracovišť, odhalení úzkých míst, zhodnocení kapacitních možností meziskladů a určení minimálního počtu vozíků užívaných pro přepravu zakázek ve výrobě (to bude určeno experimentem 1). Dále bylo úkolem vyhodnotit některé v reálném systému hůře měřitelné ukazatele výkonnosti výroby, jako průměrný čas výroby dle typu výrobku či průměrný čas výroby na jednotlivých pracovištích.

Dalším cílem studie je otestování různých scénářů změn ve výrobě a vyhodnocení jejich dopadu na výrobu vůči aktuálnímu stavu. Scénáře byly navrženy na základě idey, kdy by

podnik chtěl vyrábět takové množství tanků, které vyrobí při provozu s přesčasy (které musí podnik často využívat), ale bez využití přesčasů. Za tímto účelem byly definovány scénáře experimentů, při kterých dojde k navýšení intenzity vstupů tanků do výroby a k změně layoutu a materiálového toku. Následně je třeba vyhodnotit jejich kombinaci. Z těchto scénářů vyplynuly následující otázky:

- Co se stane, když zvýšíme intenzitu vstupů tanků do výroby?
- Jak bude výroba ovlivněna layoutovými změnami?
- Jak se změní výroba zjednodušením materiálového toku?
- Jaký bude stav výroby po zavedení změn oproti aktuálnímu?

Vzhledem k jejich obecnosti je vhodné doplnit, že v rámci těchto otázek je možno najít další otázky typu:

- Kolik vyrobíme olejových tanků?
- Jak se změní vytížení pracovišť?
- Kde vzniknout nová úzká místa?
- Kolik vozíků budeme potřebovat?
- Jak se změní průměrný čas výroby?
- Kolik kilometrů nachodí pracovníci?

Výše zmíněné otázky, definice cílů a účelů studie jsou velmi důležité pro všechny následující fáze projektu. Bez nich by nebylo možné správně zachytit rozsah a hloubku simulačního modelu, ani určit, která data jsou potřebná, či nikoli. Proto bylo nutné na tyto otázky pamatovat při každé následující fázi, včetně té následující – tvorbě koncepčního modelu.

7 Tvorba koncepčního modelu

Fáze tvorby koncepčního modelu byla realizována spolu s fází sběru dat, protože se tyto dvě činnosti značně vzájemně ovlivňovaly. Koncepční model vznikal převážně na základě datových podkladů z firemního systému ERP a mapy továrny. Výsledný koncepční model nabýval podoby mapy všech pracovišť procesu výroby olejových tanků a tabulek v softwaru MS Excel. Ovšem pro vytvoření výsledné podoby koncepčního modelu bylo nejprve nutné pochopit proces samotné výroby.

7.1 Proces výroby olejových tanků

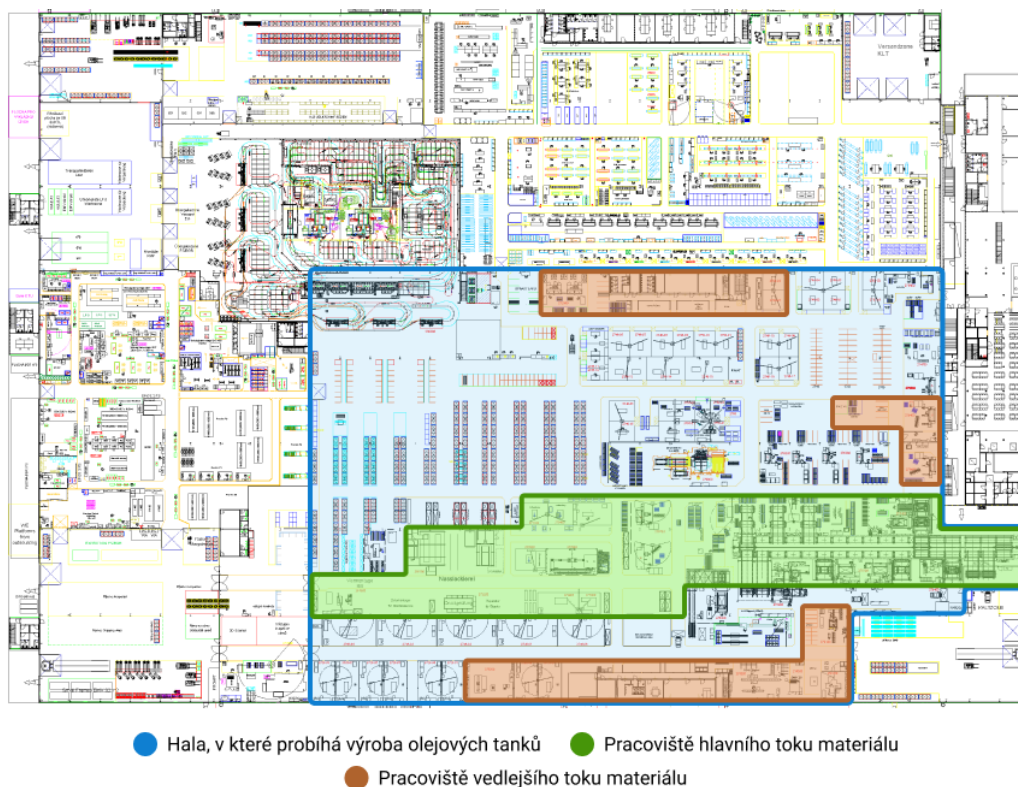
Proces výroby olejových tanků, i přes snahy o určitou normalizaci, není zcela přímočarý. To je zapříčiněno výrobní politikou podniku, kdy se většina vstřikovacích strojů vyrábí na zakázku a zákazník má absolutní svobodu customizace objednaného stroje. Veškeré tyto požadavky zákazníka pak do určité míry ovlivňují proces výroby. V praxi to pak vypadá tak, že různé typy olejových tanků procházejí různými typy operací, např. některé se lakují, zatímco jiné ne, nebo se některé svařují pomocí robota, ale jiné pouze ručně.

Dalším zdrojem komplexity problému jsou také technologické a kapacitní možnosti jednotlivých pracovišť. Olejové tanky jsou tvořeny plechy různých tlouštěk, což zapříčiňuje, že se odlišné tanky musejí zpracovávat na různých pracovištích, např. podle síly ohraňovacích strojů. Zároveň v případě velkého vytížení určeného pracoviště dochází k zastoupení výkonu operace pracovištěm jiným. Všechny tyto proměnné je třeba brát v potaz při definici procesu výroby.

Vzhledem k povaze práce bude v této kapitole definován pouze materiálový tok výrobou a fungování vybraných pracovišť bude více rozepsáno v popisu simulačního modelu.

Proces výroby olejových tanků probíhá v jedné z hal výrobního závodu, ta je zvýrazněna modrou barvou na obrázku č.12. V obrázku jsou dále zvýrazněny oblasti, kde se nachází pracoviště zajišťující jednotlivé operace celého procesu. Pro lepší pochopení jsou rozdělena na „hlavní“ (zelená) a „vedlejší“ (oranžová). Hlavní pracoviště jsou ta, kde

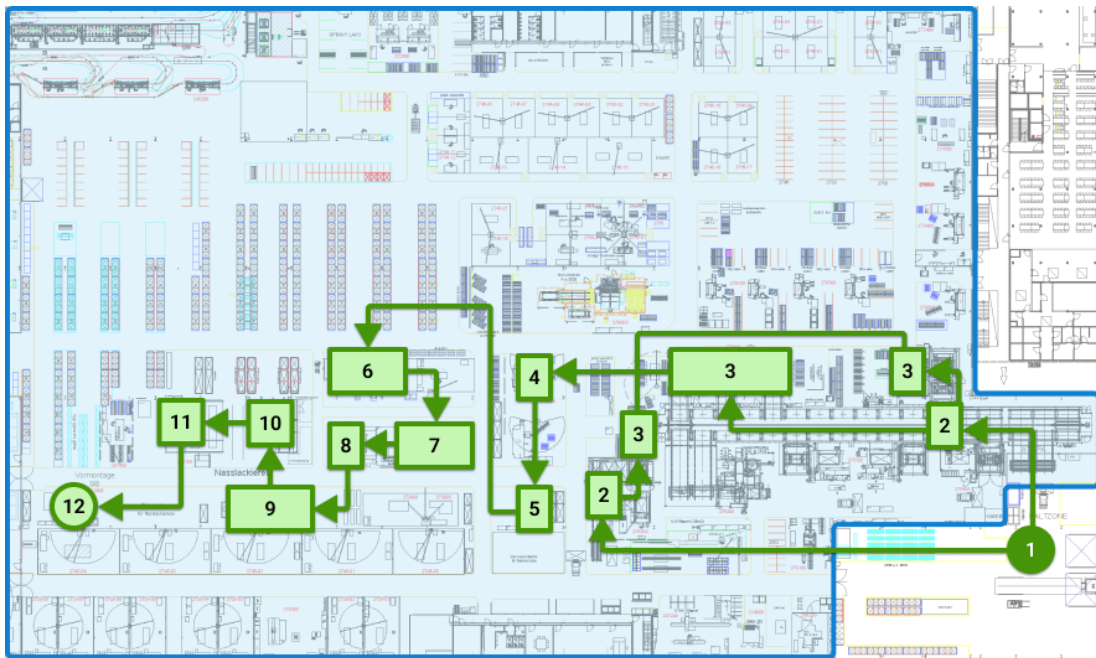
probíhá většina operací v případě normálního procesu výroby. Vedlejší pracoviště do procesu výroby vstupují hlavně v případě objednávek tanků s většími úpravami ze strany zákazníka. Důvod takového rozdělení pracovišť je popsán v úvodu kapitoly 7.1.



Obrázek 12: Výrobní závod ENGEL a zvýrazněná oblast výroby olejových tanků

Zdroj: Vytvořeno dle [30]

Na následujícím obrázku je pak zvýrazněn hlavní tok materiálu. Tok materiálu přes pracoviště vedlejší není v obrázku zvýrazněn z důvodu jeho časté proměnlivosti, která je dána zakázkovitostí výroby. Tato proměnlivost by do obrázku vnesla značnou nepřehlednost.



1. Příjem materiálu 2. Automatický sklad a laser 3. Vylamování 4. Ohraňování 5. Komise 5. Komise
 6. Příprava pro robota 7. Svařování robotem 8. Dokončení 9. Tlaková zkouška 10. Mytí 11. Lakování 12. Předmontáž

Obrázek 13: Hlavní tok materiálu výroby olejových tanků

Zdroj: Vytvořeno dle [30]

Na obrázku můžeme pozorovat, že „hlavní“ proces výroby olejových tanků začíná příjmem materiálu (1) do jednoho z automatických skladů (2). K automatickým skladům jsou dále připojeny lasery (2), které ze vstupního materiálu (plechy různých tlouštěk) vyřezávají požadované díly. Z laserů putují díly zpět do skladu, kde čekají na „zavolání“ jedním ze tří pracovišť vylamování (3). V rámci vylamování probíhá kompletace nařezaných dílů na prázdný vozík Variofit, který slouží k přepravě objednávek po výrobní hale. Objednávka dále putuje na pracoviště ohranění (4), kde se zpracovává pomocí ohranovacího lisu. Následně si objednávku přebírá komise (5), kde dochází k doplnění potřebných dílů, jako je šroubení, závity, ventily apod. na vozík. Z komise vozík s objednávkou putuje na pracoviště přípravy pro robota (6), kde se jednotlivé plechy bodovým svařováním smontují, a tím připraví pro svařovacího robota (7). Ten následně doplní svary po celé délce spojů. Po robotovy přichází operace dokončování (8), kde dochází ke kontrole svařeného tanku a doplnění svarů v pro robota těžko dostupných místech. Po kompletním svaření je nutné tank otestovat tlakovou zkouškou (9). Ta probíhá ponořením celého tanku do lázně s vodou a optickým pozorováním

potenciálního úniku vzduchových bublin. Pokud tank úspěšně projde zkouškou, pokračuje na přípravu pro lakovnu (10). Příprava probíhá umytím celého tanku a zakrytím požadovaných částí. Tank se následně lakuje (11) formou mokrého lakování a po zaschnutí putuje na poslední pracoviště – předmontáž (12). Zde dochází k přípravě tanku pro namontování do vstřikovacího stroje. Tank následně putuje do jiné haly, a je dále zpracováván.

Jak již bylo zmíněné, značně upravené tanky často putují na „vedlejší“ pracoviště. Mezi ty patří pracoviště svařování s kolaborativními roboty, řezání závitů, pracoviště odříznutí, či odhrotování. Mezi ně se ještě řadí pracoviště dokončení a dvě pracoviště vaření a stehování. Dopravu mezi těmito pracovišti a pracovišti „hlavními“ zajišťuje převážně oddělení logistiky. Samotná doprava probíhá tak, že v určitých časových intervalech projíždí logistický vláček, který sbírá zakázky z předávacích míst a rozváží je na daná pracoviště.

Veškerou výše zmíněnou logiku pak popisují výstupy fáze tvorby koncepčního modelu a sběru dat, které lze nalézt na následujících stránkách.

Tabulka 1: Souhrn pracovišť procesu výroby olejových tanků

č. pracoviště	j. pracoviště	Počet stanišť	Kapacita meziskladu	Počet pracovníků	Tah/tlak	Kapacita_za_měsíc
201000	Značení	1	8	1	operátor	28440
201200	Odříznout	1	2	1	logistika	28440
270900	Dokončování	1	2	1	logistika	28440
271700	Vaření a stehování	1	3	2	operátor	28440
272000	Komise Feinblech	1	30	3	operátor	28440
272200	Tlaková zkouška	1	8	3	operátor	28440
272800	Vaření a stehování	1	2	1	logistika	28440
273400	Příprava pro robotické svařování	1	3	2	operátor	28440
273500	Robot Valk	1	6	1	operátor	28440
273600	Dokončení po robotickém svařování	1	3	1	operátor	28440
274000	Komise robot Valk	1	15	1	operátor	28440
274500	Vaření a stehování	1	2	1	logistika	28440
275300	Řezání závitů	1	4	1	logistika	28440
278000	Vylamování	3	12	6	operátor	170640
279001	Vylamování	1	4	1	operátor	28440
279002	Vylamování	1	4	1	operátor	28440
279100	Odhrotování	1	3	1	logistika	28440
279400	Ohranění_5	1	8	1	logistika	28440
279600	Ohranění_7	1	8	1	logistika	28440
279700	Ohranění_8	1	8	2	logistika	28440
281600	Zakrytování	1	12	1	operátor	28440
286100	Lakování	1	10	1	operátor	28440
286300	Příprava pro lakovnu	1	6	1	operátor	28440
543000	QM	2	10	2	operátor	56880

Zdroj: Vlastní

Tabulka 2: Ukázka souhrnu vyráběných olejových tanků a jejich operací

č. výrobku	j. výrobku	č. pracoviště	j. pracoviště	setup time	process time	operace	počet objednávek
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	279002	Vylamování	2,4	0,06	11	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	272000	Komise Feinblech	0	0,06	22	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	279400	Ohranění_5	7,14	2,52	20	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	270900	Dokončování	4,38	33,66	30	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	279100	Odhrotování	2,4	0,9	15	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	275300	Řezání závitů	3	5,1	40	2
0106-481-42-41	OELBEHAELTER ANPRESSEDEN IS02.1_200	272200	Tlaková zkouška	7,2	12	50	2
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	279001	Vylamování	2,4	3,6	7	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	279700	Ohranění_8	7,5	4,02	10	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	274000	Komise robot Valk	0	0,06	15	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	273400	Příprava pro robotické svařování	7,2	58,02	20	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	273500	Robot Valk	6,00	13,56	30	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	273600	Dokončení po robotickém svařování	6	7,98	40	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	286300	Příprava pro lakovnu	6	19,98	70	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	272200	Tlaková zkouška	0	34,8	50	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	201000	Značení	0	4,02	45	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	201001	Značení	0	4,02	53	3
0222-660-03-01	OELBEHAELTER ET01.3_100	286100	Lakování	6	24,18	-	3

Zdroj: Vlastní

Výše uvedené tabulky a mapa výroby definují celkový koncepční model. Tento koncept byl konzultován se zadávajícím podnikem a byla verifikována jeho správnost (pravdivost dat). Vznik těchto souhrnů je částečným výstupem fáze sběru dat, ve které je nadále popsáno, jak se s nimi pracovalo za účelem vzniku veškerých vstupů pro simulační model.

8 Sběr a práce s daty

Jak bylo zmíněno výše, fáze sběru dat jde obvykle ruku v ruce s fází tvorby koncepčního modelu a vzájemně se doplňují. Vstupní data pro tvorbu koncepčního modelu byla získána 2 způsoby.

Prvním zdrojem dat byl podnikový systém ERP, z něhož byla exportována výrobní data za vzorový měsíc – Leden 2022. Tento měsíc byl zvolen, jako vzorový měsíc pro simulace, zadavateli studie, protože nejlépe odpovídal běžnému provozu v rámci podniku. Zvolený měsíc byl v pozdější fázi studie použit i k validaci modelu. Data ze systému obsahovala veškeré informace o výrobě v rámci podniku za dané období, proto musela být zpracována a očištěna o informace, které se netýkali výroby olejových tanků.

Ostatní výrobky byly ze simulace úplně vyřazeny. Důvodem je jak samotný účel (zadání) studie, tak i komplexita, kterou by ostatní výrobky v simulaci představovaly. Na některých pracovištích jich je mnohonásobně větší množství než olejových tanků, a také se často jedná o zakázkovou výrobu. To zapříčiňuje jejich nepravidelné výrobní plány i neúplná data o jejich dopadu na výrobu. Data o výrobě ostatních výrobků však byla využita ve fázi analýzy systému ve vztahu k vytížení pracovišť, kde dochází k výrobě olejových tanků, ale zároveň i jiných výrobků.

Druhým zdrojem informací o systému byly diskuse s experty na systém z podniku ENGEL, při kterých byly doplněny informace o logických vazbách v rámci procesu výroby, nebo byly upraveny chybné či zavádějící informace z výše zmíněného zdroje dat.

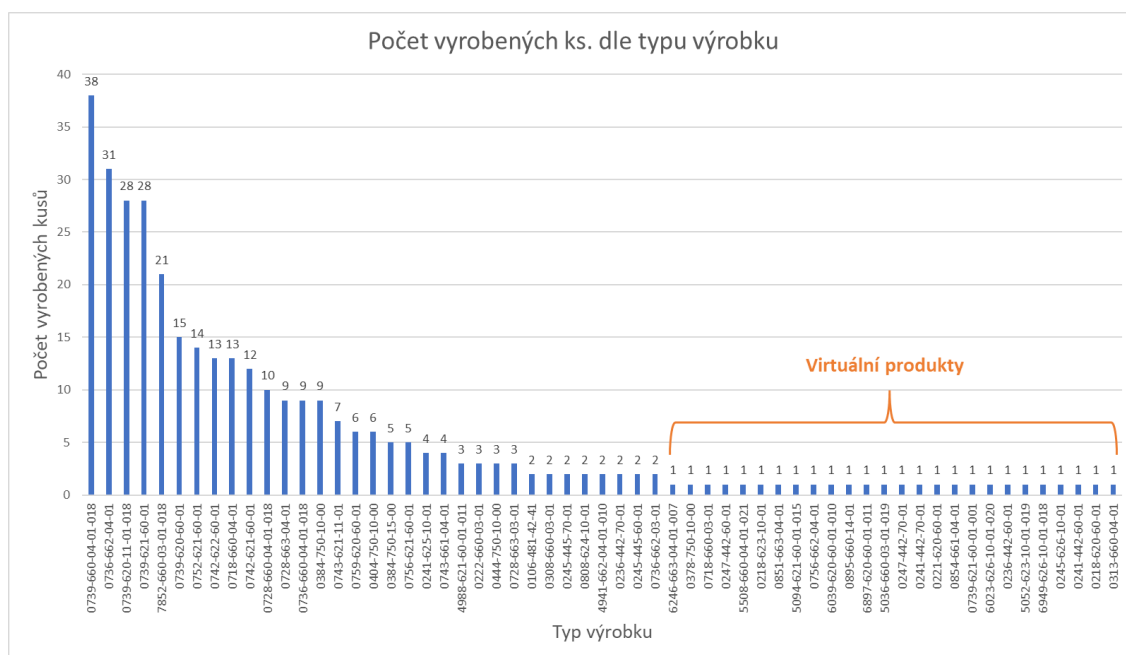
8.1 Typy výrobků

Z výše uvedených zdrojů byl vytvořen koncepční model, který byl definován v předchozí kapitole. V této kapitole budou popsány detaily jeho vzniku. Konkrétně pak tabulky č.2, která tvoří jeho podstatnou část.

Z dat ERP vyplývá, že za dané období bylo vyráběno celkem 60 typů olejových tanků. Počty vyráběných kusů jednotlivých typů byly v rozsahu od 38 ks do 1 ks. Pro účely

simulace bylo po konzultaci se zadavatelem studie rozhodnuto, že se typy tanků vyráběné v počtu 1 kusu sdruží do 3 kategorií virtuálních produktů. Důvodem tohoto rozdělení bylo to, že se jedná převážně o zakázkové tanky (kusovou výrobu). Toto pravidlo lze lépe pochopit z grafu č.5. Jedinou výjimkou z pravidla je tank č.5508-660-04-01-021, který byl zadavatelem studie identifikován jako důležitý produkt a měl zůstat samostatně.

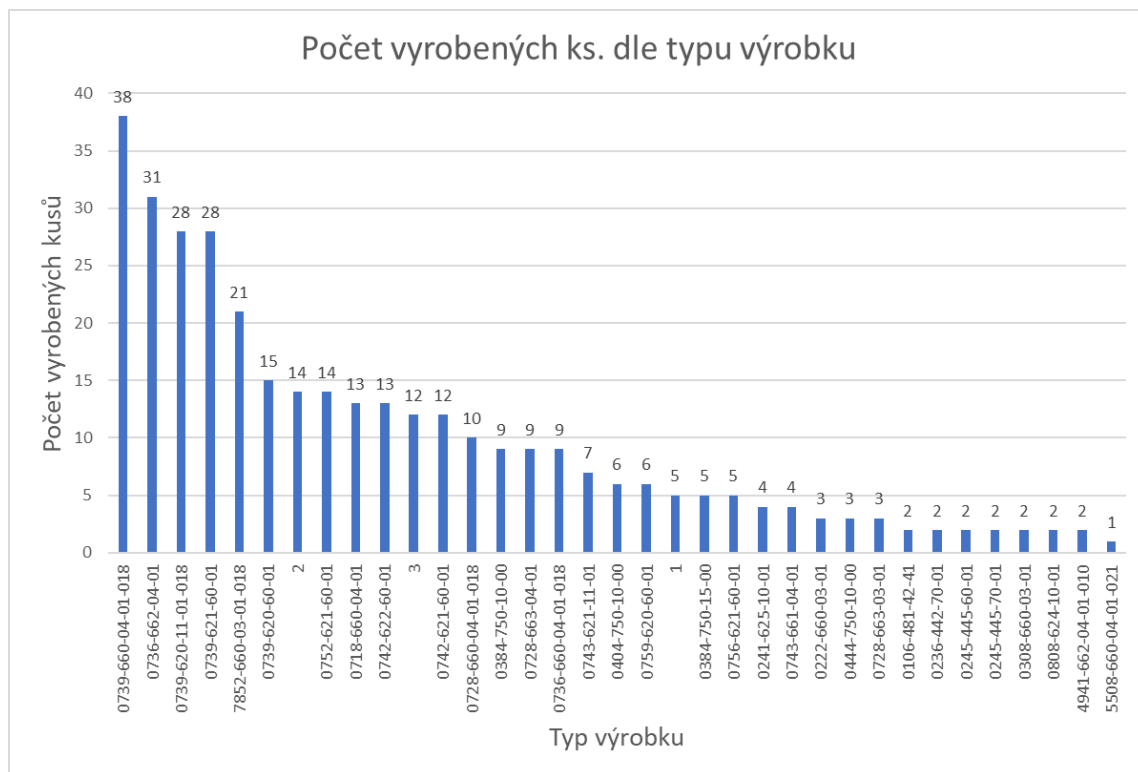
Kategorie byly definovány dle velikosti tanků, která se nejvíce projevuje na procesním čase svařování jednotlivých výrobků na pracovišti č.273500. Tyto procesní časy byly rozděleny na 3 intervaly a definovaly kategorií malé tanky (č.1), střední tanky (č.2) a velké tanky (č.3). Následně byly analyzovány výrobní plány jednotlivých tanků a byl vytvořen jeden ucelený plán pro všechny virtuální výrobky, který zahrnoval jejich průměrné procesní a přípravné časy, a také souslednost jednotlivých operací. Počty vyráběných kusů jednotlivých tanků byly integrovány pod jednotlivé kategorie.



