



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

SIMULACE RŮZNÝCH ZPŮSOBŮ PŘESUNU HŘÍDELE NA SOUSTRUH

SIMULATION OF DIFFERENT METHODS OF TRANSPORTATION OF A SHAFT ON A LATHE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Drábek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivana Hromková, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Vojtěch Drábek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	Ing. Ivana Hromková, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Simulace různých způsobů přesunu hřídele na soustruh

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na počítačovou simulaci výrobních procesů, která je současným trendem v rámci Průmyslu 4.0.

V rámci optimalizace pracoviště je vhodné v opodstatněných případech ověřit různé alternativy návrhu pracoviště. Simulaci změny je vhodné použít zejména v případech, kdy je její fyzické ověření na reálném výrobním systému drahé, nebezpečné, či jinak nerealizovatelné.

Simulace přesunu hřídelí na soustruh má za cíl ověřit různé varianty přesunu pomocí jednoho jeřábu, dvou jeřábu a kombinace jeřábu a robotického ramene s ohledem na rozvržení vstupu. V reálu by bylo testování těchto variant nákladné. Simulace by měla dát odpověď na optimální způsob přesunu hřídelí na soustruh.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše problematiky počítačové simulace diskrétních výrobních systémů.
- Analýza pracoviště soustružení hřídelí.
- Simulace variant:
 1. Přesun hřídelí mezi oběma soustruhy a axou zajištěn jedním jeřábem.
 2. Přesun hřídelí mezi oběma soustruhy a axou zajištěn dvěma jeřáby.
 3. Přesun hřídelí mezi oběma soustruhy zajištěn pomocí kombinace robotické rameno (lehčí hřídele) + aktuální jeřáb (těžší hřídele).
- Simulace rozvržení vstupu hřídelí na pracoviště: Řazení hřídelí do určitých rozměrů na jeden soustruh a hřídelí nad tuto velikost na soustruh druhý (z hlediska úspory seřizovacích časů).
- Zhodnocení výstupů simulace.

Seznam doporučené literatury:

RUSSEL, S.; NORVIG, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2. vyd. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2003. ISBN 0-13-790395-2. S. 59-136.

MAŘÍK, V., a kol. Umělá inteligence (1). Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0496-3. S. 33-57.

AZIZ, Adnan; PRAKASH, Amit (2010). "4. Algorithms on Graphs". Algorithms for Interviews. p. 144. ISBN 1453792996.

SKIENA, Steven (2008). The Algorithm Design Manual. Springer. p. 480. doi:10.1007/978-1-84800-070-4_4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na počítačovou simulaci výrobních procesů. V první části pojaté formou rešerše je rozebírána samotná problematika simulování reálných výrobních procesů, jejich využitelnost a případné limitující faktory. V druhé části práce je pak v prostředí programu Tecnomatix Plant Simulation prakticky zpracována a následně vyhodnocena simulace chodu pracoviště na opracování hřídelí konkrétního podniku zabývajícího se výrobou elektromotorů. V rámci práce jsou simulovány tři varianty uspořádání pracoviště – minulá, současná a uvažovaná do budoucna.

ABSTRACT

This thesis focuses on computer simulation of manufacturing processes. In the first part, which is in the form of a research, the problem of simulation of real production processes, its applicability and possible limiting factors are discussed. In the second part of the thesis, the simulation of the operation of a specific production workplace focused on shaft manufacturing is practically processes and subsequently evaluated in the Tecnomatix Plant Simulation environment. The work simulates three variants of workplace layout - past, present and considered for the future.

KLÍČOVÁ SLOVA

počítačová simulace výroby, plánování výroby, úzká místa, optimalizace toku materiálu, pracoviště výroby, Průmysl 4.0

KEYWORDS

computer simulation of production, production planning, bottlenecks, material flow optimization, material flow optimization, production workplaces, Industry 4.0



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁBEK, Vojtěch. *Simulace různých způsobů přesunu hřídele na soustruh*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150114>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ivana Hromková.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych velmi poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studia. Současně bych chtěl poděkovat své vedoucí Ing. Ivaně Hromkové, Ph.D za odborné vedení, vstřícný přístup a ochotu poradit po celou dobu řešení této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 26. 5. 2023

.....