Graf 5: Identifikace zakázkové výroby a její sdružení do virtuálních výrobků

Zdroj: Vlastní

Výsledné vstupní portfolio výrobků, s kterým se v simulační studii nadále pracovalo zobrazuje graf č.6. Je zde vidět, značný úbytek saturace typů vyráběných tanků. Výsledný počet typů vyráběných tanků byl tvořen 35 typy.



Graf 6: Portfolio výrobků vytvořené pro účely simulační studie

Zdroj: Vlastní

8.2 Intervaly vstupů do výroby a přiřazení typu výrobku

Dalším podstatným výstupem z datové analýzy bylo určení intervalu příjezdů jednotlivých typů olejových tanků. Nejprve se určilo rozdělení, v jakých intervalech budou tanky vstupovat do výroby a následně bylo určeno rozdělení, jaká produktová čísla jim budou přiřazena. Tento přístup odpovídá povaze reálného systému, protože tanky do výroby nevstupují v rámci žádných pravidel či v dávkách. Výroba v každém měsíci je čistě náhodná, dle přijatých objednávek. Určit se dá pouze to, jaké tanky bývají vyráběné poměrně více, či méně dle oblíbenosti produktů mezi zákazníky.

Nejprve se určil časový interval vstupů do výroby. Ten také vstupuje do simulačního modelu jako první. Postup byl takový, že se vzaly časové známky vstupů jednotlivých objednávek tanků na první pracoviště a určil se jejich časový rozdíl. Tyto rozdíly je možné pozorovat na grafu č.7. Na grafu jsou také označeni tzv. „outliers“, anomálie, které se výrazně odlišují od většiny dat. Tyto anomálie nejspíš byly způsobeny tím, že objednávky na pracovišti zůstaly rozpracované během víkendů. Všechny 4 hodnoty byly ze vzorku dat před dalším zpracováním odstraněny.



Graf 7: Časy vstupů jednotlivých objednávek do systému

Zdroj: Vlastní

Data se následně zpracovala pomocí softwaru ExpertFit, který vyvinul Dr. Averill M. Law., a lze jej získat samostatně, či jako doplněk softwaru FlexSim. Tento software dokáže automaticky zjistit, které rozdělení pravděpodobnosti nejlépe reprezentuje daný soubor dat. Výsledným doporučením softwarové analýzy bylo užití empirického rozdělení pro každou hodnotu samostatně, protože vzorek dat spolehlivě neodpovídal žádnému pravděpodobnostnímu rozdělení. Výsledným výstupem tedy byla tabulka, která pro určité procento vstupů určovala daný časový interval vstupů. Její podobu lze pozorovat v tabulce č.3.

Tabulka 3: Výňatek z tabulky empirického rozdělení vstupů objednávek do výroby

ID	Procento [%]	Čas [min]
1	0,91 %	0,0167
2	2,28 %	0,0167
3	14,61 %	0,0333
4	4,57 %	0,0333
5	0,46 %	0,0500
6	0,91 %	0,0500
7	0,46 %	0,0667
8	0,91 %	0,0667
9	0,91 %	0,1167
10	0,46 %	0,1167
11	0,46 %	0,1333
12	0,46 %	0,1500
13	1,37 %	0,1500
...
144	0,46 %	816,1833
145	0,46 %	863,1000
146	0,46 %	904,5833
147	0,46 %	1087,9333
148	0,46 %	1109,7500

Zdroj: Vlastní

Následně bylo nutné určit distribuci typů výrobků. Jinými slovy, jaký typ výrobku bude obsahovat objednávka, která vstupuje do systému. K tomuto určení pomohla již upravená data ze systému ERP, které shrnuje tabulka č.2 (respektive graf č.6). Z počtu objednávek každého typu výrobku bylo určeno procento, které tvoří z celkové sumy objednávek. Výstupem pak byla tabulka č.4, kde lze např. pozorovat, že 11,11 % výrobků, které vstoupí do systému bude mít č.0739-660-04-01-018, což je také nejvíce vyráběný typ olejového tanku za dané období.

Tabulka 4: Poměrné rozdělení vstupů dle typu výrobku

č. výrobku	Počet objednávek [ks.]	Procent [%]
0739-660-04-01-018	38	11,11 %
0736-662-04-01	31	9,06 %
0739-620-11-01-018	28	8,19 %
0739-621-60-01	28	8,19 %
7852-660-03-01-018	21	6,14 %
0739-620-60-01	15	4,39 %
2	14	4,09 %
0752-621-60-01	14	4,09 %
0718-660-04-01	13	3,80 %
0742-622-60-01	13	3,80 %
3	12	3,51 %
0742-621-60-01	12	3,51 %
0728-660-04-01-018	10	2,92 %
0384-750-10-00	9	2,63 %
0728-663-04-01	9	2,63 %
0736-660-04-01-018	9	2,63 %
0743-621-11-01	7	2,05 %
0404-750-10-00	6	1,75 %
0759-620-60-01	6	1,75 %
1	5	1,46 %
0384-750-15-00	5	1,46 %
0756-621-60-01	5	1,46 %
0241-625-10-01	4	1,17 %
0743-661-04-01	4	1,17 %
0222-660-03-01	3	0,88 %
0444-750-10-00	3	0,88 %
0728-663-03-01	3	0,88 %
0106-481-42-41	2	0,58 %
0236-442-70-01	2	0,58 %
0245-445-60-01	2	0,58 %
0245-445-70-01	2	0,58 %
0308-660-03-01	2	0,58 %
0808-624-10-01	2	0,58 %
4941-662-04-01-010	2	0,58 %
5508-660-04-01-021	1	0,29 %

Zdroj: Vlastní

8.3 Výrobní plány

Další výstup z datové analýzy nám určuje fakt, že je třeba softwaru Flexsim importovat data v pro něj srozumitelné podobě. Společnost ENGEL má výrobní plány jednotlivých typizovaných výrobků v podobě procesních diagramů, které software číst neumí. U dalších zakázkových výrobků výrobní plány nebyly k dispozici. Zde bylo opět nutné sáhnout do výstupu z ERP a vést diskusi ohledně nejasností. Výsledkem se stává matice, kde řádky představují jednotlivé typy produktů a sloupce posloupnost operací. V jejich průsečíku lze najít odkaz na příslušné pracoviště, kde k operaci dochází. Pro účely simulace byla v některých případech zavedena i dodatečná „fiktivní“ pracoviště, ta jsou v tabulce zvýrazněna. Nutnost tohoto doplnění bude podrobněji rozebrána v textu níže. Výslednou podobu matice lze pozorovat v příloze č.2. Tabulka č.5 slouží pouze pro lepší pochopení výstupu datové analýzy čtenářem.

Tabulka 5: Ukázka z matice výrobních plánů jednotlivých typů výrobků

Typ výrobku/Operace	1	2	3	4	...	9	10	11	12	13	14	
1	Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	...	O_0	Q_275300	Q_275300	Q_275300	Q_275300	Q_275300	Q_275300
2	Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	...	Q_286300	Q_286300	Q_286300	Q_286300	Q_286300	Q_286300	Q_286300
3	Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	...	Q_543000	Q_286300	Q_286100	Q_286100	Q_286100	Q_286100	Q_286100
4	Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_201200	...	Q_201000	O_0	Q_543000	Q_286300	Q_286100	Q_286100	Q_286100
...
32	Q_278000	Q_279700	Q_272000	Q_271700	...	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700
33	Q_279002	Q_279600	Q_271700	Q_201000	...	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000
34	Q_279001	Q_279700	Q_271700	Q_201000	...	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000	Q_201000
35	Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_271700	...	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700	Q_271700

Zdroj: Vlastní

8.4 Výrobní časy

Poslední z nejdůležitějších výstupů datové analýzy tvoří další dvě matice. První matice určuje přípravné časy různých typů výrobků na různých pracovištích a druhá, ve stejné podobě, určuje časy výrobní. Pro tento účel byly použity časy normované, které dle zadavatele studie byly v nedávné době aktualizovány a měly by nejlépe vystihovat chování systému. Tyto matice nabývají obdobného formátu, jako matice pro řízení operací a lze je nalézt v příloze č.3 a č.4.

9 Definice modelu a verifikace dat

V kapitole č.3.6 je popsáno, že definicí modelu se rozumí správná dokumentace všech jeho proměnných, jejich atributů a funkcí. Z toho lze vyvodit, že definice modelu je tvořena souhrnnými výstupy fáze tvorby koncepčního modelu a fáze sběru dat. Veškeré tyto proměnné byly definovány již v předchozích kapitolách, proto zde doplním pouze to, že podoba koncepčního modelu a výsledky práce s daty byly souhrnně zdokumentovány a prezentovány zadavateli studie.

Experti podniku na systém následně tyto data zkoumali a verifikovali jejich správnost. Tím byla ověřena správnost vstupních dat a systémových předpokladů, což umožnilo postup k další fázi projektu – tvorbě simulačního modelu.

10 Tvorba simulačního modelu

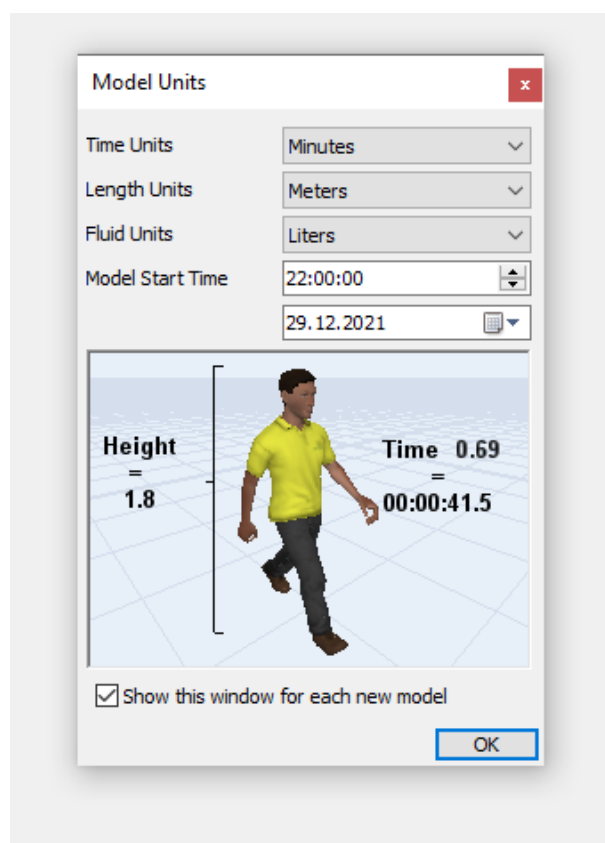
Po definování modelu a jeho verifikaci bylo možné přistoupit k fázi modelování. K tomu byl využit software Flexsim a 3D software Trimble Sketchup. Vzhledem k tomu, že byl software Sketchup využit pouze pro vizuální doplnění modelu (tvorbu jednoduchých 3D rekvizit), nebude práce s tímto softwarem dále popisována. Software Flexsim byl vybrán na základě toho, že jedním z účelů simulační studie je seznámit zadavatele s principy simulace. Flexsim se totiž řadí mezi uživatelsky nejpřívětivější simulační software. Díky tomu lze vysvětlit principy simulací v dobře pochopitelné podobě. Příhodné bylo také to, že univerzita již disponovala jeho licencí.

K tvorbě modelu bylo přistupováno systematicky a cílem bylo vytvoření modelu, který bude nejlépe reprezentovat reálný systém a splní účel simulační studie. Postup tvorby respektoval materiálový tok systému, kdy se postupně modelovala jednotlivá pracoviště, jak jdou za sebou. Po každém vymodelovaném pracovišti se testovala průběžná funkčnost modelu. Od začátku modelování byl kladen důraz na flexibilní nastavení každého pracoviště, aby byla připravena na zadání vstupů ve formě matic viz. kap. 8.

V následujícím textu budou vysvětleny obecné principy nastavení modelu, a následně budou detailněji znázorněny na provozu vybraných pracovišť.

10.1 Nastavení modelu

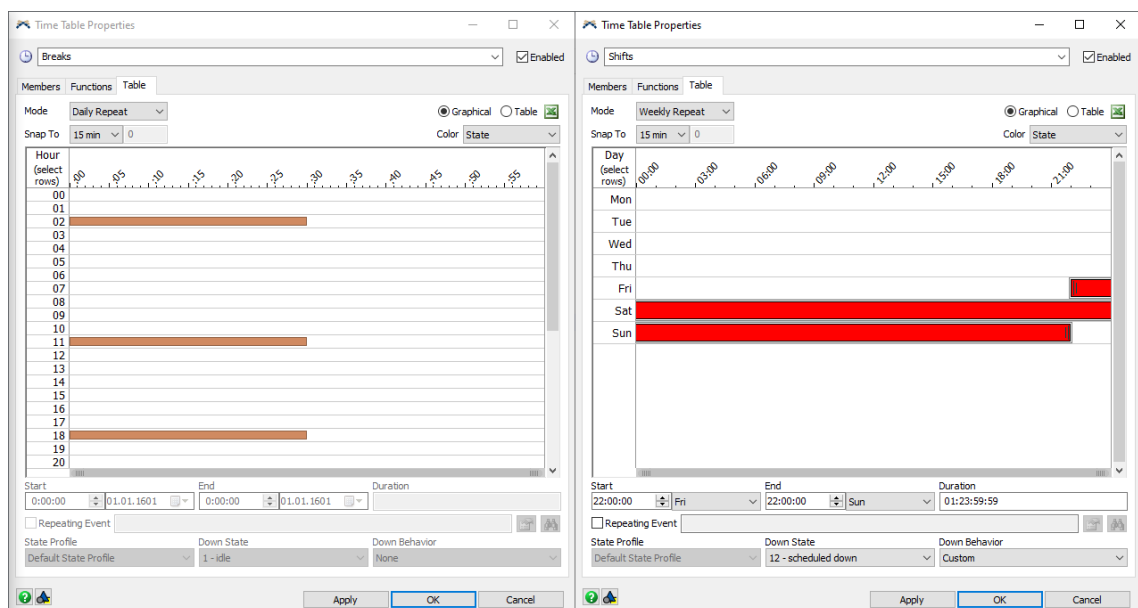
Prvním krokem modelování v softwaru Flexsim je nastavení modelu. Je velmi důležité mít před modelováním představu o tom, v jakých jednotkách bude simulace probíhat, protože pozdější změny v nastavení modelu jsou značně komplikované. Vzhledem k datům bylo rozhodnuto, že bude použito nastavení z následujícího obrázku. Jednotky času budou v minutách, vzdálenost v metrech a objemy (ač nebyly využívány) v litrech. Začátek simulace je vzhledem k vybranému testovacímu a zahřívacímu období (3 dny) určen na 29.12.2021. Konec simulace nastává 02.02.2022. Jinými slovy se simuluje období 1 měsíce.



Obrázek 15: Nastavení simulačního modelu

Zdroj: Vlastní

Dále bylo nutné nastavit provoz z hlediska směn a přestávek pracovníků. K tomu byla využita funkce „Time Tables“, která toto nastavení umožňuje. Provoz závodu ENGEL běží nepřetržitě ve 3 směnách s výjimkou víkendů. Víkend začíná vždy v pátek 22:00 a končí v neděli 22:00. Přestávku o délce 30 minut má každá směna, vždy v 02:00, 11:00 a 18:00. Nastavení této skutečnosti je možné pozorovat na obrázku níže.



Obrázek 16: Nastavení směn a přestávek zaměstnanců v prostředí Flexsim

Zdroj: Vlastní

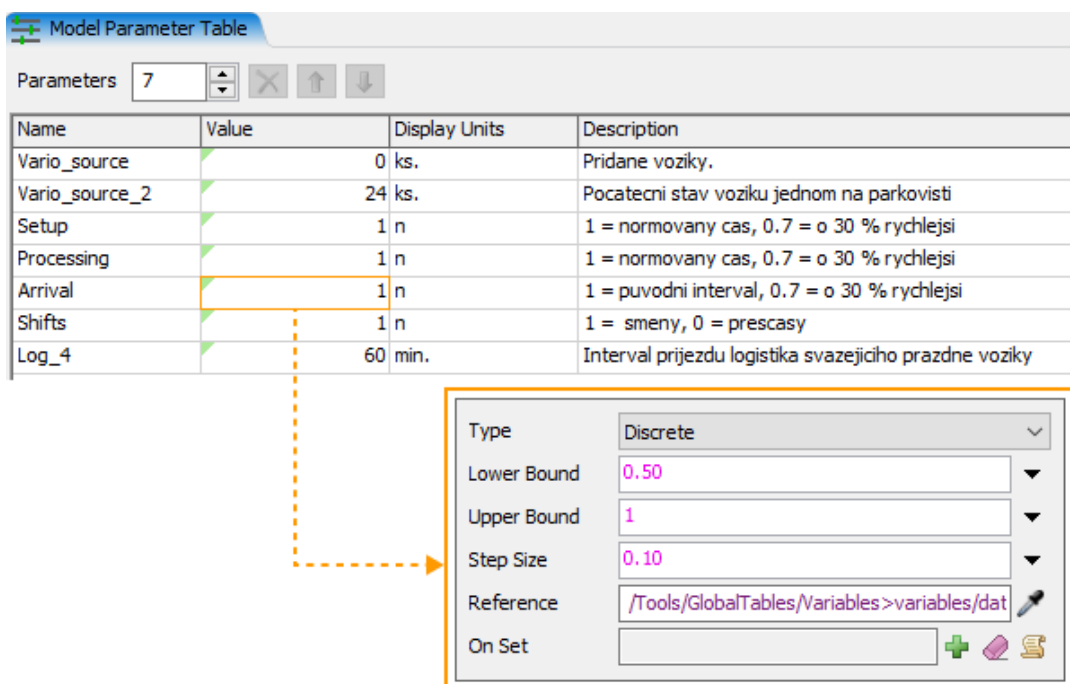
Následně bylo nutné připravit tabulky vstupů, které řídí model (intervaly příjezdu výrobků, typy výrobků, výrobní časy, destinace pracovníků apod.), a proměnné, které určují scénáře jednotlivých experimentů. Podoba některých tabulek byla již předurčena připravenými daty z fáze koncepčního modelu, ale některé (pomocné tabulky) bylo třeba vytvořit v průběhu modelování. Některé tabulky bylo dále nutné s vybranými proměnnými propojit, tím se docílilo toho, že proměnné mohly měnit hodnoty v tabulce. Pro lepší pochopení slouží následující text.

Volba proměnných modelu byla poměrně přímočará, protože vycházela ze zvolených cílů simulační studie. Pro jejich splnění bylo nutné umožnit softwaru ovlivňovat

následující: počet vozíků, výrobní a stavěcí časy pracovišť, intervaly příjezdů výrobků do výroby, spouštění směn a intervaly příjezdů logistického vláčku.

Tyto proměnné bylo v softwaru Flexsim nutné definovat v rámci „Model Parameter Tabela“. Pouze tak s nimi software dokáže automaticky hýbat při spouštění experimentů. Užití této funkce má i další výhody. V rámci nastavení proměnných lze určit jejich typ, meze, ale i kroky, po kterých je možné navyšovat či zmenšovat jejich hodnotu. Tím lze při experimentech vymezit jasné hranice a vyhnout se případným chybám způsobených překlepy.

Výslednou podobu nastavení proměnných v softwaru lze pozorovat na obrázku níže, stejně jako nastavení proměnné určující intervaly příjezdů výrobků do systému. Na obrázku lze pozorovat všechny proměnné modelu a princip jejich funkce, která je popsána v sloupečku „Description“. Z vybraného nastavení proměnné lze pochopit, že časy příjezdů se budou měnit po skocích o přesné hodnotě 0,1 (10 %), a že její maximální hodnota je 1 a minimální 0,5. Tím pádem lze simulovat celkem 5 scénářů, kdy budou časy příjezdů rychlejší o 10 až 50 %.



Obrázek 17: Proměnné simulačního modelu a nastavení určující intervaly příjezdů.

Zdroj: vlastní

Aby mohly nastavené proměnné dále ovlivňovat model, je důležité jejich napojení na řídicí prvky modelu. Pro příklad lze nadále pokračovat s intervaly příjezdů výrobků. Ve fázi sběru dat byla definována jejich řídicí tabulka č.3. Ta určuje aktuální stav systému. Dále bylo názorně ukázáno, jak proběhlo nastavení proměnné, která má danou tabulku ovlivňovat (viz. obrázek č.17). Následně byla vytvořena nová tabulka, o stejných rozměrech, jako tabulka č.3, ale místo číselných hodnot nabývaly její buňky formátu „Flex Script“. Nová tabulka vypadala následovně:

Tabulka 6: Tabulka propojující proměnnou „Arrival“ a časy příjezdů výrobků

ID	Procento [%]	Čas [min]
1	0,91 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[1][2]
2	2,28 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[2][2]
3	14,61 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[3][2]
4	4,57 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[4][2]
5	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[5][2]
6	0,91 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[6][2]
7	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[7][2]
8	0,91 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[8][2]
9	0,91 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[9][2]
10	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[10][2]
11	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[11][2]
12	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[12][2]
13	1,37 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[13][2]
...
144	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[144][2]
145	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[145][2]
146	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[146][2]
147	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[147][2]
148	0,46 %	Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[148][2]

Zdroj: Vlastní

Buňky v 3. sloupci namísto původních hodnot obsahují dynamický příkaz:

```
"Model.parameters.Arrival*Table("source_arrivals_basic")[1][2]"
```

Ten lze číst, jako:

```
"Hodnota buňky" = "Hodnota proměnné" * "Původní hodnoty buňky"
```

Tím bylo softwaru umožněno jednoduše manipulovat s velkým množstvím hodnot, aniž by bylo nutné nové hodnoty počítat externě a následně zaměňovat v softwaru Flexsim. Obdobným způsobem se postupovalo u dalších řídicích tabulek a proměnných. Po přípravě všech vstupů modelu následovala tvorba 3D modelu.

10.2 3D model

V rámci 3D rozhraní softwaru Flexsim byl vytvořen 3D model procesu výroby olejových tanků. Tento model slouží hlavně k lepší vizualizaci procesu. Ačkoliv 3D rozhraní softwaru Flexsim disponuje rozsáhlými možnostmi k nastavení modelu, byly využity v minimální míře. Většina prvků modelu byla řízena v rozhraní Process Flow, Důvodem byla značná komplexita výrobního procesu, která by byla v rámci možností 3D rozhraní pouze těžko zachytitelná. I přes to byly využity některé prvky nastavení přímo v 3D modelu.

Prvním krokem tvorby 3D modelu bylo nahrání DWG souboru s podrobným rozložením továrny. Ten následně sloužil pro umístění pracovišť a vytyčení pochozích tras pro operátory výroby.

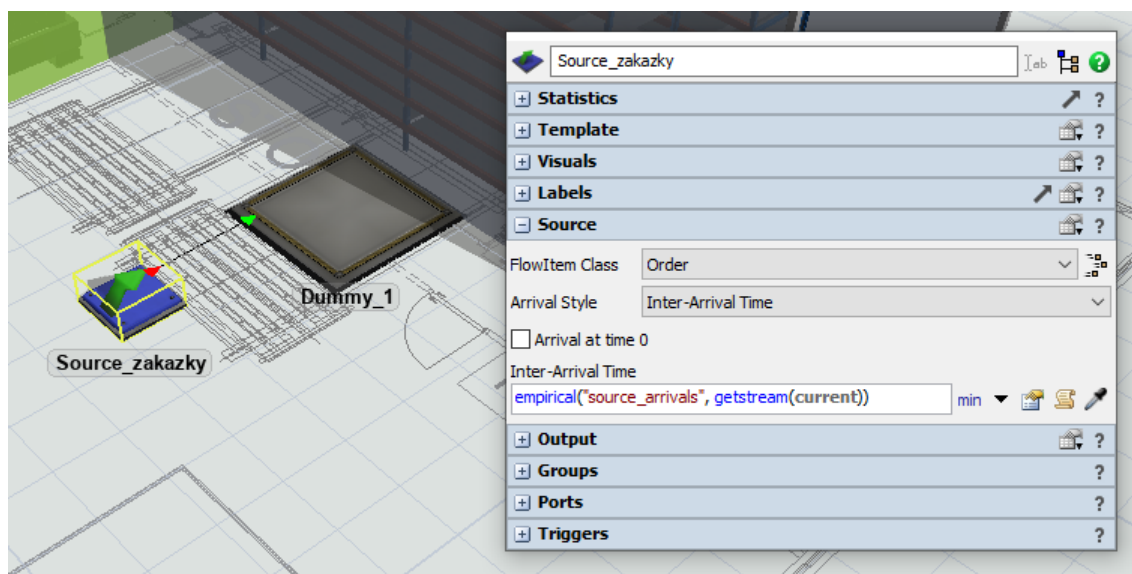
Dále následovalo postupné umísťování výrobního zařízení a pozic meziskladů. K tomu v první fázi byly využívány knihovní prvky 3D objektů softwaru Flexsim. Ty byly nahrazeny 3D modely lépe odpovídajícími realitě až v závěrečné fázi projektu. Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly č.10, pracoviště byla modelována postupně, dle materiálového toku, tudíž spolu s umístěním v 3D modelu byla pracoviště rovnou programována v rozhraní „Process Flow“. Z důvodu zachování přehlednosti bude toto programování zmíněno až v následující kapitole. Pro ukázkou funkcí 3D objektů modelu byl vybrán následující prvek.

Prvním prvkem celého procesu je objekt s názvem „Source_zakazky“. Tento objekt zajišťuje vygenerování všech zakázek do výroby. Systém řízení vstupů výrobků pomocí intervalů příjezdů do výroby byl probírán již v předchozích kapitolách. Nyní zbývá pouze ukázat, jak se tento objekt odkazuje na patřičnou tabulku.

Použitý kód zní následovně:

```
empirical("source_arrivals", getstream(current))
```

Kód softwaru říká, aby objekt použil empirické rozdělení dle tabulky „source_arrivals“. Detail nastavení objektu je možné pozorovat na následujícím obrázku.



Obrázek 18: Nastavení objektu source

Zdroj: vlastní

Na obrázku je vidět, nastavení stylu příjezdů na námi požadovanou hodnotu – interní čas příjezdů (Inter-Arrival Time), volba druhu přijíždějícího objektu – Zakázka (Order) a následně užití výše zmíněného kódu Flex Script. Políčko určující, zda má první výrobek vstoupit do výroby v čase 0 (Arrival at time 0) není zaškrtnuto z důvodů respektování chování reálného systému. Není totiž známo, zda před olejovými tanky nejsou vyráběny ostatní výrobky.

Výrobek následně putuje do objektu „Dummy_1“. Tento objekt slouží pouze jako pomocný prvek a v reálném systému se nevyskytuje. Použití těchto prvků při práci v softwaru Flexsim je poměrně běžné. Prvek slouží jako imaginární překladiště výrobků,

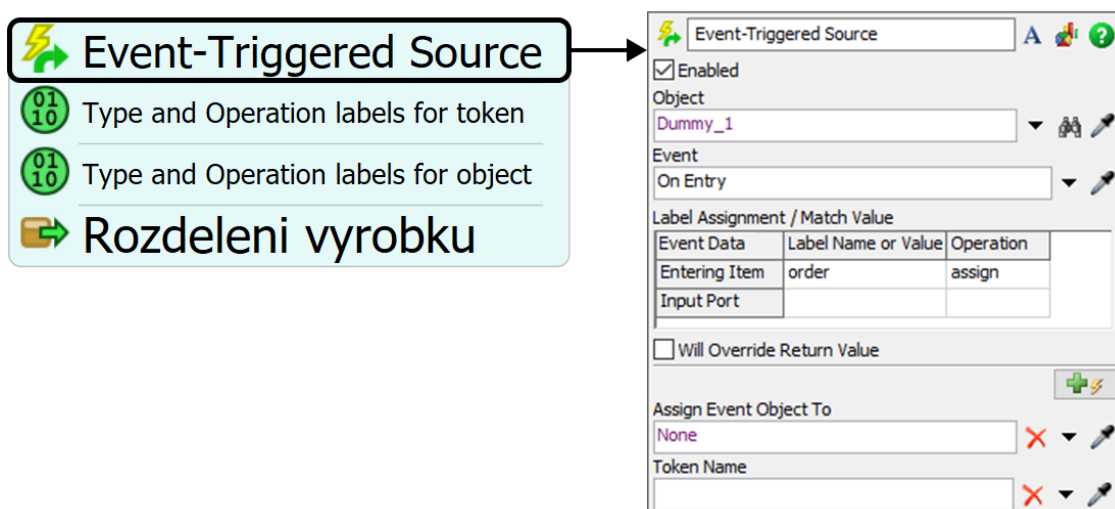
keré jsou z něj dále rozdělovány na první reálná pracoviště procesu – vylamování. Toto rozdělení probíhá v již zmíněném Process Flow.

10.3 Process Flow

V rámci Process Flow byla řízena většina klíčových funkcí modelu. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, modelování probíhalo po jednotlivých pracovištích. Proto bude nejlepší nastínit postup modelování na předchozím příkladu vstupu zakázek do systému, který se řadí mezi jednodušší příklady. Poté bude následovat rozbor vybraných pracovišť, kde probíhají, z pohledu modelování, složitější operace.

Jak již bylo zmíněné, poté, co jsou objekty vytvořeny v objektu „Source_zakazky“ a přesunuty do imaginárního překladiště „Dummy_1“, přichází na řadu Process Flow.

Při vstupu výrobku do 3D objektu (Dummy_1) objektu je v Process Flow vytvořen „Token“ s názvem „order“ (Label Name). To zajišťuje objekt z Process Flow knihovny s názvem „Event-Triggered Source“. Pro tuto činnost je důležité, aby se tento objekt odkazoval na 3D objekt „Dummy_1“ (Object). Na obrázku níže je dále vidět nutnost nastavení spouštěče (Event) tohoto objektu, který je definován na hodnotu „při vstupu“ (On entry). Zároveň lze vidět, že je umístěn na samém začátku celého Process Flow.

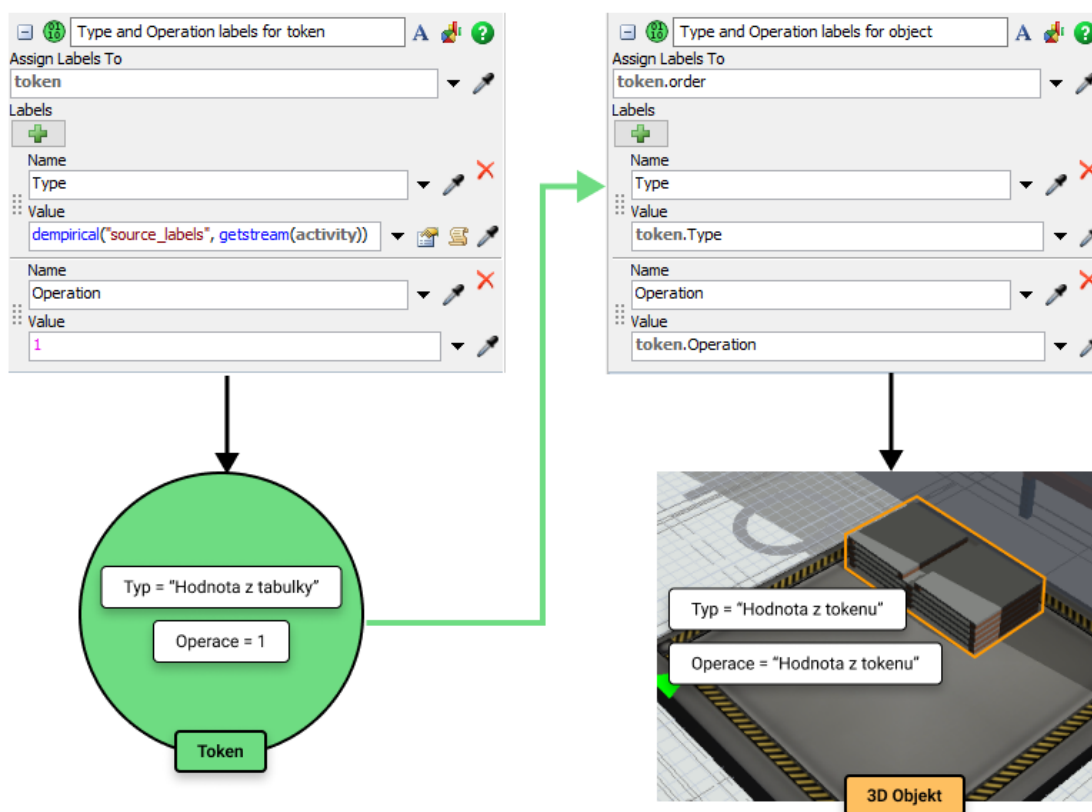


Obrázek 19: Nastavení objektu Event-Triggered Source, který řídí vstup zakázek do systému

Zdroj: Vlastní

Pro správné fungování dalších principů řízení modelu je nutné vstupující výrobky označit. V kapitole o sběru dat byla popsána příprava tabulky, která pro tento úkol slouží. Je na místě zmínit, že pro začínající uživatele softwaru Flexsim může být následující postup zprvu neintuitivní, a že existují další cesty k dosažení stejného výsledku. Avšak pro účely studie byl tento způsob vyhodnocen jako nejvhodnější.

K označení výrobku se nejprve použil prvek Process Flow knihovny s názvem „Assign Labels“. Tento objekt byl nastaven tak, aby vzniklému tokenu přiřadil číslo identifikující typ výrobku (dle zmiňované tabulky), a také určil číslo první operace – 1. Až poté byla tato čísla zpětně přiřazena objektu v 3D modelu. K tomu byl použit stejný prvek „Assign Labels“, ovšem s jiným nastavením. Tento postup bude nejlépe pochopitelný z následujícího obrázku.

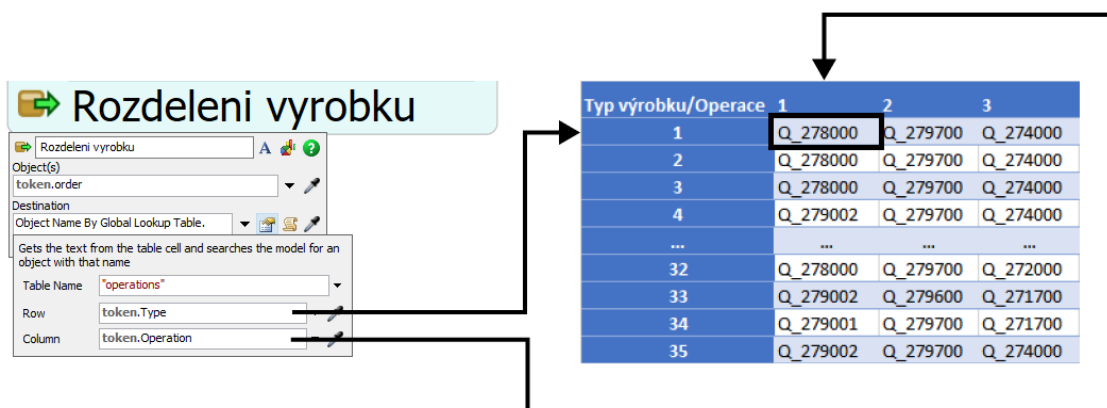


Obrázek 20: Proces označování typu výrobku a jeho čísla operace

Zdroj: Vlastní

Díky tomu, že došlo k zapsání typu výrobku přímo do 3D objektu, lze výrobek sledovat napříč celým procesem výroby. To umožňuje tvorbu různých Process Flow pro řízení jednotlivých pracovišť, bez potřeby přenášet mezi nimi stejný token. Zapsané číslo operace se naopak po každé operaci navyšuje, což umožňuje přesuny výrobků do požadovaných destinací. Tyto destinace určuje další ze dříve zmiňovaných tabulek, jejíž funkci využívá poslední objekt této Process Flow – Move Object.

Prvek „Move Object“ bere 3D objekty spojené s tokeny v Process Flow a přesouvá je na další zvolené objekty. V případě vstupu výrobků do systému se jedná o pracoviště vylamování. Tento princip je zobrazen na následujícím obrázku. Můžeme pozorovat, že object (object) odkazuje na „token.order“ – konkrétní 3D výrobek, a destinace je určena tabulkou (maticí definovanou v kap. Sběr dat) „operations“. Objekt následně tabulku prohledává a dle typu a operace nachází odkaz (název) 3D objektu, kam má výrobek přesunout. V případě, že by se jednalo o výrobek typu 1, pak by se jednalo o objekt Q_278000 (Fronta práce pracoviště č.278000 – vylamování), protože při vstupu výrobku do systému má zatím každý výrobek přiřazenou hodnotu operace č.1.



Obrázek 21: Princip objektu Move Object a přesunů výrobků na určená pracoviště

Zdroj: Vlastní

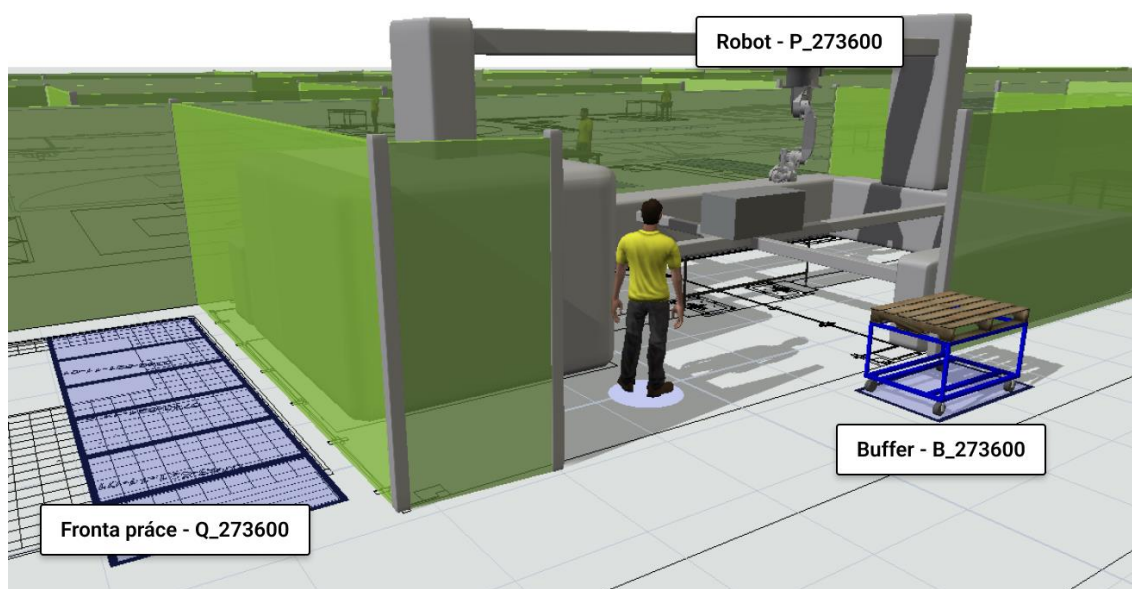
Tento objekt uzavírá celkový Process Flow i samotný příklad, který měl nastínit logiku řízení celého modelu i přístup k modelování, kdy se používaly nástroje 3D rozhraní

softwaru Flexsim v kombinaci s rozhraním Process Flow. V následujícím textu budou, již v menším detailu, popsány další vybraná pracoviště.

10.4 Svařování robotem

Svařování robotem je prvním z vybraných pracovišť. Důvodem výběru je jeho důležitost v rámci procesu výroby olejových tanků, protože zpracovává většinu objednávek, a zároveň jeho způsob operace odpovídá způsobům řízení dalších pracovišť. Díky tomu jeho popis poslouží k pochopení fungování dalších pracovišť v procesu výroby.

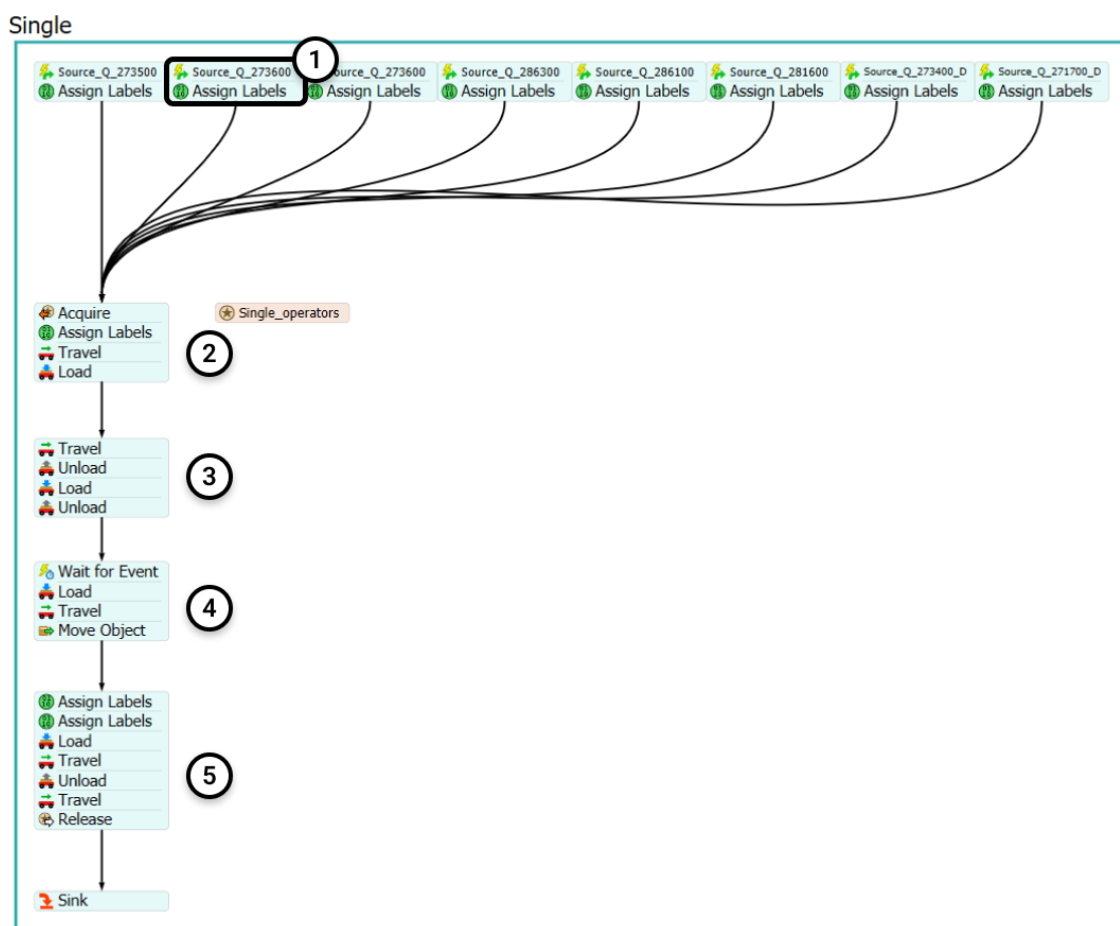
Pracoviště tvoří několik objektů 3D modelu, což lze pozorovat na obrázku níže. Prvním je fronta práce, kam operátoři nebo logistici přivážejí zakázky z předchozích operací. Ty jsou z fronty odebírány systémem FIFO (First in, first out). Operátor dojde pro vozík a převezze ho i s bodově svařeným tankem do „bufferu“. Poté tank přemístí do robota, kterého následně nastaví. Když robot dokončí operaci, je tank opět naložen na vozík, na kterém je odvezen na další operaci. V případě svařování robotem se často jedná o další frontu práce, ale i o sběrné místo pro logistiku, která bude předmětem dalšího příkladu.



Obrázek 22: Náhled 3D modelu pracoviště svařování robotem

Zdroj: Vlastní

Veškerá výše zmíněná logika je řízena v rozhraní Process Flow. Z 3D objektů se pouze model robota (ve Flexsimu nazýván Processor) odkazuje na tabulky (matice) výrobních a přípravných časů, jež byly připraveny v rámci fáze sběru dat. Proces nahlížení do těchto tabulek je obdobný, jako výše popsáný princip řízení přemísťování objektů do určitých destinací z předchozího příkladu. Výsledné Process Flow je zobrazeno na obrázku níže. Na obrázku si lze povšimnout, že Process Flow dokáže řídit více různých pracovišť, pokud je princip jejich fungování stejný. Do stejného procesu tedy vstupuje více zdrojů (source objekty). Ovšem je potřeba užít pomocné tabulky. Následující text se pokusí ve stručnosti popsat zmíněný Process Flow.



Obrázek 23: Process Flow řídí pracoviště svařování robotem a další

Zdroj: Vlastní

Část Process Flow č.1 slouží k vytvoření tokenu (když 3D objekt vstoupí do fronty práce). Dále zde probíhá přiřazení tokenu danému operátorovi, dle jeho čísla. To je nutné

z důvodu zapojení více pracovišť do stejného Process Flow. Následuje část č.2, která zařizuje aktivaci operátora a extrakci informací o výrobku z jeho 3D objektu. Jedná se o informace určující jeho typ a číslo operace. Operátor je dále instruován k cestě do fronty práce a vyzvednutí vozíku s objednávkou. V 3. části pak cestuje k bufferu, kde vozík zanechává, nakládá olejový tank a následně jej vykládá do svařovacího robota. Část č.4 začíná tím, že operátor čeká, dokud robot nedokončí proces svařování. Poté tank přemísťuje opět na vozík. Část č.5 je značně důležitá. Na jejím začátku dochází k navýšení čísla operace v tokenu, které se následně zapisuje do 3D objektu výrobku. Nakonec operátor odváží vozík do cílené destinace (dle tabulky „operations“), vrací se na své pracoviště a jeho kapacita je uvolněna pro zpracování další objednávky.