Vojtěch Drábek

OBSAH

1	AKTUÁLNÍ TRENDY VE VÝROBNÍCH PROCESECH.....	15
2	PRŮMYSL 4.0.....	17
2.1	Model RAMI 4.0	17
2.2	Strategie realizace Průmyslu 4.0 uvnitř firem	19
2.2.1	Strategie frontální realizace	20
2.2.2	Strategie realizace postupných kroků	20
2.2.3	Strategie realizace buněk	20
3	MODELOVÁNÍ VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ.....	21
3.1	Výrobní systém.....	21
3.2	Vyspělost výrobních systémů	21
3.3	Model výrobního systému	22
3.4	Klasifikace modelů	22
3.5	Analytické řešení modelů	26
3.6	Simulační řešení modelů	26
3.6.1	Výhody simulačních modelů	27
3.6.2	Nevýhody simulačních modelů	27
3.6.3	Kdy je vhodné použít simulaci	27
3.6.4	Validace modelu	28
4	SIMULACE.....	29
4.1	Volba simulačního nástroje	31
4.2	Programy pro simulaci výroby	32
5	OPTIMALIZACE.....	34
6	SIMULOVANÉ PRACOVIŠTĚ.....	36
6.1	Popis pracoviště	36
6.2	Výrobní stroje na pracovišti	37
6.3	Procesní plán.....	39
7	VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....	40
7.1	Identifikace pracoviště vhodného k nasimulování	40
7.2	Simulované varianty	40
7.3	Získání dat a výběr reprezentativního vzorku hřidelí.....	42
7.4	Sestavení procesního plánu	42
7.5	Zanesení dat do prostředí Tecnomatix Plant Simulation.....	44
7.5.1	Modelování pracoviště	44
7.5.2	Zanesení procesních plánů.....	44
7.5.3	Programování simulace prostřednictvím metod.....	45
7.6	Výsledky pro jednotlivé simulované varianty	47

7.6.1	Přesouvání hřídelí pomocí jednoho jeřábu.....	47
7.6.2	Přesouvání hřídelí pomocí dvou jeřábů	48
7.6.3	Přesouvání hřídelí pomocí robotického ramena a jeřábu.....	48
8	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	49
9	ZÁVĚR.....	51
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	57
	PŘÍLOHY	59

1 AKTUÁLNÍ TRENDY VE VÝROBNÍCH PROCESECH

V současné době lze v oblasti výrobních procesů jasně identifikovat jeden hlavní trend společný naprosté většině průmyslových odvětví. Je jím zapojení počítačů v oblasti výroby, které již dnes není omezeno pouze na oblast číslicového řízení konkrétního obráběcího stroje. Počítačem podporované technologie označované souhrnnou zkratkou CAx provází výrobek celým jeho životním cyklem.

Na samém začátku je výrobek navrhnut v programech typu CAD (Computer-aided design), s konkrétními výpočty zejména v oblasti pevnosti a namáhání dopomohou programy využívající metody konečných prvků FEM (Finite element method). Pomocí CIM (Computer-integrated manufacturing) programů je pak navrhnut proces výroby, jeho rozložení mezi jednotlivá výrobní stanoviště a tok materiálu továrnou. Celý životní cyklus produktu od počátku jeho vývoje až do jeho stažení z trhu či případné recyklace pak zpracovávají programy PLM (Product Lifecycle Management) [1]. Tato práce se dále soustředí zejména na oblasti přímo související s výrobním procesem.

Simulační modelování a analýza dat takto získaných je prováděna za účelem exaktního vyhodnocení složitých výrobních systémů a procesů. Lze tak zohlednit rozložení samotné továrny, sledovat tok materiálu výrobou, úkony na jednotlivých výrobních stanovištích a v neposlední řadě je také možné se zaměřit na kontrolu jakosti výrobků [2].