Jak bylo uvedeno v textu výše, krom již zmíněných tabulek byla využita ještě jedna pomocná tabulka. Její funkcí je řídit cesty jednotlivých operátorů napojených na stejné Process Flow. Každý operátor je symbolizován jedním řádkem, a sloupce tabulky lokalizují jeho přiřazené fronty práce, buffery a procesory. Užití takové tabulky umožňuje napojení více pracovišť na jedno Process Flow. Tento princip byl užit i u dalších pracovišť, které šlo dle principů jejich funkce řídit pouze jedním procesem. Níže je ukázka tabulky užití v tomto příkladu, kde je operátor pracoviště svařování robotem reprezentován řádkem č.2.

Tabulka 7: Pomocná tabulka pro řízení pracovišť jedním Process Flow

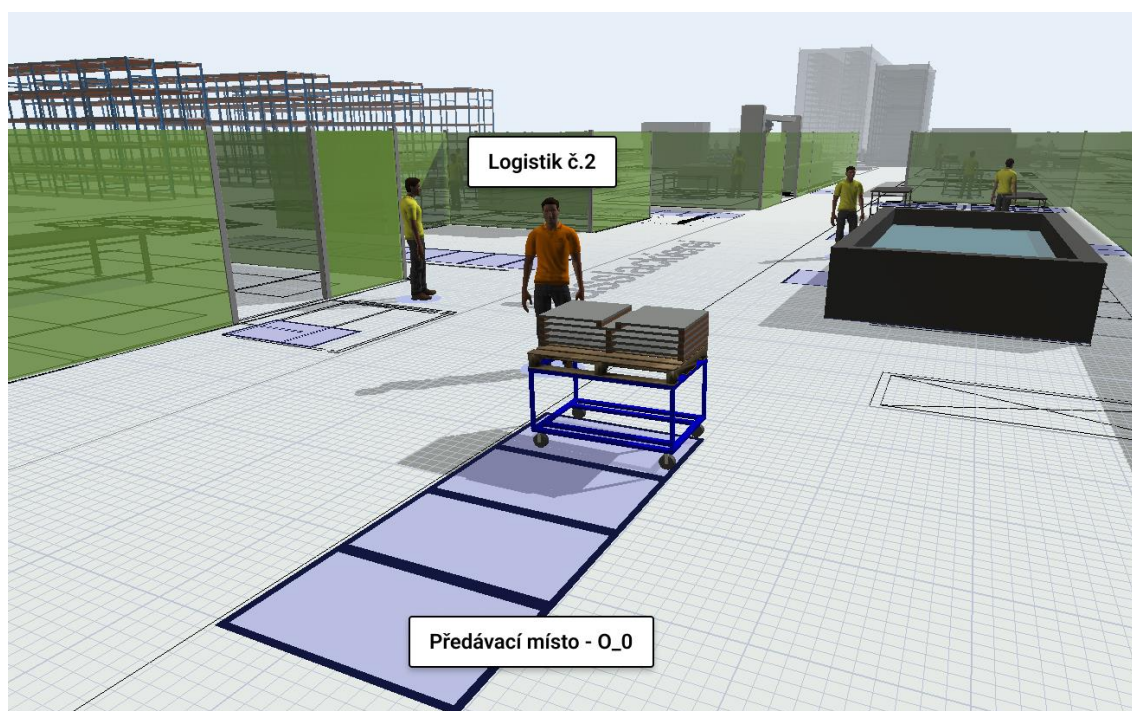
Operátor	Q	B	P
1	Q_273500	B_273500	P_273500
2	Q_273600	B_273600	P_273600
3	Q_272800	B_272800	P_272800
4	Q_286300	B_286300	P_286300
5	Q_286100	B_286100	P_286100
6	Q_281600	B_281600	P_281600
7	Q_273400_D	B_273400	P_273400
8	Q_271700_D	B_271700	P_271700

Zdroj: Vlastní

10.5 Řízení logistiky

Ačkoliv se v procesu výroby objevuje více z hlediska simulací zajímavých logistických operací, tak je možné, vzhledem k rozsahu textu, popsat pouze jednu. Vzhledem k předchozím příkladům byla vybrána logistická operace s pracovním názvem „Logistika_2“. Ta totiž přímo navazuje na předchozí příklad.

Operace logistiky je v 3D rozhraní zobrazena jednoduchým způsobem. Tvoří ji model operátora logistiky, předávací místo a místo mimo halu výroby olejových tanků, kam se logistik vrací po splnění všech úkolů. Do haly výroby se vrací v pravidelných intervalech po 2 hodinách. Místo návratu logistika není na obrázku níže zobrazeno.



Obrázek 24: Logistik č.2 a předávací místo, které obsluhuje

Zdroj: Vlastní

Přestože 3D rozhraní softwaru Flexsim nabízí mnoho možností k řízení logistických operací, ani jedna nebyla dostatečně flexibilní pro účely simulace. Proto je celý proces logistiky opět řízen v rámci Process Flow.

V bodě č.2 dochází k „zavolání“ logistika (vytvoření jeho tokenu) každých 120 minut. Ten následně cestuje k předávacímu místu, kde nejprve vyhodnotí, zda se zde nacházejí výrobky určené k přepravě. Pokud zde žádná zakázka není, odchází pryč z haly a vrací se až za další 2 hodiny. Dále dochází k rozhodnutí, zda je v předávacím místě více, či méně než 4 zakázky. Důvodem tohoto vyhodnocení je princip fungování programu Flexsim. Logistik může naložit maximálně 4 zakázky, tento fakt se v Process Flow řeší tak, že pokud je v předávacím místě víc než 4 zakázky, je logistik v bodě č.3 instruován k naložení přesně 4 zakázek. V případě, že je zakázek méně než 4, je instruován (bod č.4) k naložení všech zakázek z předávacího místa. Tím se zamezí situaci, v které by logistik naložil víc, jak 4 zakázky najednou.

V bodech č.3 a č.4 následně dochází ke stejným operacím. Nejprve se vytvoří tokeny na základě informací v „list_k_prevozu“, vyhodnotí se a zaznamenají informace o výrobcích (typ a operace) a dojde k jejich naložení. Zde je nutné zmínit, že po naložení dochází k opětovnému zapsání do listu, ovšem tentokrát se jedná o list s názvem „List_nakladu“. K tomu dochází v 3D objektu, který reprezentuje operátora v 3D rozhraní. Následně dochází k dalším krokům ProcessFlow. Pokud bylo v bodě č.2 rozhodnuto, že je v předávacím místě víc jak 4 výrobky a token pokračoval ke kroku č.3, následuje krok č.5, pokud nastal druhý scénář, kdy výrobků bylo méně, následoval po kroku č.4 krok č.6.

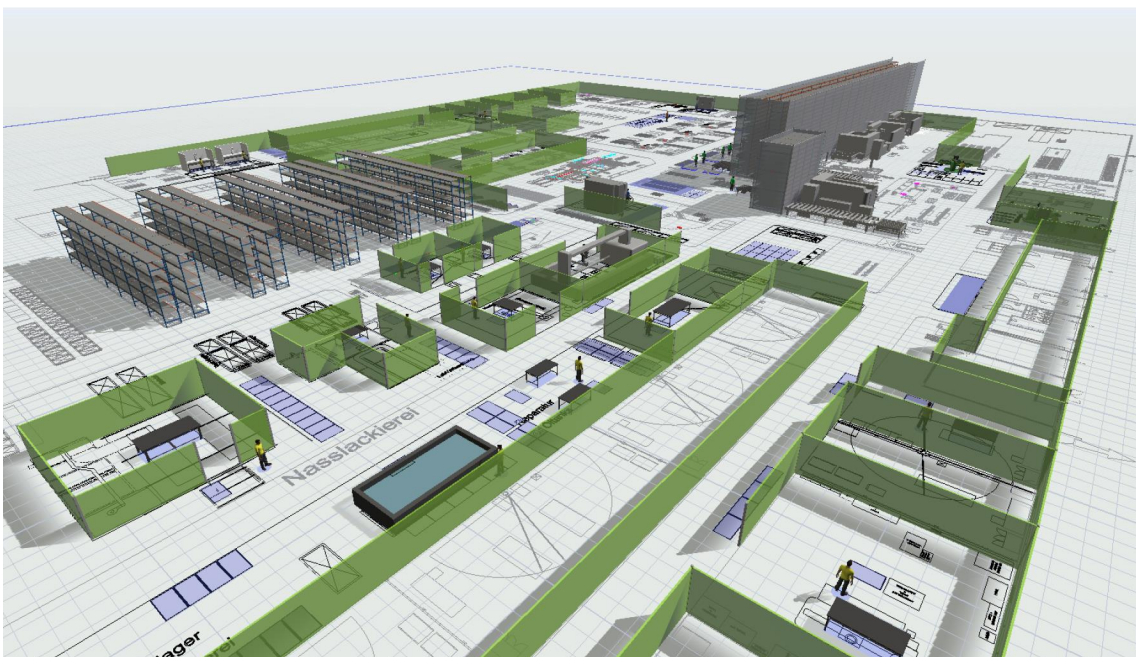
Oba poslední kroky jsou ve své podstatě podobné. Pracovník postupně cestuje po určené trase k vybraným pracovištím, a dle obsahu nákladu (viz. „List_nakladu“) vykládá do jejich front práce všechny příslušné výrobky. Po vyložení veškerého nákladu se odebírá mimo halu.

Tím končí poslední ukázkový příklad fáze tvorby simulačního modelu. Všechny výše vybrané příklady byly zvoleny tak, aby co nejlépe popsaly všechny užité přístupy k modelování v rámci simulační studie. V kap.10 bylo na jednoduchém příkladu představeno podrobné chování 3D rozhraní, Process Flow, práce s tabulkovými daty a proměnnými. Další příklady pak ukázaly, jak se tyto koncepty dají škálovat do větších rozměrů. Podoba výsledného modelu, který zahrnuje celý proces výroby, spolu s řídicí logikou všech použitých Process Flow je zobrazena na následujících obrázcích.



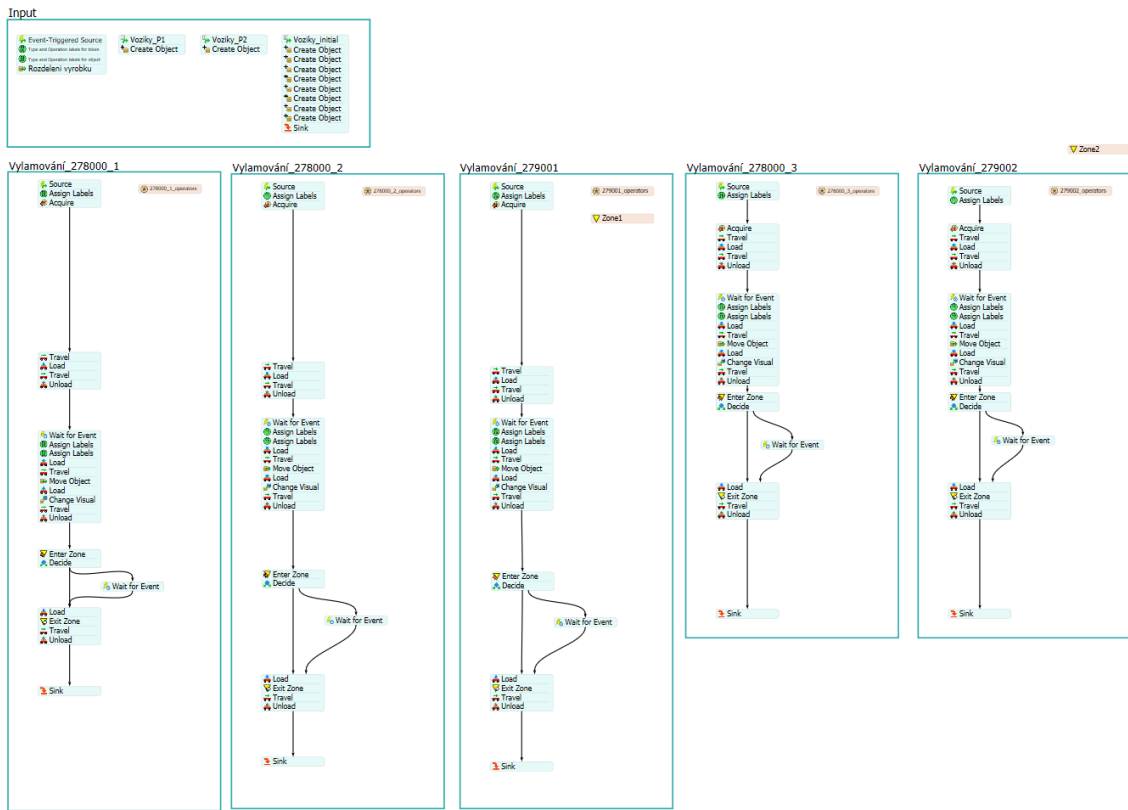
Obrázek 26: Jiho – východní pohled na simulační model

Zdroj: Vlastní



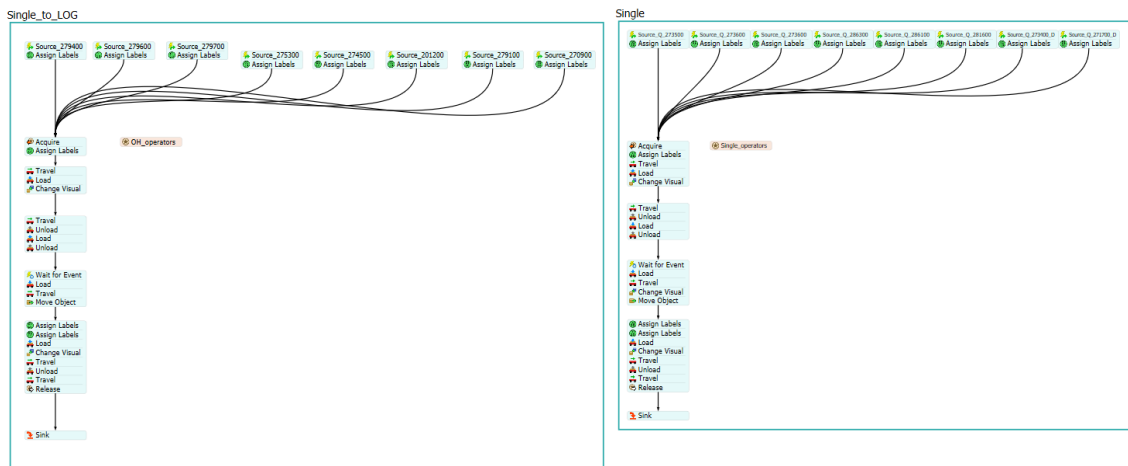
Obrázek 27: Severo – západní pohled na simulační model

Zdroj: Vlastní



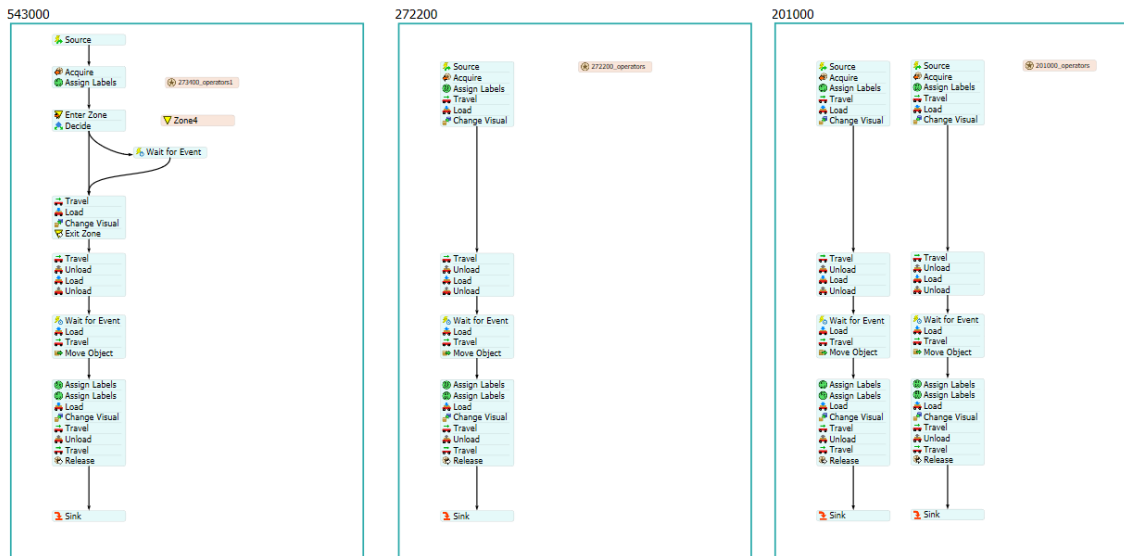
Obrázek 28: Process Flow pro řízení procesu vstupů objektů do výroby a vylamování

Zdroj: Vlastní



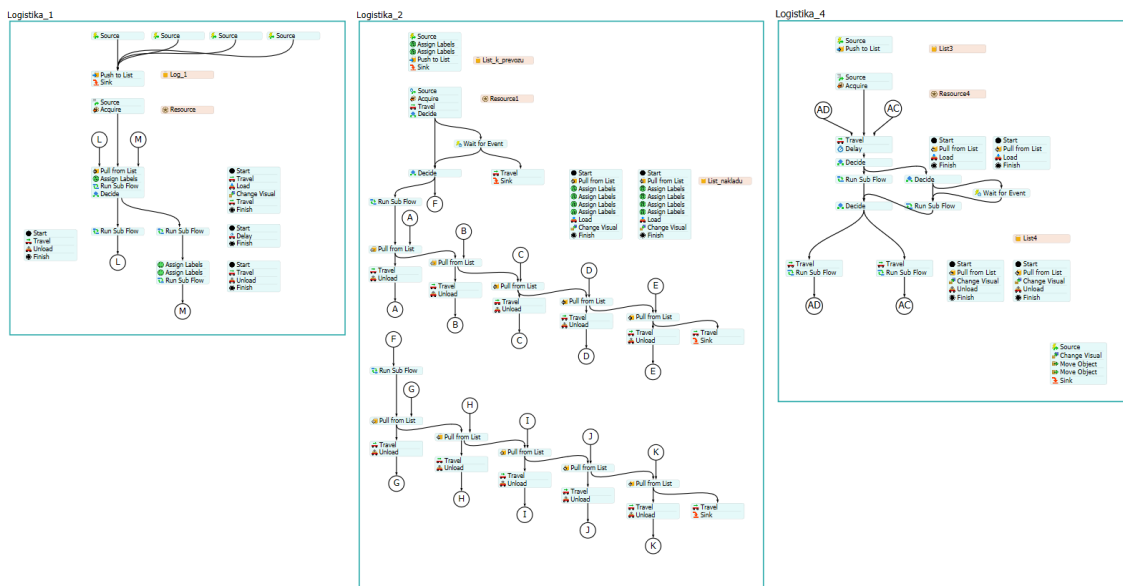
Obrázek 29: Process Flow řídicí několik pracovišť s podobnou operativou

Zdroj: Vlastní



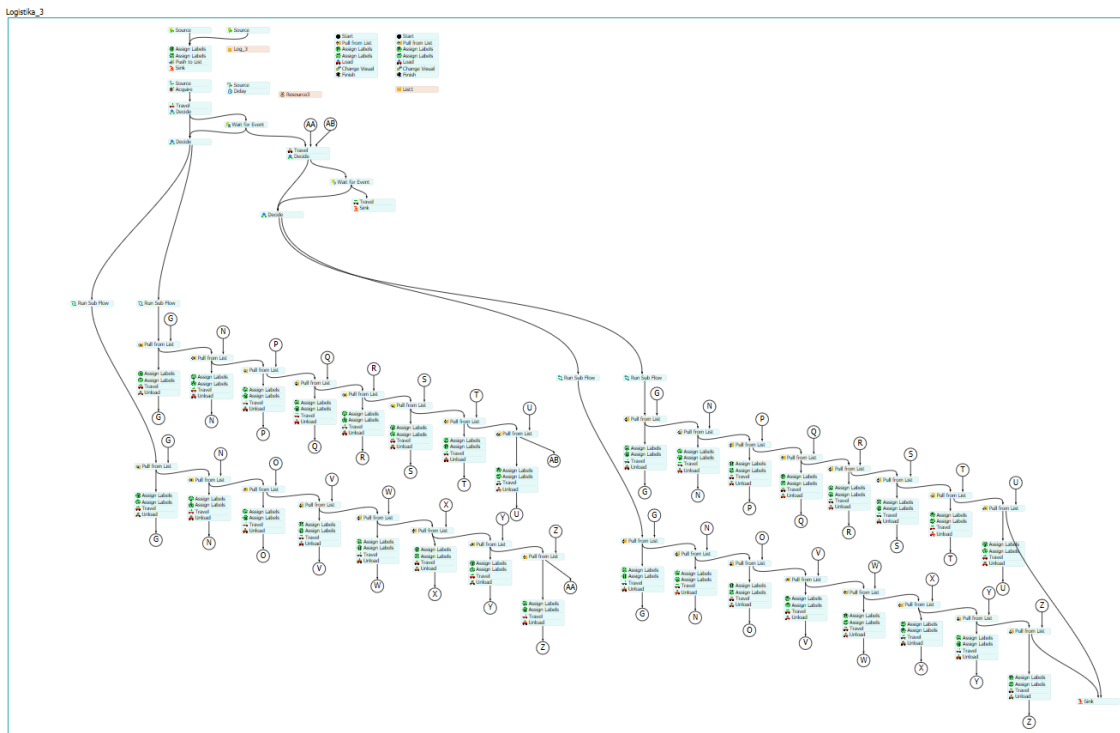
Obrázek 30: Process Flow pro řízení pracovišť s jedinečnou operativou

Zdroj: vlastní



Obrázek 31: Process Flow řídicí procesy logistiky 1, 2 a 4

Zdroj: Vlastní



Obrázek 32: Process Flow řídicí proces logistiky č.4

Zdroj: vlastní

Ještě před postupem k verifikaci modelu je třeba zmínit, že popis procesu tvorby modelu nevystihuje jeho celkovou složitost. Popis je značně zjednodušený a vysvětluje pouze princip modelování. Vzhledem k rozsahu práce a snaze o srozumitelnost textu nebylo možné popsat nastavení všech objektů (viz. výše zobrazená Process Flow).

10.6 Verifikace modelu

V rámci tvorby simulačního modelu musela být ověřena správnost simulačního modelu vůči modelu koncepčnímu. Vstupní data pro simulační model byla verifikována již v rámci definice modelu, verifikací modelu je tedy myšleno ověření, že tato verifikovaná data byla do simulačního softwaru zadána správným způsobem, a že je software dokáže správně číst a model je respektuje.

Tato verifikace proběhla porovnáním obsahu tabulek vytvořených v softwaru Flexsim s tabulkami vytvořenými ve fázi sběru dat. Následně se zkoumalo chování jednotlivých

pracovišť i celého systému. Tuto činnost nebylo možné nijak automatizovat, proto byla časově náročná. Simulace se zpomaleně několikrát pouštěla a pozorovalo se chování prvků v 3D rozhraní i v Process Flow. Činnost dále podpořilo sledování určitých ukazatelů výkonnosti systému i jednotlivých prvků v rámci Flexsim nástěnek (Dashboard), při kterém se kontroloval vznik nečekaných anomálií v chování jednotlivých prvků. Např., zda nedochází k nepřirozenému vytížení některého z pracovišť, či zda jsou respektovány výrobní a přípravné časy.

Všechny anomálie byly eliminovány a chyby opraveny. Výsledný model čte data správně a chová se dle záměru. Tím se otevřela cesta k další fázi simulační studie – validaci modelu.

11 Validace simulačního modelu

Po verifikaci simulačního modelu bylo nutné model validovat. Účelem fáze validace modelu je podrobit model poslední zevrubnou zkouškou, která odhalí správnost postupu v rámci všech předchozích fází. Pro správnou validaci modelu je totiž třeba, aby byl správně vytvořen koncepční model i vstupní data modelu, a v neposlední řadě celý model správně vytvořen.

Samotná validace modelu proběhla porovnáním chování modelu s reálným systémem. Nejprve se sesbírala data o chování modelu (více v kap. Analýza aktuálního stavu). Ta se následně prezentovala zadavateli studie (expert na reálný systém), který potvrdil, zda se model chová jako modelovaný systém. Data, s kterými se při validaci modelu pracovalo budou součástí kapitoly analýza aktuálního stavu, proto zde budou uvedeny pouze základní ukazatele.

Prvním ukazatelem byl počet vyrobených kusů za dané období a počet vyrobených kusů denně. Tyto hodnoty reálného systému musely být dopočteny z dat systému ERP. Při dopočtení těchto ukazatelů z reálného systému mohly vzniknout menší chyby. To je způsobeno velkým množstvím dat a způsobem, kterým podnik data sbírá, při kterém jsou posbíraná data ovlivněna lidským faktorem. Reálná výroba v daném období také

běžela formou přesčasů. To mohlo způsobit, že změřená data „s přesčasy“ jsou přesnější, než dále dopočítaná data „bez přesčasů“. K vnesení chyb mohlo dojít právě dopočtením přibližných hodnot, kdy by výroba běžela bez přesčasů. Tyto data byla dopočítána z důvodu zájmu zadavatele o analýzu výroby při normálním provozu. Dále byly simulovány scénáře s přesčasy i bez, aby bylo možné porovnat provoz s přesčasy, ale i teoretický provoz bez přesčasů. Výsledky srovnání shrnuje následující tabulka.

Tabulka 8: Srovnání modelu a reálného systému použité při validaci modelu

	Hotové zakázky celkem [ks]			Vyrobené ks. za den [ks]		
	Model	Reálný systém	Rozdíl	Model	Reálný systém	Rozdíl
Bez přesčasů	242	225	7,56 %	8,3	7,5	10,67 %
S přesčasy	334	330	1,21 %	11,5	11,25	2,22 %

Zdroj: Vlastní

Z tabulky lze vyčíst, že simulační model v provozu bez přesčasů vyrobil celkem 242 olejových tanků, což je o 7,56 % více než v případě reálného systému, a že vyráběl o 10,67 % více výrobků denně, činí 0,8 výrobku denně. Jak bylo zmíněno výše, tak je tato chyba způsobena převážně formou sběru dat a dopočítáním hodnot pro reálný systém. Zadavatel studie však potvrdil, že je tato chyba akceptovatelná.

V případě provozu s přesčasy byl rozdíl oproti reálnému systému již značně menší. Celkový počet zakázek byl 334, tedy pouze o 1,21 % vyšší než v případě reálného systému, který vyrobil 330 tanků. Průměrný počet vyrobených zakázek denně byl vyšší o 2,22 % (0,25 tanku denně).

Tento ukazatel je silně závislý na správném nastavení intenzity vstupů, kde i malá chyba může mít závažnější dopad na výsledný počet vyrobených kusů.

Je na místě zmínit, že uvedené hodnoty ukazatelů pro simulační model byly získány z celkem 32 běhů simulace, a že představují průměrné hodnoty ze všech běhů. Vezmeme-li v úvahu, že se při každém běhu vyráběly jiné typy výrobků, které mají značně rozdílné výrobní časy, a že hodnoty z ERP představují pouze 1 konkrétní scénář, je na místě prozkoumat intervaly, v kterých se výsledné hodnoty simulace pohybovaly.

To nám může dále napovědět, jak moc simulace reálnému systému odpovídá. Tyto výsledky shrnuje následující tabulka.

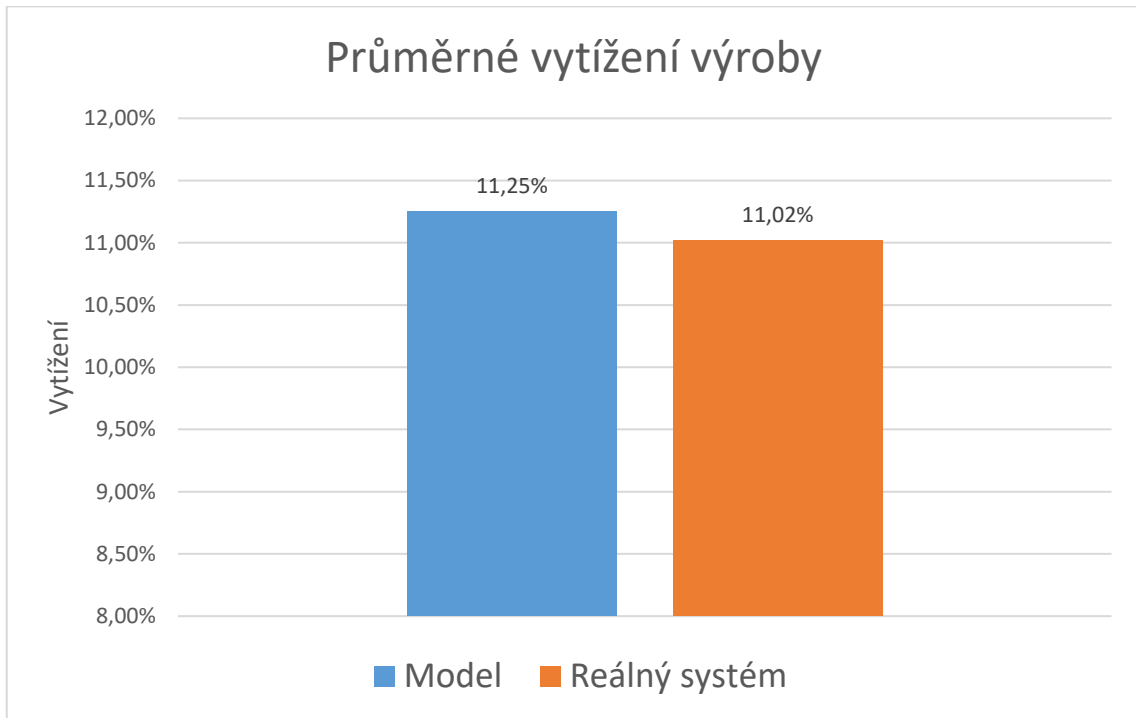
Tabulka 9: Vybrané intervaly hodnot ukazatelů určených k validaci modelu

-	Hotové zakázky celkem [ks]			Vyrobené ks. za den [ks]		
	Model		Reálný systém	Model		Reálný systém
	25% percentil	75% percentil		25% percentil	75% percentil	
Bez přesčasů	224	266	225	7,7	9,1	7,5
S přesčasy	314	356	330	10,8	12,2	11,25

Zdroj: Vlastní

Tabulku tvoří již zmíněné hodnoty reálného systému a hodnoty prvního a třetího percentilu simulovaných ukazatelů. Ty nám říkají, že 50 % simulačních běhů získalo výsledky mezi těmito hodnotami. Je vidět, že 3 dopočítané hodnoty do těchto intervalů spadají. Pouze hodnota vyrobených kusů za den (v provozu bez přesčasů) se od nižší hranice intervalu odchyluje o 2,6 %. Tyto výsledky tedy zvyšují důvěru ve správnost modelu. I přesto, vzhledem k chybám v rámci provozu bez přesčasů, je třeba uvést, že vstupní data (export ERP) byly posbírány z provozu s přesčasy a model byl vytvořen na jejich základě. To dokazují i výše uvedené tabulky, v kterých je vidět zřetelně menší chyba v porovnání provozu s přesčasy a bez přesčasů. To je způsobeno obtížností čištění dat, kdy je značně komplikované dosáhnout vstupních hodnot neovlivněných přesčasy.

Posledním ze základních ukazatelů užitých při validaci modelu byla hodnota průměrného vytížení výroby olejovými tanky. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v následujícím grafu. Rozdíl vytížení simulačního modelu vůči reálnému systému tvoří 0,23 %, což znamená, že pracoviště v simulačním modelu jsou oproti testovacímu vzorku dat vytížena o 2,04 % víc. Tento rozdíl je dle zadavatelů simulační studie akceptovatelný. V případě, že bychom sledovali interval, v kterém se pohybovaly výsledky jednotlivých simulačních běhů, zjistili bychom, že se vytížení pracovišť dle testovacích dat pohybuje mezi jeho horní a dolní hranicí.



Graf 8: Průměrné vytížení výroby užitá při validaci modelu

Zdroj: vlastní

Vzhledem k tomu, že byl model úspěšně validován, je na místě přistoupit k další fázi. Ostatně všechny předchozí kroky simulační studie byly realizovány za účelem provedení experimentů.

12 Návrh a realizace experimentů

Tato fáze projektu tvoří jádro celé simulační studie. Zde, pokud bylo v předchozích fázích projektu postupováno správně, dochází ke splnění účelů studie a k nalezení odpovědí na otázky, jež byly položeny na začátku studie. Ovšem, aby bylo možné experimenty správně vyhodnotit, je třeba určit referenční hodnoty, s kterými se budou výsledky porovnávat, jinými slovy, prozkoumat aktuální stav systému.

12.1 Analýza stávajícího stavu

Jak již bylo zmíněno, v simulačním modelu se pohybovaly pouze olejové tanky. Ovšem v reálném systému se spolu s tanky vyrábí i ostatní výrobky. Na tento fakt je potřeba při čtení výsledků brát zřetel, protože mnoho ukazatelů bude směrodatných pouze pro tanky, např. počty vozíků, nebo nachozená vzdálenost operátory. Vzhledem k tomu je nejlepší nejprve prozkoumat vliv ostatních výrobků na kapacitní možnosti výroby tanků.

V tabulce č.10 jsou vidět kapacitní možnosti jednotlivých pracovišť a hodnota jejich vytížení výrobou olejových tanků. V řádcích, kde tato hodnota nabývá 0 % se jedná o minimální vytížení vzhledem k celkové kapacitě pracoviště. Můžeme pozorovat, že mezi nevytíženější (pouze tanky) pracoviště se řadí pracoviště přípravy pro lakovnu (40 %), přípravy pro robota (59 %), vaření a stehování (37 %) a tlakové zkoušky (33 %).

V dalším sloupci tabulky jsou již dopočítané hodnoty vytížení pracovišť z ERP. Vzhledem k tomu, že v ERP byly data s přesčasy, ale nás nyní zajímají data bez přesčasů, jsou to vytížení dopočítaná. K jejich hodnotám se došlo pomocí odstranění zanedbání objednávek, na kterých se pracovalo mimo normální pracovní dobu. Řádky, kde hodnoty chybí, reprezentují pracoviště, na kterých se dle systému pracuje pouze na olejových tankách. Hodnoty jsou pouze u pracovišť, kde se setkává výroba olejových tanků s ostatními výrobky. Hlavně tyto pracoviště nás budou zajímat v dalších experimentech.

Tabulka 10: Vytížení pracovišť v aktuálním stavu bez přesčasů

Číslo pracoviště	Jméno pracoviště	Kapacita za měsíc [min]	Vytížení tanky [%]	Vytížení ostatní [%]	Vytížení celkem [%]	Zbýlá kapacita [%]
201000	Značení	28 440	6,00%	-	6,00%	74,00%
201200	Odříznout	28 440	0,00%	-	0,00%	80,00%
270900	Dokončování	28 440	0,00%	-	0,00%	80,00%
271700	Vaření a stehování	28 440	37,00%	2,88%	39,88%	40,12%
272200	Tlaková zkouška	28 440	33,00%	12,04%	45,04%	34,96%
272800	Vaření a stehování	28 440	12,00%	-	12,00%	68,00%
273400	Příprava pro robota	28 440	59,00%	5,19%	64,19%	15,81%
273500	Robot Valk	28 440	24,00%	23,64%	47,64%	32,36%
273600	Dokončení po robotu	28 440	28,00%	32,19%	60,19%	19,81%
274500	Vaření a stehování	28 440	9,00%	-	9,00%	71,00%
275300	Řezání závitů	28 440	4,00%	63,60%	67,60%	12,40%
278000	Vylamování	170 640	2,00%	56,04%	58,04%	21,96%
279000	Vylamování	56 880	2,00%	69,83%	71,83%	8,17%
279100	Odhrotování	28 440	0,00%	74,10%	74,10%	5,90%
279400	Ohranění_5	28 440	0,00%	-	0,00%	80,00%
279600	Ohranění_7	28 440	2,00%	73,21%	75,21%	4,79%
279700	Ohranění_8	28 440	18,00%	44,87%	62,87%	17,13%
281600	Zakrytování	28 440	8,00%	-	8,00%	72,00%
286100	Lakování	28 440	19,00%	44,25%	63,25%	16,75%
286300	Příprava pro lakovnu	28 440	40,00%	16,17%	56,17%	23,83%
543000	QM	56 880	0,00%	-	0,00%	80,00%
Celkem		796 320	11,25%	31,00%	42,25%	37,75%

Zdroj: Vlastní

V následujícím sloupci je spočítané již celkové vytížení pracovišť (tanky + ostatní) a zbylá kapacita každého pracoviště. Ta reprezentuje hodnotu, o kterou můžeme každé pracoviště ještě vytížit. Pozorný čtenář si může všimnout, že součtem vytížení a zbylé kapacity nedosáhne hodnoty 100 %, ale dosáhne pouze 80 %. To je zapříčiněno tím, že efektivita výroby (dle zadavatele studie) je 80 %. Tím pádem je celková kapacita pracovišť omezena na 80 % měsíční kapacity. Dle hodnot zbývající kapacity můžeme odhadnout, kde mohou vznikat potenciální úzká místa, např. pracovišti Ohranění_7 zbývá pouze 4,79 % volné kapacity.

Dále je třeba zaznamenat hlavní ukazatele výkonnosti systému v aktuálním stavu vzhledem k plánovaným experimentům (účelům studie). K tomu posloužila následující tabulka, která zobrazuje průměrné hodnoty výsledných ukazatelů a jejich odchylku v rámci 90 % intervalu spolehlivosti. Mezi sledované hodnoty patřil počet vyrobených kusů tanků za měsíc, počet vyrobených kusů za den, průměrný čas na výrobu jednoho tanku, vzdálenost, která byla překonána všemi pracovníky za měsíc, a vzdálenost, kterou překonali pouze operátoři logistiky.

V provozu bez přesčasů bylo vyrobeno celkem 242 olejových tanků. Každý den se jich vyrobilo 8,3. Čas na výrobu 1 tanku byl roven 20,9 hodinám a pracovníci nacestovali celkem 317,6 km. V aktuálním stavu je dle zadavatele studie, využíváno 100 přepravních vozíčků.

Tabulka 11: Ukazatele stavu aktuálního nastavení systému vzhledem k účelům studie

	Bez přesčasů		S přesčasy	
	Průměr	Odchylka	Průměr	Odchylka
Vyroběných tanků [ks] (Interval spolehlivosti 90 %)	242,44	± 11,14	338,59	± 13,58
Hotové zakázky za den [ks] (Interval spolehlivosti 90 %)	8,336	± 0,318	11,642	± 0,388
Čas na výrobu 1 zakázky [hod] (Interval spolehlivosti 90 %)	20,899	± 1,001	14,468	± 0,479
Vzdálenost celkem [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	317,65	± 28,21	391,64	± 35,41
Vzdálenost logistiky [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	194,84	± 4,3	222,73	± 5,79
Počet vozíčků ve výrobě [ks]	100	0	100	0

Zdroj: Vlastní

V rámci simulace bylo měřeno ještě mnoho dalších ukazatelů systému, které mohou být zajímavým přínosem pro zadavatele studie. Bylo měřeno, kolik kusů každého typu výrobku se vyrobilo, počet zakázek v oběhu, průměrný čas výroby dle pracoviště, průměrný čas výroby dle typu výrobků a počty zakázek v jednotlivých frontách práce. Vzhledem k účelu studie a rozsahu práce bude zaznamenán pouze poslední zmíněný ukazatel – obsah front práce na pracovištích.

Tento ukazatel byl představen, protože již během simulace došlo k zjištění, že některé fronty nemají dostatečnou kapacitu. Zadavatel studie tedy doplnil ještě jeden cíl studie,

dle kterého by se mělo zjistit, na jakých pracovištích k tomuto jevu dochází, a určit minimální potřebnou kapacitu těchto front. To je v rámci studie aktuálního stavu systému vidět hned v další tabulce, kde jsou nedostatečně velké fronty pracovišť zvýrazněny červenou barvou. Je zde také vidět, o kolik vozíčků je kapacita příliš nízká. Tato čísla vznikla z rozdílu udávané kapacity pracoviště a největším dosaženým počtem vozíčků ve frontě ze všech scénářů. Aby se výroba neupravovala na základě pouze jednoho scénáře, byl zaznamenán i maximální počet vozíčků, který nepřesáhlo víc jak 75 % scénářů. Tento počet může být praktičtější ukazatelem toho, jak velkou kapacitu by každá fronta měla mít.

Nedostatečné kapacity front práce v krajních případech jsou na pracovištích 271700 (-6), 273400 (-7), 273600 (-1), 279700 (-4). největší nedostatek pak představuje přetížení kapacity o 20 vozíčků na pracovišti 286300. Pak by bylo vhodné navýšit kapacitu parkovišť prázdných vozíčků aspoň o 2 vozíky na každé pracoviště.

Tabulka 12: Maximální počty vozíčků v jednotlivých frontách práce

č. pracoviště	j. pracoviště	Zadaná kapacita	min_MAX	max_MAX	75% času	Rozdíl
201200	Odříznout		2	1	1	1
270900	Dokončování		2	0	1	1
271700	Vaření a stehování		3	3	9	7
273400	Příprava pro robota		3	3	10	8
273500	Robot Valk		6	1	3	3
273600	Dokončení po robotu		3	2	4	3
274500	Vaření a stehování		2	0	1	1
275300	Řezání závitů		4	2	3	3
279100	Odhrotování		3	0	1	1
279400	Ohranění_5		8	0	2	1
279600	Ohranění_7		8	1	3	2
279700	Ohranění_8		8	5	12	9
281600	Zakrytování		12	1	2	1
286100	Lakování		10	1	3	2
286300	Příprava pro lakovnu		6	6	26	15
-	O_0		4	2	4	3
-	O_1		8	3	7	5
-	O_2		4	2	4	3
-	O_279400_279600		4	1	1	1
-	P_1		24	25	26	25
-	P_2		24	24	26	24

Zdroj: Vlastní

Po zaznamenání aktuálního stavu systému bylo možné přejít k prvnímu experimentu, který se zabýval určením minimálního počtu vozíčků za současného provozu.

12.2 Experiment 1 – počet vozíků v oběhu

Tento experiment sloužil k určení minimálního počtu vozíčků ve výrobě, aniž by došlo k ovlivnění jejího výkonu, a zároveň nikdy nedošlo k tomu, že na jednom z parkovišť prázdných vozíčků klesne jejich počet na hodnotu 0. Je nutné zmínit, že určený počet vozíčků se týká pouze výroby olejových tanků. Výsledný počet vozíčků ve výrobě s ostatními výrobky musí být logicky vyšší.

V rámci softwaru Flexsim jsme využili již zmíněnou proměnnou (parametr modelu) a funkci softwaru s názvem „Experimenter“. V něm byly nastaveny jednotlivé scénáře.

12.2.1 Nastavení experimentu

Každý scénář byl nastaven, aby používal jiný počet vozíčků na vstupu do výroby (Hodnota parametru „Vario_source_2“. Již při analýze aktuálního stavu bylo zjištěno, že původní odhad zadavatele studie – 100 vozíčků, je moc vysoký. Proto budou uvedeny pouze scénáře definující přesný minimální počet vozíčků, který by se mohl pohybovat mezi 40 - 70 ks. Na zřetel byl brán i interval příjezdů logistika, který přiváží prázdné vozíky na příslušná parkoviště (parametr „Log_4“), ale bylo zjištěno, že jeho změna nemá na výsledky žádný vliv. Z toho důvodu tyto scénáře nebudou dále zmíněny. Nastavení scénářů v nástroji Experimenter proběhlo dle následující tabulky. V prvním sloupci jsou názvy jednotlivých scénářů a v druhém jsou uvedeny hodnoty vybraného parametru.

Tabulka 13: Nastavení scénářů Experimentu 1

Scénáře	Vario_source_2 [ks]
40 ks	16
44 ks	18
48 ks	20
52 ks	22
56 ks	24
60 ks	26
64 ks	28

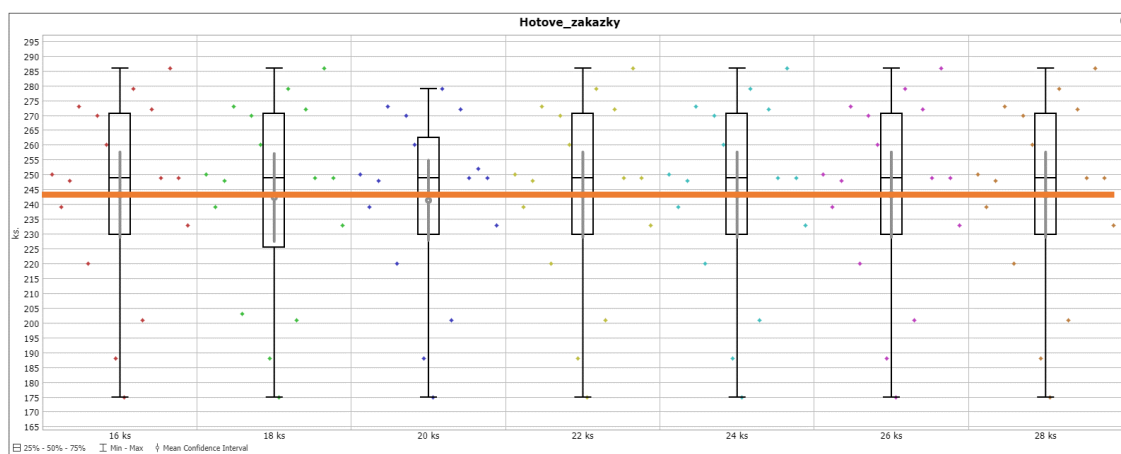
Zdroj: Vlastní

Důvodem „zvláštních“ hodnot v pravém sloupci je, že proměnná vario_source_2 nastavuje počet vozíčků na začátku výroby v obou parkovištích (2x28), a že již 8 vozíčků, při začátku simulace, čeká na pracovištích vylamování (1 pro každého operátora).