Rozdělení výroby mezi pracoviště

Jsou-li uvažovány pouze výrobky s vyšší přidanou hodnotou, pak lze obecně konstatovat, že jejich produkce bude zahrnovat větší množství rozdílných pracovních postupů, výrobních procesů a technologií. Při výrobě pak musí být dodržena přesně daná sekvence pracovních kroků. Každá komponenta finálního celku má své přesně dané požadavky, které musí být dodrženy. Může se jednat o geometrické tolerance tvarů, návazností, požadavky na povrch. Dodržena musejí být taktéž kritéria týkající se životnosti produktu, jeho ceny, výrobního času a velikosti výrobní dávky [3].

Existuje široké spektrum technologií, které mohou být v rámci výrobního procesu zapojeny ke zpracování rozličných druhů materiálů (např. kovů, kompozitů, plastů, keramických materiálů aj.). Jednotlivé kroky výroby je nezbytné uvažovat nejen samostatně, ale i v rámci celku. Ovlivnění materiálu jako vedlejší důsledek jednoho výrobního kroku může ovlivnit jeho chování v rámci dalších výrobních kroků. Ovlivněna takto může být mikrostruktura materiálu, jeho mechanické, tepelné, elektrické či magnetické vlastnosti. Každý výrobní proces se navíc může měnit a vyvíjet v průběhu životního cyklu produktu tak, zohlednil nové požadavky na výrobu či aktuální trendy na trhu [3].

Hodnocení výrobních postupů

At' už je analyzován existující systém nebo je řešeno modelování možných alternativ systému budoucího, hlavním a nejdůležitějším kritériem, které musí výrobní systém vždy splňovat, je dodržení předepsaných technologických požadavků. Výrobek tedy musí být vyroben v předepsaných tolerancích, dosahovat daných parametrů či splňovat stanovené atestace. Následnou optimalizaci daného výrobního procesu je tedy vždy nutno řešit tak, aby byla zachována tato přesně daná kritéria. Optimalizace výrobního procesu je sám o sobě obecný pojem, pod který je možno shrnout i velmi odlišné přístupy.

Před přistoupením k samotné optimalizace je však vždy nutné provést komplexní analýzu optimalizovaného systému. Obecně je dle [4] možno aplikace analýzy výrobního procesu rozdělit do následujících dílčích kategorií:

- 1) Diagnostika odpadů (jejich objem, případná využitelnost jako zdrojů, cena)
- 2) Diagnostika procesu (tok materiálu, informací a postup řízení procesu)
- 3) Restrukturalizace výrobního procesu za účelem zlepšení jeho výkonnosti
- 4) Reinženýring podnikových procesů (BPR – Business Process Reengineering)
- 5) Implementace plánování podnikových zdrojů (ERP – Enterprise Resource Planning), výrobních informačních systémů (MES – Manufacturing Execution Systems) a řízení dat výrobku (PDM – Product Data Management)
- 6) Implementace strategií JIT (Just In Time), TQM (Total Quality Management), TPM (Total Productivity Maintenance), QFD (Quality Function Deployment)
- 7) Implementace metody kalkulace ABC (Activity-Based Costing)
- 8) Přizpůsobení organizační struktury, aby byla připravena na změny businessu
- 9) Systémové integrace ve velkém měřítku
- 10) Přizpůsobení se normám nebo zajištění souladu s nimi (ISO 9000, ISO 14000)
- 11) Rozložení výroby (insourcing / outsourcing)

2 PRŮMYSL 4.0

Již od počátků průmyslové výroby docházelo k technologickým skokům, které znamenaly změnu do té doby zažitých paradigmat. Prvním takovým skokem byla mechanizace v oblasti průmyslu, kterou z dnešního pohledu označujeme jako Průmyslovou revoluci. Druhým klíčovým bodem bylo rozšíření elektrifikace v oblasti průmyslové výroby nyní označované jako Druhá průmyslová revoluce. Jako Třetí průmyslová revoluce je pak zpravidla chápáno rozšíření digitalizace a zapojení informačních technologií v oblasti výroby. Jako přímý důsledek rozšíření digitalizace uvnitř továren, kombinace zapojení vzájemně propojených zařízení označovaných jako IoT (Internet of Things) a rozmachu „chytrých“ výrobních zařízení i samotných produktů dochází v současné době k dalšímu podobnému skoku v podobě průmyslové produkce [5].