Po provedení experimentu v počtu 16 běhů simulace na každý scénář bylo třeba analyzovat výsledky. Ty tvořily 2 výstupy. Prvním byl počet vyrobených zakázek za dané období a druhým byl minimální počet vozíčků na parkovištích u pracovišť Vylamování.

12.2.2 Výsledek experimentu

Výsledkem experimentu bylo zjištění, že nastavení počtu vozíčků nijak neovlivnilo počet vyrobených kusů, který se v každém případě rovnal 242. To může být způsobeno delšími intervaly vstupů zakázek do výroby, kdy byl vozík na parkoviště doplněn dřív, než byl potřeba.



Graf 9: Počet vyrobených kusů pro jednotlivé scénáře experimentu 1

Zdroj: Vlastní

Ovšem další podmínkou bylo, že počet vozíčků na parkovištích nikdy nesmí klesnout na hodnotu 0. Zde již počet vozíčků měl vliv výrazný. Dle tabulky č.14 byla splněna až v scénáři, který používal 64 vozíčků. V tomto scénáři počet vozíčků v parkovištích nikdy neklesl pod hodnotu 1. To znamená, že pro výrobu tanků musí sloužit minimálně 64 vozíčků.

Tabulka 14: Minimální počty vozíčků v parkovištích dle jednotlivých scénářů

Scénáře	Průměrný min. počet	Minimální min. počet	Maximální min. počet
40 ks	2,3	0	8
44 ks	3,5	0	10
48 ks	5,3	0	12
52 ks	7,7	0	14
56 ks	9,6	0	16
60 ks	11,4	0	18
64 ks	13,4	1	20

Zdroj: Vlastní

12.3 Experiment 2 – navýšení intenzity vstupů

Hlavní ideou studie bylo nalezení možností, jak při normálním provozu vyrobit stejný počet olejových tanků, který se vyrobí při provozu s přesčasy. Vzhledem k vytížení pracovišť (nejsou plně vytížena) byl navržen scénář, při kterém se testovalo navýšení vstupů olejových tanků do výroby. To bude v budoucnu umožněno změnami pracovišť na začátku výrobního procesu. Cílem experimentu bylo zjistit, o kolik se bude intenzita muset navýšit, a jaký to bude mít dopad na proces výroby.

12.3.1 Nastavení experimentu

V rámci toho experimentu byly zvoleny 3 scénáře navýšení intenzity vstupů. První scénář zkrátil intervaly vstupů o 10 %, další o 20 % a poslední o 30 %. Pro každý scénář bylo provedeno celkem 32 simulačních běhů. Změna intenzity vstupů byla realizována změnou parametru „Arrival“. Princip této změny byl vysvětlen v předchozích kapitolách.

12.3.2 Výsledek experimentu

Experimentem se zjistilo, že nejbližší počet vyrobených kusů k provozu s přesčasy generuje scénář, kde dochází k navýšení vstupů o 30 %, tedy k výrobě 349 tanků. Tento fakt lze pozorovat v následující tabulce.

Tabulka 15: Počty vyrobených kusů dle jednotlivých scénáře experimentu

	Mean (90% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
100%	242.44 ± 9.26	30.86	175.00	305.00
S_přescasy	334.00 ± 12.04	40.13	261.00	422.00
110%	270.31 ± 9.92	33.06	202.00	338.00
120%	305.00 ± 10.50	35.00	227.00	368.00
130%	349.22 ± 11.06	36.88	267.00	419.00

Zdroj: Vlastní

V tabulce č.16 lze pozorovat další z hlavních dopadů na proces výroby. V případě navýšení intenzity na 130 % původní hodnoty dochází k velmi podobným výstupům, jako v případě provozu s přesčasy. Jediný ukazatel, který podstatněji vybočuje je čas na výrobu 1 zakázky (26,9 hod). Ten je větší o 28 % oproti původní hodnotě. To může být způsobeno vyšším vytížením jednotlivých pracovišť.

Tabulka 16: Výsledné chování systému experimentu 3

-	Bez přesčasů	S přesčasy	110%	120%	130%
Vyroběných tanků [ks.] (Interval spolehlivosti 90 %)	242,44	338,59	270,31	305,00	349,22
Hotové zakázky za den [ks.] (Interval spolehlivosti 90 %)	8,33	11,64	9,29	10,48	12,01
Čas na výrobu 1 zakázky [hod.] (Interval spolehlivosti 90 %)	20,89	14,46	21,93	23,56	26,9
Vzdálenost celkem [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	317,65	391,64	341,3	369,61	406,14
Vzdálenost logistiky [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	194,84	222,73	204,57	215,05	229,79
Počet vozíčků ve výrobě [ks]	64	64	86	86	86

Zdroj: Vlastní

Je na místě zmínit, že s vyšší intenzitou vstupů do výroby bylo třeba opět určit minimální počet vozíčků. Ten byl určen stejným postupem, který byl popsán v experimentu č.1. Výsledný minimální počet vozíčků po zvýšení intenzity vstupů o 30 % byl 86.

Vzhledem k výsledkům analýzy aktuálního stavu modelu má smysl sledovat pouze celkové vytížení výroby olejovými tanky. Celkové vytížení všemi výrobky má smysl sledovat pouze u vybraných pracovišť. Tabulka č.17 ukazuje vytížení právě těchto vybraných pracovišť pro scénář, kdy došlo k 30% navýšení intenzity vstupů do výroby. Nejprve však následuje graf, který zobrazuje celkové vytížení výroby pouze olejovými tanky.



Graf 10: Průměrné vytížení výroby vybraného scénáře a provozu s přesčasy

Zdroj: vlastní

Z grafu je patrné, že došlo k celkovému zvýšení vytížení pracovišť na 16,25 %, oproti původní hodnotě vytížení, která činila 11,25 %. To je již podstatný rozdíl, kvůli kterému je třeba prozkoumat vytížení jednotlivých pracovišť. To zobrazuje již zmíněná tabulka č.17, kde lze vyčíst, zda nebyla překročena maximální kapacita jednotlivých pracovišť.

Tabulka 17: Vytížení vybraných pracovišť pro vybraný scénář

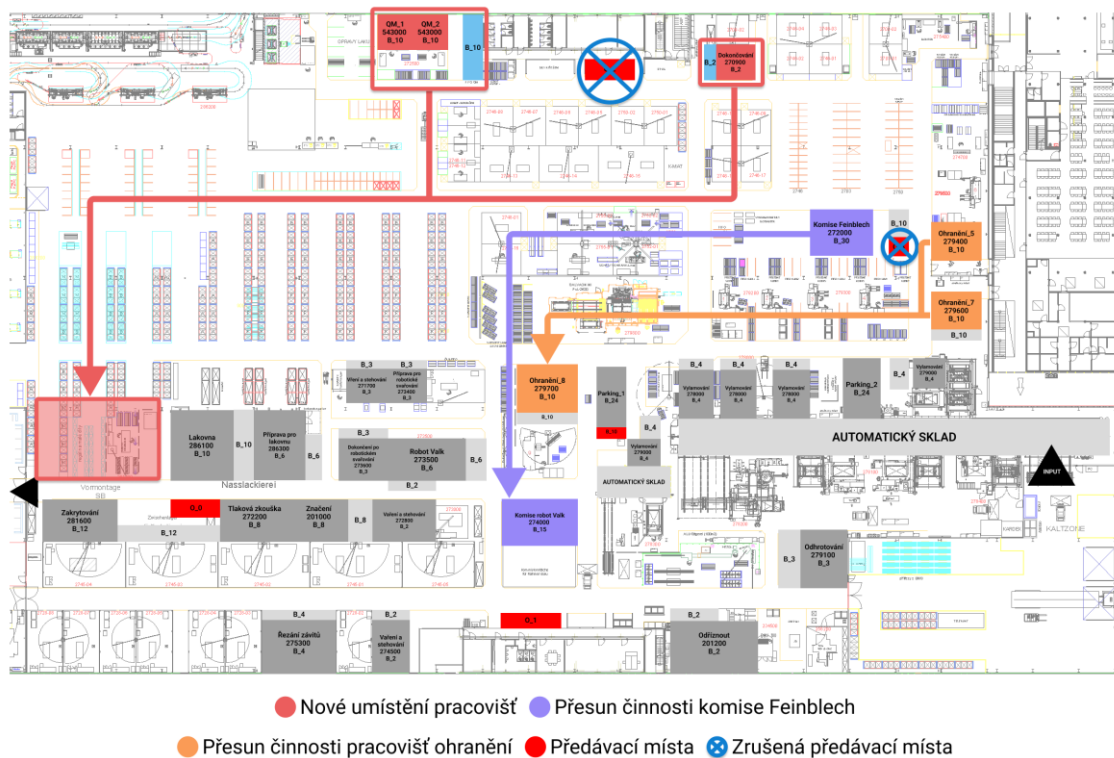
Číslo pracoviště	Jméno pracoviště	Kapacita za měsíc [min]	Vytížení tanky [%]	Vytížení ostatní [%]	Vytížení celkem [%]	Zbývá kapacita [%]	Změna vůči původnímu vytížení [%]
271700	Vaření a stehování	28 440	59,00%	2,88%	61,88%	18,12%	59,46%
272200	Tlaková zkouška	28 440	48,00%	12,04%	60,04%	19,96%	45,45%
273400	Příprava pro robota	28 440	78,00%	5,19%	83,19%	-3,19%	32,20%
273500	Robot Valk	28 440	34,00%	23,64%	57,64%	22,36%	41,67%
273600	Dokončení po robotu	28 440	40,00%	32,19%	72,19%	7,81%	42,86%
275300	Řezání závitů	28 440	6,00%	63,60%	69,60%	10,40%	50,00%
278000	Vylamování	170 640	2,00%	56,04%	58,04%	21,96%	0,00%
279000	Vylamování	56 880	3,00%	69,83%	72,83%	7,17%	50,00%
279100	Odhrotování	28 440	0,00%	74,10%	74,10%	5,90%	0,00%
279600	Ohranění_7	28 440	3,00%	73,21%	76,21%	3,79%	50,00%
279700	Ohranění_8	28 440	26,00%	44,87%	70,87%	9,13%	44,44%
286100	Lakování	28 440	27,00%	44,25%	71,25%	8,75%	42,11%
286300	Příprava pro lakovnu	28 440	58,00%	16,17%	74,17%	5,83%	45,00%
Celkem		796 320	20,89%	45,68%	66,58%	13,42%	41,76%

Zdroj: Vlastní

V tabulce je již na první pohled vidět, že možnou kapacitu překročilo pouze pracoviště přípravy pro robota, které bylo přetíženo o 3,19 %. Je na místě zmínit, že u 3 pracovišť – odhrotování, ohranění_7 a příprava pro lakovnu, tvoří zbývající kapacitu hodnoty pouze do 6 %. V rámci těchto pracovišť může také v některých případech (scénářích) dojít k přetížení. Ostatním pracovištím zbyla ještě dostatečná kapacitní rezerva (cca 8 a více procent), což lze vnímat pozitivně, vzhledem k tomu, že celkové vytížení vybraných pracovišť vzrostlo o 41,76 %. Mezi pracovišti nevznikla žádná nová potenciální úzká místa, která by jimi nebyla již v původním stavu systému.

12.4 Experiment 3 – změna layoutu a materiálového toku

V rámci realizace tohoto experimentu došlo k přesunu 3 pracovišť z horní části haly do spodní. Dále vzhledem k vytíženosti jednotlivých pracovišť byla z procesu výroby vyřazena 2 pracoviště a jejich činnost byla přidělena pracovištím jiným. V rámci přesunu byla zrušena i dvě předávací místa pro logistiku a byl pozměněn postup řízení materiálového toku v rámci softwaru Flexsim. Tento postup nejlépe vystihuje následující obrázek.



Obrázek 33: Způsob změny layoutu a materiálového toku

Zdroj: vlastní

12.4.1 Nastavení experimentu

V rámci nastavení experimentu neproběhlo žádné nastavení parametrů. Parametry modelu zůstávají tak, jak byly v původním stavu. Experiment je definován pouze změnami layoutu a procesu, které se provedli výše zmíněnou úpravou modelu. Experiment byl nastaven na 32 běhů.

12.4.2 Výsledek experimentu

Výsledný průběh simulace se nejvíce projevila na celkové překonané vzdálenosti za dané období. V případě pracovníků logistiky se nacestovalo 119,9 km, což činí rozdíl 38,46 % oproti stávajícímu stavu výroby. Jinými slovy logistika „prochodila“ o 74,94 km méně než před layoutovými změnami. Z tabulky lze však dopočítat, že operátoři výroby (vyjma logistiky) nachodí samostatně o 1,5 % více než v aktuálním stavu. Vznik tohoto jevu je vysvětlen v následujícím odstavci.

Tabulka 18: Výsledky experimentu 4 – změna layoutu a materiálového toku

-	Aktuální stav	Experiment	Rozdíl
Vyrobených tanků [ks] (Interval spolehlivosti 90 %)	242,44	240,00	-1,01 %
Hotové zakázky za den [ks] (Interval spolehlivosti 90 %)	8,33	8,27	-0,72 %
Čas na výrobu 1 zakázky [hod] (Interval spolehlivosti 90 %)	20,89	19,93	-4,60 %
Vzdálenost celkem [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	317,65	243,84	-23,24 %
Vzdálenost logistiky [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	194,84	119,9	-38,46 %
Počet vozíků ve výrobě [ks]	64	64	0,00 %

Zdroj: Vlastní

Úspora celkové vzdálenosti činí 73,81 km oproti původnímu stavu ($317,65 - 243,84 = 73,81$). To je o 1,13 km méně, než kolik ušetří logistika. Tato hodnota tvoří právě zmiňovaný přírůstek 1,5 % nachozené vzdálenosti operátory. To je způsobeno zrušením dvou předávacích míst, kde musejí práci logistiků zastoupit operátoři. Ovšem vzhledem k přesunu vzdálených pracovišť je tato hodnota oproti uspořené vzdálenosti logistiky téměř zanedbatelná.

12.5 Experiment 4 – kombinace všech scénářů

Poslední experiment vznikl sloučením všech již realizovaných experimentů. Jeho účelem je ukázat, jak se bude výsledný model chovat po zavedení všech změn vůči původnímu stavu. Každá změna totiž způsobila pozitivní, ale i negativní reakce v chování systému. Tento experiment by měl zodpovědět, zda nedojde ke kumulaci těch negativních, či zda systém dospěje do vyššího stupně optimalizace.

12.5.1 Nastavení experimentu

Jak již bylo zmíněno, jedná se o kombinaci výše realizovaných experimentů. Proto musí být změněno hned několik proměnných vůči původnímu systému. V rámci experimentu tedy bylo použito optimální množství vozíků – 64 ks. Dále byla navýšena intenzita vstupů do výroby o 30 %. Dále byl model upraven podle výše uvedených layoutových změn. Samozřejmě byl upraven i tok materiálu. Nastavení shrnuje následující tabulka.

Tabulka 19: Nastavení experimentu č.4

-	Aktuální stav	Finální stav
Intenzita vstupů	100%	130%
Layout	Původní	Změněný
Materiálový tok	Původní	Změněný
Počet vozíků	100	86

Zdroj: Vlastní

12.5.2 Výsledky experimentu

V rámci této kapitoly budou analyzovány výsledky experimentu č.4, který byl vytvořen kombinací experimentů předchozích. Experiment č.4 by měl představovat nejvyšší stupeň optimalizace ze všech experimentů vůči aktuálnímu systému. Proto bude s aktuálním systémem podrobně porovnán, aby se odhalily všechny výhody, ale i nevýhody kombinace potenciálních optimalizačních opatření. Z toho důvodu byla analýze výsledků tohoto experimentu věnována samostatná kapitola.

Prvními ukazateli, na které se bude analýza zaměřovat budou již používané hlavní ukazatele výkonnosti systému. Jejich hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce.

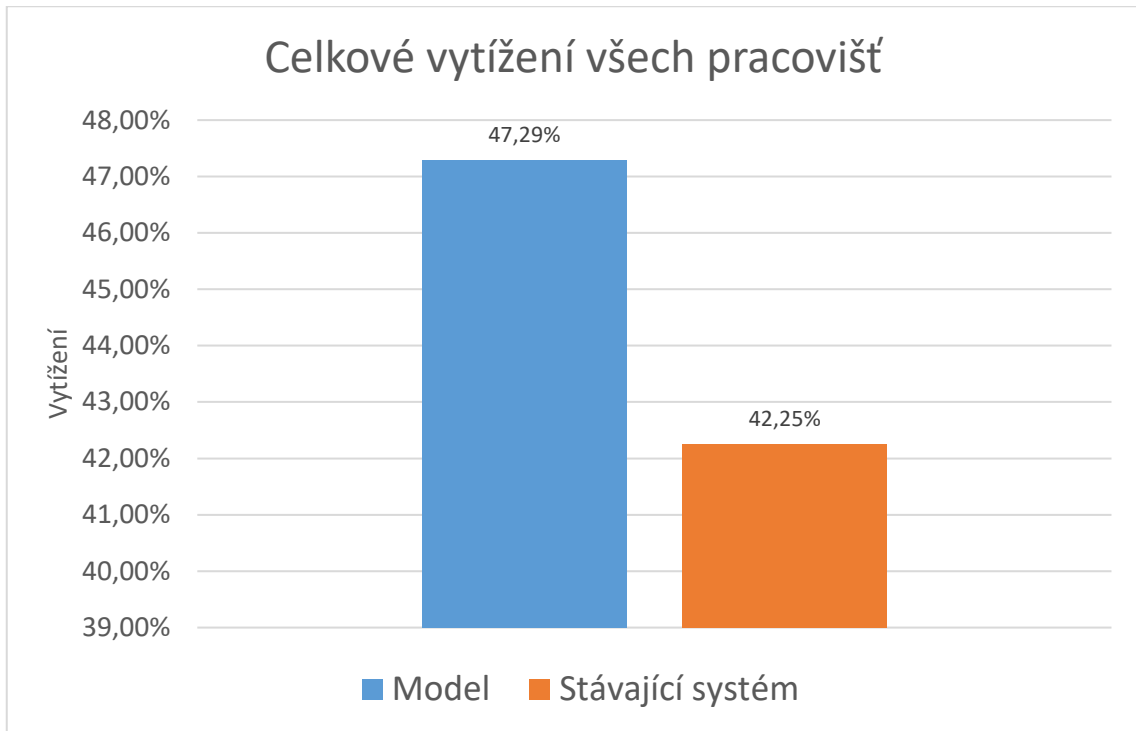
Tabulka 20: Srovnání hlavních ukazatelů výkonnosti výroby experimentu č.4

-	Aktuální stav	Finální stav	Rozdíl
Vyrobených tanků [ks.] (Interval spolehlivosti 90 %)	242,0	349,0	44,2 %
Hotové zakázky za den [ks.] (Interval spolehlivosti 90 %)	8,3	12,0	44,6 %
Čas na výrobu 1 zakázky [hod.] (Interval spolehlivosti 90 %)	20,9	26,2	25,4 %
Vzdálenost celkem [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	317,7	332,0	4,5 %
Vzdálenost logistiky [km] (Interval spolehlivosti 90 %)	194,8	153,0	-21,5 %
Počet vozíčků ve výrobě [ks]	100,0	86,00	-14,0 %

Zdroj: Vlastní

Již na první pohled je vidět, že se upravený model chová značně odlišně. Hlavně díky zvýšené intenzitě vstupů bylo za měsíc vyrobeno průměrně 349 olejových tanků. To je o 44,2 % víc, než dokáže systém vyrobit při stávajícím nastavení (za normálního provozu). Dále se systém dostal do stavu, kdy dokáže vyrobit 12 olejových tanků za den. To činí 44,6% změnu oproti původnímu nastavení, kdy se vyrábělo „pouze“ 8,3 tanků denně. Ovšem vyšší počet zakázek v oběhu zapříčiňuje zvýšení času na výrobu jedné zakázky z 20,9 hodin na 26,2. Tento 25,4% posun lze přičíst ke zvýšení vytížení pracovišť, kde mohou vznikat větší fronty. I přesto, že došlo k navýšení počtu vyrobených kusů o 44,2 %, činilo navýšení nachozených kilometrů pracovníky pouze 14,3 km (4,5 %). Vzhledem k tomu, že pracovníci logistiky procestují o 21,5 % km méně, musí tyto kilometry navíc procestovat operátoři výroby. Celkem nacestují o 56,1 km víc. Původně nastavený počet vozíčků se změnil o 36 %. Lze tedy ušetřit 36 vozíčků.

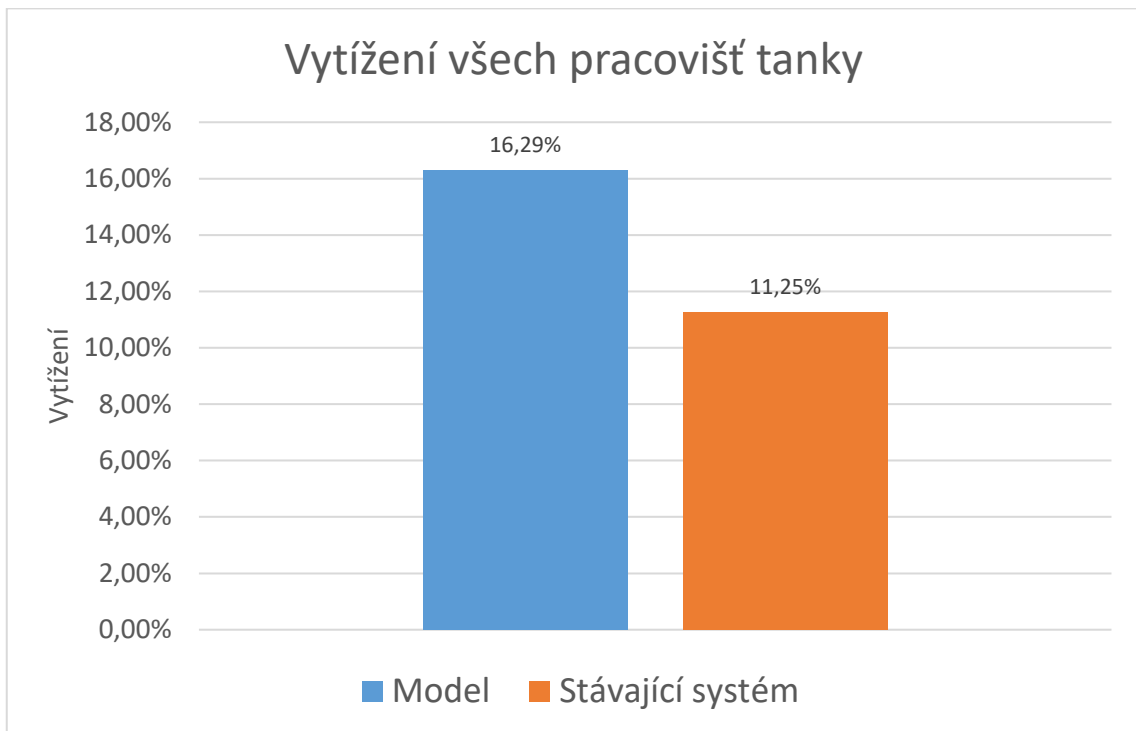
Dalším z ukazatelů je ukazatel vytížení výroby (tanky + ostatní výrobky). Celkové vytížení pracovišť shrnuje graf č.11. V grafu lze pozorovat, že se celkové vytížení pracovišť změnilo z 42,25 % na 47,29 %. To značí změnu o 11,92 %.



Graf 11: Celkové vytížení všech pracovišť v experimentu č.4

Zdroj: Vlastní

Vzhledem k tomu, že se simulační studie věnovala výrobě olejových tanků, může být zajímavější graf č.12, který zobrazuje změnu vytížení pracovišť pouze v rámci výroby tanků. Z grafu je patrné, že došlo k změně o 5,04% bodů, z 11,25 % na 16,29 %. Celkovou změnu lze vyjádřit jako nárůst vytížení pracovišť olejovými tanky o 44,76 %.



Graf 12: Vytížení všech pracovišť výrobou olejových tanků

Zdroj: Vlastní

Ovšem je třeba si uvědomit, že experiment některá pracoviště z procesu výroby olejových tanků kompletně vyřadil. Dále je třeba vzít v úvahu, že u některých pracovišť dochází k minimálnímu vytížení tanky či nedostupnosti dat o jejich vytížení ostatními výrobky. Tento fakt může výsledné ukazatele vytížení všech pracovišť zkreslovat směrem k nižším hodnotám. Na následující tabulce je vidět, u kterých pracovišť k tomu dochází. Zároveň je, vzhledem k růstu vytížení výroby, nutné zjistit, zda u některých pracovišť nedochází k přetížení jejich kapacity.

Tabulka 21: Shrnutí změn vytížení všech pracovišť v rámci experimentu č.4

Číslo pracoviště	Jméno pracoviště	Kapacita za měsíc [min]	Vytížení tanky [%]	Vytížení ostatní [%]	Vytížení celkem [%]	Zbývá kapacita [%]	Změna vůči původnímu vytížení tanky [%]	Změna vůči původnímu celkovému vytížení [%]
201000	Značení	28 440	10,00%	-	10,00%	70,00%		66,67%
201200	Odříznout	28 440	1,00%	-	1,00%	79,00%	-	-
270900	Dokončování	28 440	0,00%	-	0,00%	80,00%	-	-
271700	Vaření a stehování	28 440	60,00%	2,88%	62,88%	17,12%		62,16%
272200	Tlaková zkouška	28 440	48,00%	12,04%	60,04%	19,96%		45,45%
272800	Vaření a stehování	28 440	19,00%	-	19,00%	61,00%		58,33%
273400	Příprava pro robota	28 440	78,00%	5,19%	83,19%	-3,19%		32,20%
273500	Robot Valk	28 440	34,00%	23,64%	57,64%	22,36%		41,67%
273600	Dokončení po robotu	28 440	40,00%	32,19%	72,19%	7,81%		42,86%
274500	Vaření a stehování	28 440	14,00%	-	14,00%	66,00%		55,56%
275300	Řezání závitů	28 440	6,00%	63,60%	69,60%	10,40%		50,00%
278000	Vylamování	170 640	2,00%	56,04%	58,04%	21,96%	-	-
279000	Vylamování	56 880	3,00%	69,83%	72,83%	7,17%		50,00%
279100	Odhrotování	28 440	0,00%	74,10%	74,10%	5,90%	-	0,00%
279400	Ohranění_5	28 440	0,00%	-	0,00%	80,00%		-100,00%
279600	Ohranění_7	28 440	0,00%	73,21%	73,21%	6,79%		-100,00%
279700	Ohranění_8	28 440	30,00%	44,87%	74,87%	5,13%		66,67%
281600	Zakrytování	28 440	11,00%	-	11,00%	69,00%		37,50%
286100	Lakování	28 440	27,00%	44,25%	71,25%	8,75%		42,11%
286300	Příprava pro lakovnu	28 440	58,00%	16,17%	74,17%	5,83%		45,00%
543000	QM	56 880	1,00%	-	1,00%	79,00%	-	-
Celkem		796 320	16,29%	31,00%	47,29%	32,71%		44,76%

Zdroj: Vlastní

Z tabulky je patrné, že u pracoviště č.273400 dochází k přetížení kapacity o 3,19 %. Celkem u 3 pracovišť – odhrotování, ohranění_8 a příprava pro lakovnu, tvoří zbývající kapacitu hodnoty pouze do 6 %. V rámci těchto pracovišť může v některých případech (scénářích) dojít k přetížení. Ostatním pracovištím zbyla ještě dostatečná kapacitní rezerva (cca 8 a více procent), což lze vnímat pozitivně, vzhledem k tomu, že celkové vytížení vybraných pracovišť vzrostlo o 41,76 %. Dále je možné vidět, pro jaká pracoviště chybí data, nebo jaká pracoviště jsou minimálně vytížena (Hodnoty blízké k 0 % jsou zaokrouhleny na 0 %). Jedná se o více jak 8 pracovišť. Všechna tato pracoviště svým způsobem zkreslují výsledné hodnoty. Z toho důvodu budou vyloučena z následující analýzy, kde budou shrnuty změny vytížení pouze u vybraných pracovišť.

Vytížení jednotlivých vybraných pracovišť shrnuje následující tabulka. Celková zbývající (rezervní) kapacita vybraných pracovišť činí 9,87 %, což znamená, že pracoviště jsou průměrně vytěžována na 70,13 %. Změna vůči původnímu celkovému vytížení pracovišť je 18 %. K největší změně celkového vytížení došlo u pracoviště č.271700, ovšem k největší změně vytížení tanky došlo u pracoviště č.279700, což je způsobeno přesunem činnosti ostatních ohranovacích pracovišť na toto pracoviště (změna toku materiálu).

Tabulka 22: Vytížení vybraných pracovišť experimentu č.4

Číslo pracoviště	Jméno pracoviště	Kapacita za měsíc [min]	Vytížení tanky [%]	Vytížení ostatní [%]	Vytížení celkem [%]	Zbýlá kapacita [%]	Změna vůči původnímu vytížení tanky [%]	Změna vůči původnímu celkovému vytížení [%]
271700	Vaření a stehování	28 440	60,00%	2,88%	62,88%	17,12%	62,16%	57,68%
272200	Tlaková zkouška	28 440	48,00%	12,04%	60,04%	19,96%	45,45%	33,30%
273400	Příprava pro robota	28 440	78,00%	5,19%	83,19%	-3,19%	32,20%	29,60%
273500	Robot Valk	28 440	34,00%	23,64%	57,64%	22,36%	41,67%	20,99%
273600	Dokončení po robotu	28 440	40,00%	32,19%	72,19%	7,81%	42,86%	19,94%
275300	Řezání závitů	28 440	6,00%	63,60%	69,60%	10,40%	50,00%	2,96%
279000	Vylamování	56 880	3,00%	69,83%	72,83%	7,17%	50,00%	1,39%
279700	Ohranění_8	28 440	30,00%	44,87%	74,87%	5,13%	66,67%	19,09%
286100	Lakování	28 440	27,00%	44,25%	71,25%	8,75%	42,11%	12,65%
286300	Příprava pro lakovnu	28 440	58,00%	16,17%	74,17%	5,83%	45,00%	32,05%
Celkem		312 840	35,18%	34,95%	70,13%	9,87%	45,49%	18,60%

Zdroj: Vlastní

Z tabulky je patrné, že u vybraných pracovišť došlo k výraznému růstu v rámci jejich celkového vytížení. Celkové vytížení vzrostlo z hodnoty 59 % o 18,6 %. Výsledné vytížení je rovno 70,13 %. Dále lze pozorovat změnu vytížení výroby olejových tanků. Finální stav modelu zajišťuje 35,18% vytížení vybraných pracovišť, což tvoří 45,49% změnu vůči stávajícímu systému.

Kapacita front práce

Vzhledem k zvýšení vytížení výroby lze předpokládat, že dojde k změně obsahu front před každým pracovištěm. Tyto změny shrnuje následující tabulka, kde jsou pro potřeby porovnání maximální hodnoty počtu vozíčků ve frontách, které nepřekročilo víc jak 75 % simulovaných scénářů.

Tabulka 23: Analýza obsahu front práce v rámci experimentu č.4

Číslo pracoviště	Jméno pracoviště	Kapacita	Finální_75%	Stávající_75%	Finální rozdíl v kapacitě	Rozdíl finální vs stávající stav
201200	Odříznout	2	1	1	1	0
270900	Dokončování	2	1	1	1	0
271700	Vaření a stehování	3	11	7	-8	4
273400	Příprava pro robota	3	11	8	-8	3
273500	Robot Valk	6	3	3	3	0
273600	Dokončení po robotu	3	3	3	0	0
274500	Vaření a stehování	2	1	1	1	0
275300	Řezání závitů	4	3	3	1	0
279100	Odhrotování	3	1	1	2	0
279700	Ohranění_8	8	13	9	-5	4
281600	Zakrytování	12	2	1	10	1
286100	Lakování	10	2	2	8	0
286300	Příprava pro lakovnu	6	20	15	-14	5

Zdroj: Vlastní

V tabulce si lze povšimnout, že pracoviště s nedostatečnou kapacitou již v aktuálním stavu jsou v rámci experimentu ještě více přeplněna. Mezi ně patří hlavně pracoviště 271700 a 273400, kde chybí počet míst pro 8 vozíků. Následuje pracoviště č.279700, které po převzetí úkolů vyřazených pracovišť a zvýšení intenzity vstupů objednávek do systému potřebuje kapacitu o aspoň 5 vozíků vyšší. Poslední, nejmíce přetíženou frontou je fronta práce pracoviště 286300, které je nejmíce přeplněné i v aktuálním stavu. V této frontě je potřeba aspoň dalších 14 míst na vozíky.

V analýze posledního experimentu bylo sesbíráno dostatečné množství dat, z kterých se dá čerpat při tvorbě závěrečných doporučení, které tvoří nedílnou součást většiny simulačních studií.

13 Návrhy a doporučení

Následující návrhy a doporučení vznikly za účelem optimalizace výrobního procesu olejových tanků společnosti ENGEL strojírenská spol. s.r.o. Cílem optimalizace bylo, aby byl systém schopný vyrobit takové množství výrobků, v provozu bez přesčasů, jako vyrobí v provozu s přesčasy. Obsah jejich sdělení vychází z provedených experimentů. Převážně pak ze závěrečného experimentu, který zkoumal kombinaci všech předtím jednotlivě simulovaných scénářů. Jejich sdělení jsou podložena simulačním modelem, který byl úspěšně validován ve spolupráci s experty na reálný systém.

13.1 Zvýšení intenzity vstupů

Experimentem č.2 bylo zjištěno, že měsíční počet vyrobených tanků není limitován kapacitou pracovišť. Tím, že žádné z pracovišť nebylo vytíženo na avizovanou maximální kapacitu – 80 %, není možné zvýšit počet vyrobených kusů jejich optimalizací. To znamená, že výrobu nebrzdí žádné úzké místo v rámci simulovaných pracovišť. Z toho důvodu je nutné zvýšit intenzitu vstupů nových zakázek do výroby.

Tuto činnost zajišťuje automatický sklad na začátku procesu spolu s pracovišti laserů. Toto pracoviště nebylo předmětem simulační studie, ale vzhledem k výsledkům se dá

předpokládat, že právě automatický sklad je oním úzkým místem. Dle sdělení zadavatele studie již existují plány k navýšení jeho kapacity. Vzhledem k výsledkům experimentu by výsledná intenzita vstupů měla být aspoň o 30 % vyšší, než je intenzita stávající. Experiment totiž ukázal, že pouze v případě navýšení této intenzity dojde k vyrobení 349 kusů olejových tanků za měsíc za normálního provozu. Tento počet odpovídá cca počtu vyrobených kusů v provozu s přesčasy. Doporučuji ověřit o kolik procent je třeba navýšit kapacitu vychystávání automatického skladu, aby bylo možné zvýšit intenzitu vstupů o 30 %.

13.2 Přesun vybraných pracovišť a změna toku materiálu

Pokud dojde k přesunu pracoviště č.543000 a pracoviště č.270900 do vybrané oblasti, a zároveň dojde k delegaci pracovní činnosti pracovišť č.272000, č.279400 a č.279600 na pracoviště č.274000 a č.279700, procestují pracovníci logistiky o 74,94 km měsíčně méně než v případě aktuálního stavu výroby. To je úspora 38,46 % z celkové původní procestované vzdálenosti.

Tato změna způsobí, že operátoři výroby budou muset nachodit o 1,13 km měsíčně více. Vzhledem k tomu, že se jedná o vzdálenost, kterou operátoři nachodí společně, tak je hodnota zanedbatelná. Na tomto základě lze navrhouvanou změnu systému doporučit.

Ovšem je třeba vzít na vědomí, že se jedná pouze o ukazatele v rámci výroby olejových tanků, je otázkou, zda by tato změna nepoškodila výrobu ostatních produktů.

Dále dojde k uvolnění kapacity pro ostatní výrobky na pracovištích, jejichž činnost byla nově delegována na pracoviště jiná. Pracoviště přebírající jejich činnost disponují dostatečnou kapacitou. Scénář tak může mít další pozitivní dopad na výrobu. Proto jej lze na tomto základě dále doporučit k realizaci.

V případě kombinace s doporučením k navýšení intenzity vstupů do výroby dochází k podobnému efektu. Procestovaná vzdálenost pracovníky je sice vyšší – 332 km než v případě nižší vstupní intenzity – 317 km, ale bez změny layoutu výroby by pracovníci,

v případě „pouhé“ navýšení intenzity, procestovali celkem 406,14 km. Po změně layoutu a nacestují o 22,33 % méně.

13.3 Úprava pracoviště č.273400

V případě realizace výše uvedených doporučení dojde k zvýšení celkového vytížení pracovišť. Vzhledem k tomu, že maximální efektivní vytížení pracovišť je 80 % (dle zadavatele studie), dojde u pracoviště č.273400 k přetížení v hodnotě 3,19 %. Tím by zde vzniklo úzké místo, které by mohlo blokovat proces výroby. Z toho důvodu by mělo dojít k navýšení jeho výrobní kapacity. Dle diskusí se zadavatelem studie činnost pracoviště č.273400 značně odpovídá činnosti pracoviště č.271700. Je tedy možné místo optimalizování přetíženého pracoviště přistoupit k systému přerozdělování práce mezi těmito pracovišti. Pracovišti č.271700 totiž po zvýšení intenzity vstupů olejových tanků do výroby zbývá ještě 17,12 % volné kapacity. Doporučuji před zavedením změn blíže prozkoumat kapacitní možnosti tohoto pracoviště.

13.4 Potenciální úzká místa

Vzhledem k předchozímu doporučení je nutné zmínit, že ačkoliv u dalších pracovišť po zavedení změn nedošlo k jejich přetížení, tak se několik pracovišť tomuto stavu přiblížilo. Jedná se hlavně o pracoviště č.279700, kterému zbývá 5,13 % celkové kapacity. Pracovišti č.286300 zbývá 5,83 % z celkové kapacity. Ještě lze zmínit pracoviště č.279100, kde zbývající kapacitu tvoří 5,9 %. Ovšem u tohoto pracoviště dochází k vytížení převážně ostatní výrobou. Jeho vytížení tanky se blíží k 0 %, tím pádem tento stav nebyl důsledkem úprav systému, ale nastává již v stavu aktuálním. K uvolnění kapacit došlo u pracoviště č.279600, které získalo 2,66 % kapacity navíc.

Tyto pracoviště jsou zmíněny hlavně z důvodu povahy simulace. Výsledky jejich vytížení, a tedy i zbylých kapacit totiž tvoří průměrné hodnoty ze všech běhů simulace. V případě, že bychom sledovali jednotlivé scénáře, kde docházelo k maximálnímu vytížení, tak by u těchto pracovišť došlo k vyčerpání jejich kapacity, stejně tak jako u pracoviště č.273400. To by ostatně v extrémním případě mohlo být přetíženo ještě víc než v případě výše

avizovaného průměrného vytížení. Vzhledem k rozsahu studie nebyly hodnoty těchto maxim sledovány, ale je třeba s tímto scénářem počítat. Doporučuji před případným zaváděním změn tyto scénáře ověřit.

13.5 Určení počtu vozíků

Dle zadavatele studie je v stávajícím stavu pro výrobu tanků používáno 100 přepravních vozíků. Díky výsledkům simulace došlo k zjištění, že by v aktuálním stavu systému mělo stačit o 36 vozíků méně, tedy 64 vozíků. Jeden vozík zabírá plochu 0,96 m². Vzhledem k úsporám v rámci výrobní plochy doporučuji tento rozdíl - 36 vozíků z výroby vyřadit, či přesunout k jinému využití. Tím by teoreticky došlo k uvolnění 34,5 m² plochy. Ta by se mohla využít k navýšení maximálních kapacit front práce (místa pro parkování vozíků).

V případě zavedení změn ve výrobě v rámci navýšení intenzity vstupů a layoutu byl určen nový minimální počet vozíků. Tento počet nabýval hodnoty 86 vozíků určených k výrobě tanků. To by stále znamenalo úsporu 14 vozíků (13,44 m²). V takovém případě lze omezení počtu vozíků určených pro výrobu olejových tanků stále doporučit.

13.6 Úprava kapacity front práce

V rámci simulační studie byly zkoumány i kapacitní možnosti front práce před jednotlivými pracovišti (pouze v rámci výroby olejových tanků). Došlo k zjištění, že některé fronty nemají dostatečnou kapacitu na množství vozíků, které by měly pojmout. Z důvodů omezení extrémních případů byly použity hodnoty měření dle vyššího percentilu. Ten říká, že změřené maximální hodnoty nepřesáhlo 75 % simulačních scénářů. Dle těchto hodnot dochází k převýšení kapacity front v aktuálním stavu u pracovišť č.271700 (-4), č.273400 (-5), č.279700 (-1), č.286300 (-9).

Tyto nedostatky v kapacitě se ještě výrazněji projeví v případě navýšení intenzity vstupů a změny layoutu. V takovém případě dojde k převýšení kapacity u pracoviště č.271700 a č.273400 o 8 vozíků, u č.279700 o 5 a v případě pracoviště č.286300 o 14.

Na tomto základě doporučuji v aktuálním stavu, pokud to situace umožňuje, pozměnit rozdělení ploch určených pro fronty práce u výše zmíněných pracovišť. Např. fronta u pracoviště č.218600 disponuje značně vyšší kapacitou (+10), než je dle simulace využívána. Tu by bylo možné zmenšit a zbylou kapacitu přidělit pracovišti č.286300, které je dle layoutu výroby hned přes uličku.

13.7 Zvýšení průběžné doby výroby

V poslední řadě je nutné zmínit zjištění, že v případě realizace experimentu č.4 dojde k zvýšení průběžné doby výroby na 26,2 hod. To je o 25,4 % víc, než v aktuálním stavu systému (20,9 hodin). Na tomto základě lze očekávat, že dojde k pozdějšímu odesílání objednávek zákazníkům. Vzhledem k tomu doporučuji využití metod štíhlé výroby, které potenciálně mohou růst průměrné doby výroby snížit.

Závěr

Práce se zaměřovala na provozní a výrobní management z hlediska procesů, které řídí. Zejména pak z hlediska zajištění efektivity těchto procesů, a to s pomocí simulace. Prvním cílem práce bylo představit princip simulace jak zaměstnancům spol. ENGEL strojírenská s.r.o., tak i čtenáři. Tyto principy byly představeny na konkrétním problému podniku – procesu výroby olejových tanků, který se měl simulovat, analyzovat a optimalizovat. Za tímto účelem byl vytvořen simulační model v softwaru Flexsim, s jehož pomocí se dále provedly vybrané optimalizační experimenty. Cílem experimentů bylo zjistit, jak vyrobit aspoň 341 tanků měsíčně za normálního provozu. Tento počet tanků je podnik v současnosti schopný vyrobit pouze za využití přesčasů. Dále se měl zkoumat počet vozíků užitých pro výrobu olejových tanků a určit jejich optimální počet. Cílem předposledního experimentu bylo zjistit důsledky layoutových změn ve výrobě. V posledním experimentu byla zkoumána kombinace všech uvedených scénářů. Na základě výsledků těchto experimentů a analýzy stávajícího stavu vznikly následující závěry.

Stávající systém bez užití přesčasů dokáže vyrobit 242 ks. olejových tanků měsíčně. Tento počet lze navýšit o 44,2 % na celkem 349 ks. Předpokladem je navýšení intenzity vstupů zakázek do výroby o 30 %, ta je momentálně jediným limitem tohoto počtu. V stávajícím stavu není dosaženo maximálního vytížení u žádného ze zkoumaných pracovišť. Ovšem v případě navýšení této intenzity dojde k přetížení pracoviště č.273400 o 3,19 % kapacity. V ojedinělých případech pak může dojít k přetížení pracovišť č.279700, č.286300 a č.279100 v řádu jednotek % kapacity. Navýšením intenzity vstupů se zvýší celkové vytížení výroby o 11,92 % na hodnotu 47,29 %. Vytížení výroby olejovými tanky vzroste o 44,76 %. Olejové tanky tedy budou zabírat celkem 16,29 % z celkové kapacity výroby.

Dále byla zkoumána kapacita mezikladů v rámci výroby olejových tanků. Bylo zjištěno, že fronta pracoviště č.271700 má nedostatečnou kapacitu v počtu 4 vozíků, dále u pracoviště č.273400 chybí místo na 5 vozíků. Pracoviště č.279700 nezvládá pojmout 1 vozík a v poslední řadě pracoviště č.286300 má nedostatek místa pro 9 vozíků. Kapacity

těchto pracovišť budou ještě více vyčerpány v případě navýšení intenzity vstupů zakázek do výroby. V této souvislosti je důležité zaměřit se na organizaci výrobní plochy, aby byly zachovány transportní koridory.

Dalším experimentem bylo zjištěno, že v případě optimalizace umístění některých pracovišť blíže hlavnímu materiálovému toku dojde k snížení celkové měsíční vzdálenosti, kterou musí urazit pracovníci logistiky. V případě aktuálního provozu se jedná o úsporu 38,46 % uražené vzdálenosti, to lze vyjádřit 74,94 km. Tato změna ovlivní ostatní operátory výroby tak, že budou muset procestovat o 1,13 km více. V případě navýšení intenzity vstupů bude úspora uražené vzdálenosti logistiky rovna 76,94 km a celková uražená vzdálenost všemi pracovníky dohromady byla menší o 23,34 %.

Mezi závěry pak patří zjištění, že v rámci výroby olejových tanků lze ušetřit 34,5 m² výrobní plochy. Toho lze dosáhnout optimalizací počtu vozíčků v podobě snížení jejich počtu o 36 ks. z původního počtu 100 vozíků. 64 ks. vozíků je pro potřeby výroby olejových tanků dostačujících. V případě zvýšení intenzity vstupů zakázek lze vyřadit 14 vozíků.

Posledním zjištěním bylo to, že spolu s větším vyrobeným počtem kusů vzroste průměrná doba výroby. Čas na výrobu jedné zakázky vzroste o 25,4 % z 20,9 hodin na hodnotu 26,2 hodin. Tato skutečnost je dána primárně delším čekáním zakázek ve frontě a je třeba s ní počítat v rámci plánování výroby.

S využitím vytvořeného simulačního modelu by bylo možné realizovat i další experimenty. Ty však nebylo možné, z hlediska již tak velké náročnosti, do diplomové práce zahrnout. Simulační model je, vzhledem k jeho flexibilitě, možné rozšiřovat i o další výrobní program společnosti.