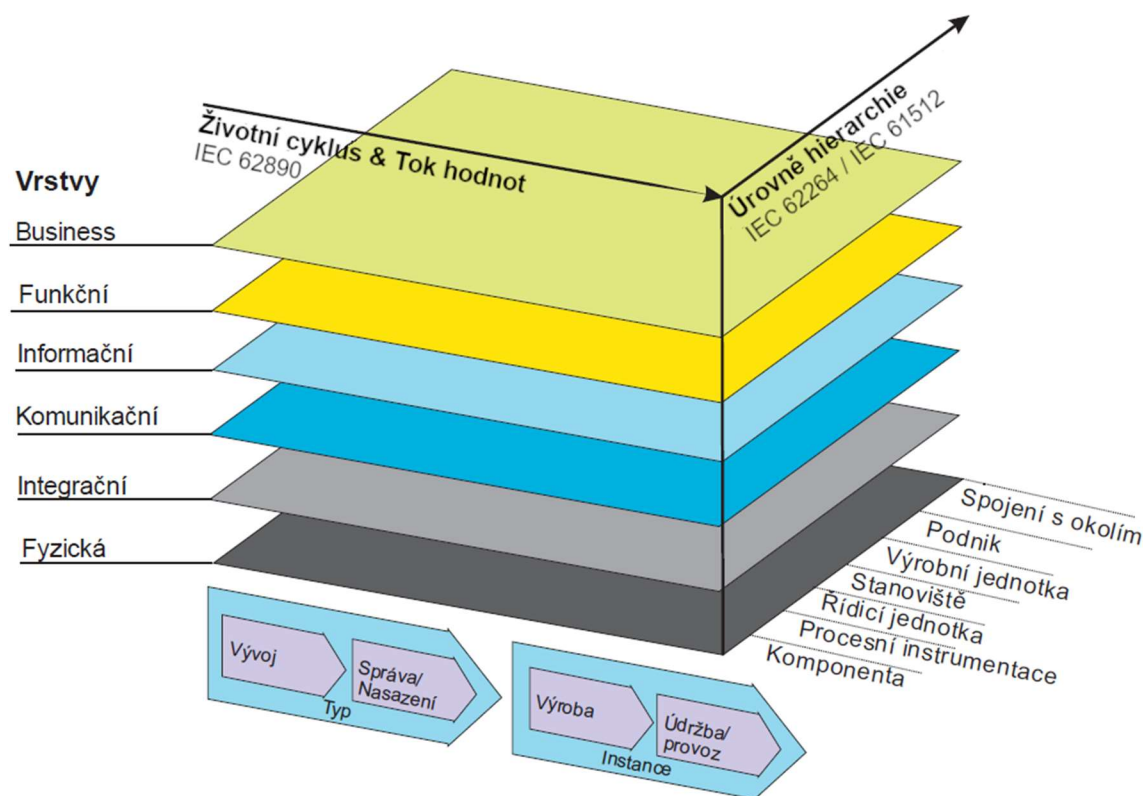
Tato vize označovaná jako Průmysl 4.0 předkládá koncept modulárních a efektivních výrobních systémů, v nichž produkty samotné určují své výrobní procesy. Takto vyráběné produkty pak mohou být vysoce individualizované při současném zachování ekonomických aspektů hromadné výroby [5]. V rámci konceptu Průmyslu 4.0 pak rozlišujeme 6 základních principů:

- 1) Interoperabilita (*schopnost kybernetických systému, lidí a inteligentních továren se navzájem propojovat a komunikovat prostřednictvím IoT*)
- 2) Vizualizace (*virtuální kopie inteligentní továrny, která je vytvořena propojením dat senzorů s modely*)
- 3) Decentralizace (*schopnost kybernetických systémů v inteligentních továrnách samostatně provádět rozhodnutí a ta následně vyhodnocovat*)
- 4) Orientace na služby (*nabídka služeb prostřednictvím internetu služeb*)
- 5) Schopnost pracovat v reálném čase (*shromažďování a analýza dat včetně navazujícího poskytování okamžité informace*)
- 6) Modularita (*flexibilní přizpůsobení inteligentních továren pro měnící se požadavky jednotlivých modulů*)

2.1 Model RAMI 4.0

Zkratka RAMI 4.0 vychází z anglických slov Reference Architecture Model Industry 4.0, jde tedy o vzorový model, podle něhož je možno posuzovat a zhodnocovat klíčové aspekty Průmyslu 4.0. Tento koncept byl vyvinut německou asociací výrobců elektroniky a elektrotechniky ZVEI za účelem podpory rozvoje iniciativy Průmysl 4.0 [6].

Účelem tohoto modelu je poskytnout ucelený přehled, podle něhož je možno zavádět principy Industry 4.0 ve výrobních podnicích. Složité postupy jsou tak rozčleněny do snáze pochopitelných balíčků, které je možno ve výrobě jednodušeji implementovat [7]. Toto rozdělení je přehledně a uceleně vyobrazeno na trojdimenzionálním grafu na Obr. 1.



Obr. 1 - Model RAMI 4.0 - převzato z [8], upraveno

Ve výše uvedeném grafu je možné identifikovat 3 hlavní osy představující 3 hlediska zavádění konceptu Industry 4.0. První osa směřující vpravo vzad s označením Úrovně hierarchie rozčleňuje koncept z pohledu samotných výrobních továren. První úroveň tohoto rozčlenění se vztahuje k samotné komponentě – produktu výroby. Následuje pět pojmů – procesní instrumentace, řídicí jednotka, stanoviště, výrobní jednotka a podnik – podrobněji rozebírá již továrnu samotnou. Za zmínku jistě stojí fakt, že z pohledu Industry 4.0 tato struktura není chápána jako rigidní, ale naopak jako vysoce flexibilní, kdy hlavní roli hraje komunikace mezi jednotlivými členy, a to napříč úrovněmi hierarchie. Samotný produkt označovaný zde jako komponenta je pak nedílnou součástí struktury [7]. Toto rozdělení pak končí úrovní Spojení s okolím, která zohledňuje zapojení samotné továrny a jejích prvků v rámci větších celků, jako jsou cloudová řešení či IoT [8].

Druhá osa jdoucí zleva doprava popisuje Product Life Cycle – životní cyklus produktu. Na ose je možno rozlišit čtyři hlavní fáze – vývoj spolu se správou a nasazením produktu probíhají v první fázi jeho životního cyklu označované souhrnně jako Typ. Druhá polovina pak začíná samotnou produkcí produktu, jeho následnou údržbou a nakonec i stažením z trhu. Tuto část lze označit jako Instance, neboť se již netýká produktu jakožto konceptu, ale zabývá se již konkrétním „výrobkem“ následně dodávaným zákazníkům. Pakliže zákazník projeví zájem o určitý produkt, projevuje zájem o jeho typ. Až v okamžiku, kdy je mu daný produkt dodán, přechází do fáze instance. V souladu s principy konceptu Industry 4.0 je pochopitelně po celý životní

cyklus o produktu sbíráno velké množství dat. Tato data pak o sobě často zaznamenává i produkt samotný v průběhu své služby [7, 8].