Seznam zdrojů a použité literatury

1. **KRAJEWSKI, Lee, Naresh MALHOTRA a Larry RITZMA.** *Operations Management: Processes and Supply Chains.* Ohio : Pearson Education, Limited, 2018. ISBN 978-1-292-25993-2.
2. **LAGUNA, Manuel a Johan MARKLUND.** *Business Process Modeling, Simulation and Design.* Boca Raton : CRC Press LLC, 2018. ISBN 978-1-138-06173-6.
3. **RAO, R. Venkata.** *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes.* London : Springer, 2011. ISBN 978-0-85729-015-1.
4. **HEILALA, Juhani.** Use of simulation in manufacturing and logistics systems planning. *AS Juhani Heilala.* 1999, 116140.
5. **KAVAN, Michal.** *výrobní a provozní management.* Praha : Grada, 2002. ISBN: 80-247-0199-5.
6. **GUNAL, M. Murat.** *Simulation for Industry 4.0 - Past, Present, and Future.* Cham : Springer, 2019. ISBN 978-3-030-04137-3.
7. **DAHL, Ole-Johan a Kristen NIGAARD.** *SIMULA: A language for programming and description of discrete event systems.* Oslo : Norsk Regnesentral, 1965.
8. **SHANNON, Robert a James D. JOHANNES.** Systems Simulation: The Art and Science. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.* 1976, doi: 10.1109/TSMC.1976.4309432.
9. **BANKS, Jerry.** *Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice.* Atlanta : John Wiley & Sons, 1998. ISBN 978-0-471-13403-9.
10. **LAW, Averill M.** *Simulation Modeling and Analysis, Fifth edition.* New York : McGraw - Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-340132-4.
11. **BANKS, Jerry, John S. CARSON a Barry L. NELSON.** *Discrete-event system simulation. 5th Edition.* Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0136062127.
12. *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems.* **AZEVEDO, Américo.** Cham : Springer, 2013. ISBN 978-3-319-00557-7.
13. **BANKS, Jerry a Randall GIBSON.** Don't simulate when... 10 Rules for determining when simulation is not appropriate. *Industrial engineering : IE ; the magazine for systems Integrators.* 29, 1997, Sv. 9, ISSN 0019-8234.
14. **SHARMA, Prateek.** Discrete-Event Simulation. *International Journal of Scientific & Technology Research.* 4, 2015, Sv. 4, ISSN 2277-8616.
15. **PEGDEN, Dennis, Randall P. SADOWSKI a Robert E. SHANNON.** *Introduction to Simulation Using SIMAN.* New York : McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 978-0-07-049320-9.
16. *Steps for Proper Simulation Project Management.* **NORDGREN, B. William.** Arlington : IEEE, 1995. DOI 10.1109/WSC.1995.478707.
17. *Secrets of Successful Simulation Projects.* **ROBINSON, Stewart a Vinod BHATIA.** Arlington : IEEE, 1995. DOI 10.1145/224401.224424.

18. **Flexsim.** FlexSim Case Studies. *Flexsim*. [Online] [Citace: 12. 07 2022.] <https://www.flexsim.com/case-studies/>.
19. **ROBINSON, Stewart, BROOKS R. a Kathy Kotiadis.** *Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation*. Boca Raton : CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-1038-5.
20. *A pilot survey on data identification and collection in simulation projects.* **ONGGO, S. Bhakti, BROOKS, J. Roger a James HILL.** Lancaster : European Simulation and Modeling, 2013.
21. **BALCI, Osman.** Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study. *Annals of Operations Research*. 53, 1994, DOI 10.1007/BF02136828.
22. **ROSSETTI, D. Manuel.** *Simulation Modeling and Arena*. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2016. ISBN 978-1-118-60791-6.
23. **Rockwell Automation.** Arena Simulation Software Buying Options. *Rockwell Automation*. [Online] [Citace: 7. Červenec 2022.] <https://www.rockwellautomation.com/cs-cz/products/software/arena-simulation/buying-options.html>.
24. *Introduction to manufacturing simulation.* **PEDGEN, Dennis, MILLER S.** Orlando : IEEE, 2000. ISBN 0-7803-6579-8.
25. **Siemens.** Plant Simulation & Throughput Optimization. *Siemens*. [Online] Siemens. [Citace: 25. Květen 2022.] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html>.
26. **GARRIDO, M. José.** *Object Oriented Simulation: A Modeling and Programming Perspective*. New York : Springer, 2009. ISBN 978-1-4419-0516-1.
27. **Flexsim.** Flexsim. *Flexsim*. [Online] Flexsim. [Citace: 25. Květen 2022.] <https://www.flexsim.com/flexsim/>.
28. **GRABOWIK, Cezary, CWIKLA G., KALINOWSKI K. a KUC Magdlena.** A Comparison Analysis of the Computer Simulation Results of a Real Production System. *Production System Modelling with FlexSim and Plant Simulation Software*. Cham : Springer, 2019.
29. *Discrete Simulation Software Ranking.* **DIAS, S. M. Luis, VIEIRA A., PEREIRA, G. a OLIVEIRA J.** Braga : IEEE, 2016. ISBN 978-1-5090-4486-3/.
30. **ENGEL strojírenská spol. s.r.o.** *Nepublikované materiály společnosti*. [Dokument] Kaplice : autor neznámý, 2022.
31. **SOKOLOWSKI, John A. a Catherine M. BANKS.** *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-28943-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura procesu a jeho okolí.....	14
Obrázek 2: Ilustrace rozsahu jednotlivých druhů procesů v rámci organizace.....	17
Obrázek 3: Zvyšující se komplexita systémů	21
Obrázek 4: Rozdíl mezi funkcí spojitou a diskrétní	28
Obrázek 5: Časová dotace na jednotlivé části projektu	36
Obrázek 6: Kroky simulační studie	37
Obrázek 7: Rozhraní simulačního softwaru Arena.....	49
Obrázek 8: Uživatelské rozhraní softwaru Plant simulation	53
Obrázek 9: Rozhraní softwaru Flexsim.....	55
Obrázek 10: Vstřikovací stroj vyrobený spol.....	60
Obrázek 11: Olejový tank svařovaný robotem.....	61
Obrázek 12: Výrobní závod ENGEL a zvýrazněná oblast výroby olejových tanků	65
Obrázek 13: Hlavní tok materiálu výroby olejových tanků	66
Obrázek 14: Mapa výroby olejových tanků	68
Obrázek 15: Nastavení simulačního modelu	78
Obrázek 16: Nastavení směn a přestávek zaměstnanců v prostředí Flexsim	79
Obrázek 17: Proměnné simulačního modelu a nastavení určující intervaly příjezdů.	80
Obrázek 18: Nastavení objektu source	83
Obrázek 19: Nastavení objektu Event-Triggered Source, který řídí vstup zakázek do systému	84
Obrázek 20: Proces označování typu výrobku a jeho čísla operace	85
Obrázek 21: Princip objektu Move Object a přesunu výrobků na určená pracoviště.....	86
Obrázek 22: Náhled 3D modelu pracoviště svařování robotem	87
Obrázek 23: Process Flow řídí pracoviště svařování robotem a další.....	88
Obrázek 24: Logistik č.2 a předávací místo, které obsluhuje.....	90
Obrázek 25: Process Flow určený k řízení logistiky č.2	91
Obrázek 26: Jiho – východní pohled na simulační model	93
Obrázek 27: Severo – západní pohled na simulační model	93
Obrázek 28: Process Flow pro řízení procesu vstupů objektů do výroby a vylamování	94
Obrázek 29: Process Flow řídící několik pracovišť s podobnou operativou.....	94
Obrázek 30: Process Flow pro řízení pracovišť s jedinečnou operativou	95
Obrázek 31: Process Flow řídící procesy logistiky 1, 2 a 4	95
Obrázek 32: Process Flow řídící proces logistiky č.4	96
Obrázek 33: Způsob změny layoutu a materiálového toku	111

Seznam tabulek

Tabulka 1: Souhrn pracovišť procesu výroby olejových tanků	69
Tabulka 2: Ukázka souhrnu vyráběných olejových tanků a jejich operací	69
Tabulka 3: Výňatek z tabulky empirického rozdělení vstupů objednávek do výroby	74
Tabulka 4: Poměrné rozdělení vstupů dle typu výrobku	75
Tabulka 5: Ukázka z matice výrobních plánů jednotlivých typů výrobků	76
Tabulka 6: Tabulka propojující proměnnou „Arrival“ a časy příjezdů výrobků	81
Tabulka 7: Pomocná tabulka pro řízení pracovišť jedním Process Flow	89
Tabulka 8: Srovnání modelu a reálného systému použité při validaci modelu	98
Tabulka 9: Vybrané intervaly hodnot ukazatelů určených k validaci modelu	99
Tabulka 10: Vytížení pracovišť v aktuálním stavu bez přesčasů	102
Tabulka 11: Ukazatele stavu aktuálního nastavení systému vzhledem k účelům studie	103
Tabulka 12: Maximální počty vozíčků v jednotlivých frontách práce	104
Tabulka 13: Nastavení scénářů Experimentu 1	105
Tabulka 14: Minimální počty vozíčků v parkovištích dle jednotlivých scénářů	107
Tabulka 15: Počty vyrobených kusů dle jednotlivých scénářů experimentu	108
Tabulka 16: Výsledné chování systému experimentu 3	108
Tabulka 17: Vytížení vybraných pracovišť pro vybraný scénář	110
Tabulka 18: Výsledky experimentu 4 – změna layoutu a materiálového toku	112
Tabulka 19: Nastavení experimentu č.4	113
Tabulka 20: Srovnání hlavních ukazatelů výkonnosti výroby experimentu č.4	114
Tabulka 21: Shrnutí změn vytížení všech pracovišť v rámci experimentu č.4	117
Tabulka 22: Vytížení vybraných pracovišť experimentu č.4	118
Tabulka 23: Analýza obsahu front práce v rámci experimentu č.4	118

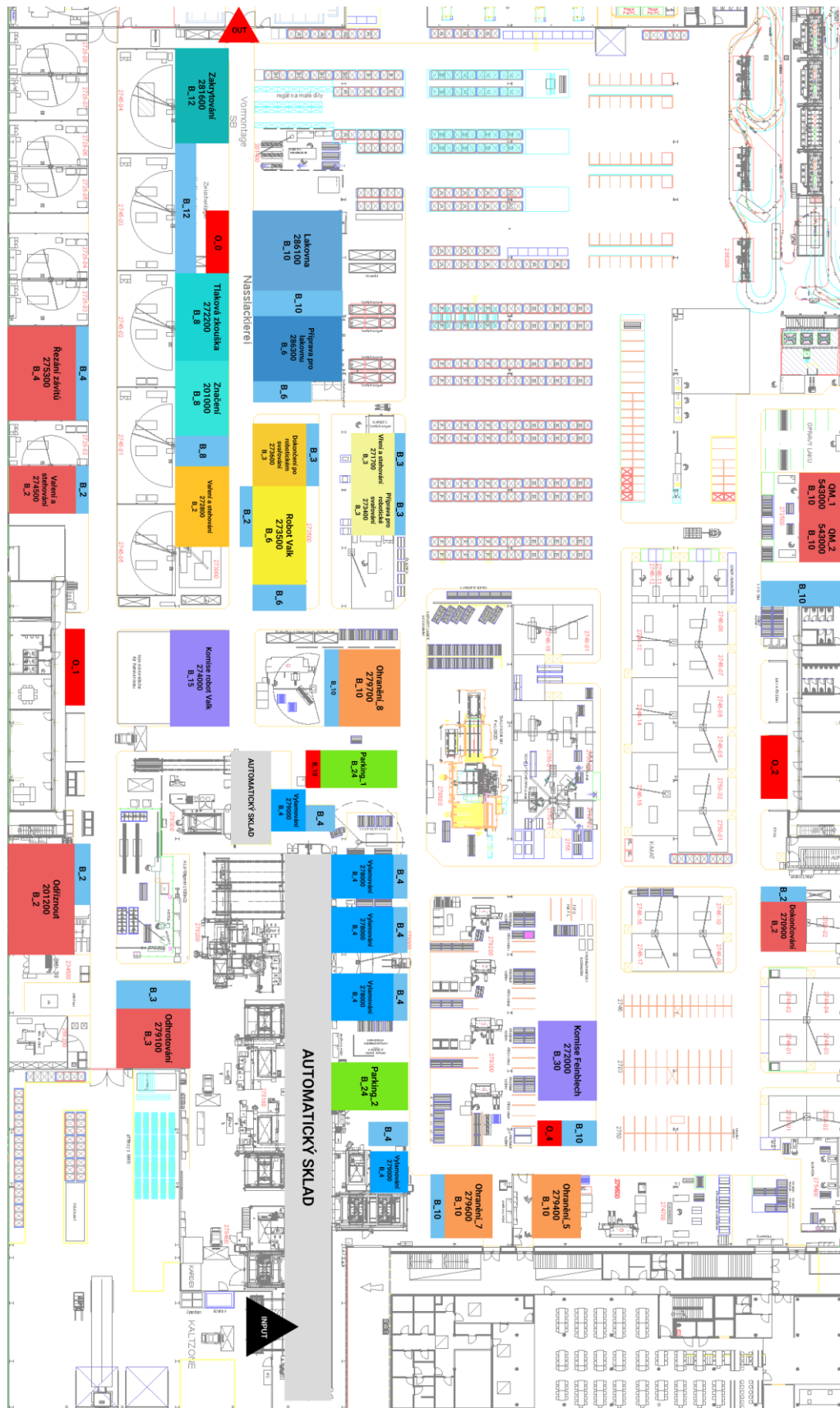
Seznam grafů

Graf 1: Proporce projektů s vážnými problémy v oblasti sběru dat	41
Graf 2: Proporce konkrétních problémů s daty napříč projekty	41
Graf 3: Poměr důsledků problémů s daty na simulační projekty.....	42
Graf 4: Výsledky studie zkoumající popularitu simulačních softwarů	58
Graf 5: Identifikace zakázkové výroby a její sdružení do virtuálních výrobků	71
Graf 6: Portfolio výrobků vytvořené pro účely simulační studie	72
Graf 7: Časy vstupů jednotlivých objednávek do systému	73
Graf 8: Průměrné vytížení výroby užitá při validaci modelu	100
Graf 9: Počet vyrobených kusů pro jednotlivé scénáře experimentu 1.....	106
Graf 10: Průměrné vytížení výroby vybraného scénáře a provozu s přesčasy	109
Graf 11: Celkové vytížení všech pracovišť v experimentu č.4.....	115
Graf 12: Vytížení všech pracovišť výrobou olejových tanků	116

Seznam příloh

Příloha 1: Layout výroby olejových tanků.....	132
Příloha 2: Matice operací.....	133
Příloha 3: Matice přípravných časů.....	134
Příloha 4: Matice procesních časů	135
Příloha 5: Výsledný 3D model	136
Příloha 6: Fyzický nosič CD s výsledným modelem	

Příloha 1: Layout výroby olejových tanků



Příloha 2: Matice operací

Label	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_0	Q_273300	sink				
2 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	sink					
3 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_0	Q_275300	Q_543000	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink		
4 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_201200	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_0	Q_543000	Q_286300	Q_286100	sink	
5 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_271700	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink					
6 Q_279001	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink			
7 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_271700	Q_201000	Q_272200	Q_286300	Q_286100	sink						
8 Q_279002	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink				
9 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_273600	Q_286300	Q_286100	sink		
10 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_201200	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink			
11 Q_278000	Q_279600	Q_274000	Q_272800	Q_201000	Q_272200	Q_286300	Q_286100	sink						
12 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink				
13 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_281600	Q_286300	Q_286100	sink			
14 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_272800	Q_201001	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink	
15 Q_279002	Q_279600	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink					
16 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink				
17 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_0	Q_275300	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink			
18 Q_279002	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink		
19 Q_278000	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink				
20 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_271700	Q_201000	Q_272200	Q_286300	Q_286100	sink						
21 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	Q_281600	sink		
22 Q_278000	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink				
23 Q_279001	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink			
24 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_0	Q_275300	sink			
25 Q_279001	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink			
26 Q_278000	Q_279700	Q_274000	Q_274500	Q_272200	Q_201000	sink								
27 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_286300	Q_286100	sink				
28 Q_279002	Q_279100	Q_279400	Q_272000	Q_270900	Q_275300	Q_272200	sink							
29 Q_279001	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink			
30 Q_279001	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink				
31 Q_279001	Q_279600	Q_274000	Q_273400	Q_273500	Q_273600	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink				
32 Q_278000	Q_279700	Q_272000	Q_271700	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink						
33 Q_279002	Q_279600	Q_271700	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink						
34 Q_279001	Q_279700	Q_271700	Q_201000	Q_272200	Q_201001	Q_286300	Q_286100	sink						
35 Q_279002	Q_279700	Q_274000	Q_271700	Q_272200	Q_201000	Q_286300	Q_286100	sink						

Příloha 3: Matice přípravných časů

Label	201000	201001	201200	270900	271700	272000	272200	272800	273400	273500	273600	274000	274400	274500	275300	278000	279001	279002	279100	279400	279600	279700	281600	286100	286300	543000
1	0,06				7,20		6,00		7,20	6,00	6,00				7,20	2,40						18,18				
2	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00					2,40						13,86		6,00	6,00	
3					7,20				7,20	6,00	6,00				6,60	2,40						25,86	0,06	6,00	6,00	0,06
4	0,06		3,60		7,20			4,02	7,20	6,00	6,00						2,40		2,40			11,94		6,00	6,00	0,06
5	3,00				9,00		3,00		7,20	6,00	6,00					2,40						12,24	9,60	6,00	6,00	
6		0,06			7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94		6,00	6,00	
7	10,80				15,55		13,10		15,55	6,00	6,00					24,00						12,19		6,00	6,00	
8			0,06		7,20				7,20	6,00	6,00					2,40						11,04		6,00	6,00	
9					7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94		6,00	6,00	
10	0,06		3,60		7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94		6,00	6,00	
11							10,50	10,02		6,00	6,00					24,00						12,60		6,00	6,00	
12					7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94		6,00	6,00	
13	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94	7,20	6,00	6,00	
14	0,06	0,06			7,20			4,02	7,20	6,00	6,00					2,40						12,60	0,06	6,00	6,00	
15	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					11,94		6,00	6,00	
16	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					13,86		6,00	6,00	
17					7,20				7,20	19,98	6,00				9,00	2,40						21,90	0,06	6,00	6,00	
18					7,20				7,20	6,00	6,00					2,40		2,40				10,32	0,06	6,00	6,00	
19					7,20				7,20	6,00	6,00					2,40						17,64		6,00	6,00	
20	6,00				15,00				15,00							21,00						7,71		6,00	6,00	
21					7,20				7,20	6,00	6,00					2,40						12,24	0,06	6,00	6,00	
22		0,06			9,00				9,00	6,00	7,20					2,40								6,00	6,00	
23		0,06			7,20			6,48	7,20	6,00	6,00						2,40					7,50		6,00	6,00	
24			0,06		7,20			6,00	7,20	6,00	7,20				7,20							18,18		6,00	6,00	
25					7,20				7,20	6,00	6,00					2,40						7,50		6,00	6,00	
26							15,00									2,40						32,40		6,00	6,00	
27	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00				7,08							11,94		6,00	6,00	
28				4,38					7,20						3,00									6,00	6,00	
29	0,06	0,06			7,20				7,20	6,00	6,00						2,40		2,40		7,14		6,00	6,00		
30	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					5,76		6,00	6,00	
31	0,06				7,20				7,20	6,00	6,00						2,40					5,76		6,00	6,00	
32					15,00				15,00							2,40						7,50		6,00	6,00	
33	0,06	0,06			15,00			6,48	15,00								2,40					12,90		6,00	6,00	
34					15,00				15,00								2,40							6,00	6,00	
35	0,06				15,00				15,00								2,40					13,86		6,00	6,00	

Příloha 4: Matice procesních časů

Label	20101000	20101001	20112000	Z7109000	Z7117000	Z7120000	Z7122000	Z7228000	Z7340000	Z7345000	Z7360000	Z7400000	Z7440000	Z7450000	Z7530000	Z7800000	Z79001000	Z79002000	Z79100000	Z79400000	Z79600000	Z79700000	28160000	28610000	28630000	54300000	
1	4.02				178,20		60,00		178,20	34,02	51,78	0,06			6,06	25,32											9,06
2	4.02				82,80		34,80		82,80	34,02	45,00	0,06				13,68											15,06
3	4.02				30,42				30,42	17,88	14,64	0,06			21,84	13,44											11,52
4	4.02		0,96		66,30		34,80		66,30	21,48	17,28	0,06					17,40										14,16
5	4.02				177,54		35,40		177,54			0,06			5,04												4,50
6	4.02				67,86		34,80		67,86	14,04	16,02	0,06				8,52											9,84
7	4.02				250,28		35,62		250,28			6,00			23,68												9,72
8	4.02				120,36		34,80		120,36	17,04	35,52	0,06			13,68												8,52
9	4.02				36,06		34,80		36,06	17,76	21,96	0,06				3,84											14,16
10	4.02		0,96		97,44		34,80		97,44	22,86	32,64	0,06				18,60											14,16
11	4.02				422,79		33,00		422,79			6,00			7,50												16,20
12	4.02				110,16		34,80		110,16	25,02	40,98	0,06				9,60											9,54
13	4.02				51,00		34,80		51,00	18,78	33,42	0,06				8,28											12,00
14	4.02				142,56		60,00	24,00	142,56	64,98	56,82	0,06			6,24												12,24
15	4.02				57,60		34,80		57,60	20,04	33,42	0,06			30,00												12,00
16	4.02				82,80		34,80		82,80	30,90	45,00	0,06				13,68											15,06
17	4.02				24,90				24,90	19,92		0,06			27,72	8,04											15,42
18	4.02				173,10		63,00		173,10	70,02	59,88	0,06				2,88											4,80
19	4.02				143,16		34,80		143,16	24,00	30,96	0,06			30,00												4,80
20	4.02				152,48		34,80		152,48			0,06			5,58												16,14
21	4.02				193,02		69,00		193,02	75,90	64,02	0,06			7,92												5,85
22	4.02				162,00		34,80		162,00	37,80	25,38	0,06			15,26												17,34
23	4.02				75,00		34,80		75,00	23,04	12,00	0,06				7,44											52,20
24	4.02				169,44		60,00		169,44	41,04	53,40	0,06			6,60												17,34
25	4.02				58,02		34,80		58,02	13,56	7,98	0,06				3,60											52,20
26	4.02						153,00					0,06			1223,28												17,34
27	4.02				40,98		12,00		40,98	18,00	34,02	0,06			30,00												52,20
28	4.02				33,66		0,06		33,66			0,06			5,10												17,34
29	4.02				36,96		34,80		36,96	12,60	16,02	0,06				1,80											22,56
30	4.02				43,32		34,80		43,32	10,74	18,30	0,06				4,32											22,56
31	4.02				43,32		34,80		43,32	10,74	18,30	0,06				4,32											22,56
32	4.02				160,98		0,06		160,98			0,06			5,88												22,56
33	4.02				241,38		34,80		241,38							0,18											22,56
34	4.02				307,98		34,80		307,98							7,20											22,56
35	4.02				227,10		34,80		227,10			0,06				14,04											22,56

Příloha 5: Výsledný 3D model