Na pomyslnou vertikální osu jsou pak vyneseny jednotlivé funkční vrstvy modelu. Nejnižší úroveň představuje samotná fyzická vrstva sestávající se ze samotných výrobních strojů a zařízení, dále pak konkrétních přípravků stejně jako příslušné výrobní dokumentace. Její propojení s vyššími úrovněmi, které by umožnilo digitální zpracování dat z fyzické vrstvy, zajišťuje vrstva integrační. Jejím prostřednictvím komunikují dílčí čidla, čtečky či senzory instalované na prvcích fyzické vrstvy s vrstvami vyššími. Aby bylo dosaženo jednotných způsobů komunikace mezi vrstvami, zajišťuje vrstva komunikační standardizaci předávání dat mezi integrační a informační vrstvou. Samotná informační vrstva pak již data či události předzpracovává na základě jejich priority, z událostí pak vybírá data klíčová pro rozhodování, která jsou následně předávána funkční vrstvě. Aplikace pracující v rámci funkční vrstvy umožňují běh a modelování služeb poskytovaných nižšími vrstvami stejně jako vzdálený přístup k prostředkům těchto vrstev. Na samotném vrcholu pak leží business vrstva dohlížející na integritu funkcí v rámci celkového procesu. V rámci této vrstvy jsou zohledněny zákonné a regulační podmínky, dále pak business vrstva umožňuje spojení mezi různými obchodními procesy [8].

Rostoucí komplexnost těchto modelů a z ní plynoucí nárůst datových přenosů pak přirozeně vedou k nutnosti větší standardizace v rámci hierarchie sběru a zpracování dat v rámci konceptu Průmyslu 4.0. Systémy zajišťující toto celkové zpracování a vyhodnocování dat je možno obecně shrnout pod anglickou zkratku SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), volně přeložitelnou jako „Dohledové řízení a sběr dat“. Tyto systémy jsou zodpovědné za sběr dat ze senzorů a pohonů ve výrobě, stejně jako předávání relevantních informací příslušným jednotkám automatického řízení. Potřebné informace jsou pak obvykle v grafické podobě prezentovány všem úrovním řízení od pracovníků obsluhujících příslušné stroje až po vedoucí manažery zodpovědné za chod továrny. Relevantní data jsou taktéž uložena pro hlubší analýzu [9].

2.2 Strategie realizace Průmyslu 4.0 uvnitř firem

Přínosy aplikace principů Průmyslu 4.0 jsou obecně uznávané a ověřené skutečným použitím, přesto však existuje celá řada výzev, které je nutno překonat pro zajištění úspěšné realizace Průmyslu 4.0 uvnitř podniku. Tyto výzvy zasahují celou řadu aspektů fungování firmy. Nejpodstatnější z nich je však aspekt dostupnosti zdrojů, a to jak finančních, tak i lidských. Počáteční investice nezbytné pro začlenění principů Průmyslu 4.0 jsou zpravidla poměrně vysoké. Z hlediska lidských zdrojů je pak nutno počítat s potřebou zajištění odpovídající odbornosti pro obsluhu nových technologií, neboť jedině tak je možné zajistit maximální přínos z nově uplatněných postupů a technologií. Aby byl podnik schopen plně využít potenciál plynoucí z technologií Průmyslu 4.0, je nezbytně nutné, aby již před samotnou realizací měl pevně danou strategii a organizační strukturu pro tento přechod [10].

2.2.1 Strategie frontální realizace

První uvedenou strategií realizace konceptu Průmyslu 4.0 uvnitř podniků je strategie frontální realizace. Její podstatou je zavedení těchto principů najednou v celé firmě, či provozu. Tento princip je nejčastěji uplatňován u velkých firem v situaci, kdy dochází k budování zcela nového výrobního závodu takzvaně „na zelené louce“. U tohoto principu není nutno zvažovat hledisko narušení výroby, neboť v daném výrobním zařízení v době zavádění zpravidla ještě žádná výroba neprobíhala. Hlavním negativem a zároveň faktorem prakticky vyhrazujícím tento princip pro velké firmy s dostatečnými finančními prostředky jsou vysoké kumulované investiční náklady. Jelikož je v této situaci dotčen celý podnik současně, vyžaduje si tato strategie ze všech tří zmíněných největší objem analytických a realizačních prací a z toho plynoucí dlouhý čas přípravy. Jak již bylo zmíněno výše, přínosy principu Průmyslu 4.0 jsou již obecně uznávány, a tedy v případě úspěšného zavedení pro celý podnik současně jsou splněny předpoklady pro dobrou návratnost této investice [11–13].

2.2.2 Strategie realizace postupných kroků

Navzdory faktu, že frontální realizace principů Průmyslu 4.0 přináší největší okamžitý benefit, její aplikovatelnost velmi omezujícím velikost nutné finanční investice stejně jako nutnost kompletní odstávky celého závodu po celou dobu realizace. Principy Průmyslu 4.0 jsou tedy často zaváděny postupně v rámci jednotlivých kroků, přičemž jeden krok může představovat například jednotlivý proces v rámci firmy. V rámci postupného zavádění je nutno mít jasně definovaný finální cíl stejně jako i dílčí postupové milníky. Hlavní zřejmou výhodou v porovnání s frontální realizací je zde možnost postupného financování při zachování postupných přínosů z jednotlivých dosažených postupových milníků. Tento přístup tedy mohou uplatnit již i firmy střední velikosti. Je však nutné brát v potaz, že rozšíření principů Průmyslu 4.0 po celém podniku bude vzhledem k postupnému charakteru zavádění trvat podstatně delší dobu [11–13].

2.2.3 Strategie realizace buněk

Strategií zavádění principů Průmyslu 4.0 vhodnou zejména pro menší podniky je integrace jednotlivých buněk fungujících podle těchto principů. Buňkou zde rozumíme jedno výrobní stanoviště, stroj či procesní krok. U této strategie je kladen velký důraz zejména na integraci a vzájemné propojení těchto buněk se zbytkem výrobního provozu po stránce výměny dat a řízení. Jelikož jde z principu o postupné zavádění, je i zde nutno mít od začátku připraven rámcový koncept pro celý proces integrace stejně jako realizační plán pro každou dílčí buňku. Velkou výhodou představuje relativně nižší finanční zátěž stejně jako nižší narušení běžícího provozu firmy. Ze všech tří zmíněných postupů má však realizace buněk nejnižší okamžitý dopad z hlediska výhod Průmyslu 4.0 [11–13].

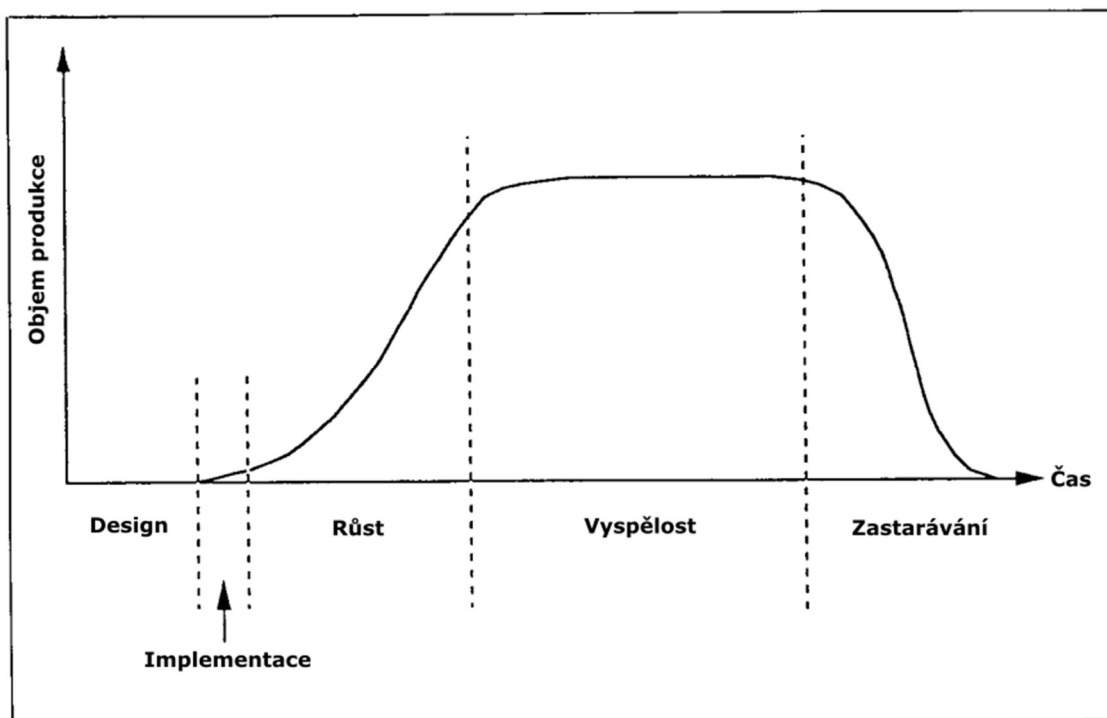
3 MODELOVÁNÍ VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ

3.1 Výrobní systém

Výrobní systém se vždy sestává ze série na sebe navazujících prvků, které se společně podílejí na výrobě finálního produktu. Pod těmito prvky si pak lze představit jak samotná výrobní stanoviště a konkrétní stroje včetně jejich příslušného softwaru, tak i pracovníky je obsluhující a samotný zpracovávaný materiál. Přestože se výrobní systémy budou pochopitelně značně lišit napříč odvětvími zejména na základě vyráběného sortimentu, některé obecné vlastnosti či tendence je možno vysledovat prakticky u všech výrobních systémů. Hlavní motivací vedoucí k vývoji a optimalizaci výrobních systémů je snaha vyrábět produkt levně a rychle při zachování veškerých daných technických parametrů a specifikací [14].

3.2 Vypělost výrobních systémů

Životní cyklus výrobního systému lze rozdělit do následujících fází: návrh, implementace, rozvoj, vypělost, zastarávání a vyřazení. Jelikož se následující rozbor soustředí na životní cyklus výrobního systému, je vycházeno z předpokladu, že samotná volba vyráběného produktu stejně jako technologický aspekt výroby již byly zváženy [14].



Obr. 2 - Životní cyklus výrobního systému – převzato z [14], upraveno

Ve fázi návrhu nejprve připravíme model výrobního systému, který bude splňovat všechny jasně dané požadavky. V této fázi také musí být jasně dán účel daného výrobního systému a cíle, kterých by při jeho následné implementaci mělo být dosaženo. Současně by měly být zkalkulovány celkové náklady stejně jako časový harmonogram zavedení systému do výroby. Implementace systému se sestává zejména z jeho fyzického sestavení, otestování a zavedení do výroby. Prvotní zaškolení obsluhy na nově zavedený či upravený výrobní systém probíhá také v této fázi. Jak je patrné z grafu na Obr. 1, ve fázi rozvoje výrobního systému je jedním z klíčových aspektů zvyšování výrobních objemů, a to až do fáze dosažení výrobních kapacit zamýšlených v prvotní fázi návrhu. Následující fáze vospělosti výrobního systému by měla trvat po co nejdelší část produkce. I během této své fáze je však výrobní systém rozvíjen a optimalizován. O výrobním systému je v této fázi konstantně sbíráno velké množství dat, která jsou následně zpracována a vyhodnocována pro účely další optimalizace [14]. Tato data se týkají jak konkrétních stanovišť výrobního procesu, tak i daného procesu jakožto celku, a to například z pohledu toku materiálu procesem. Právě tento aspekt bude následně na příkladu konkrétního reálného stanoviště podrobněji rozebrán a zpracován v praktické části této práce. Konečnou fází životního cyklu výrobního procesu je pak jeho postupné zastarávání až následně konečné vyřazení. Jak ilustruje Obr. 1, v této fázi dochází k postupnému útlumu výroby až nakonec k jejímu úplnému ukončení. V moderních výrobních procesech zejména v oblasti sériové výroby hraje klíčovou roli sběr dat o procesu a jejich interpretace po celý životní cyklus procesu. Právě tímto aspektem řízení a hodnocení výrobních procesů se podrobněji zabývá koncept Průmysl 4.0, kterému byl věnován vlastní úsek na začátku této práce.

3.3 Model výrobního systému

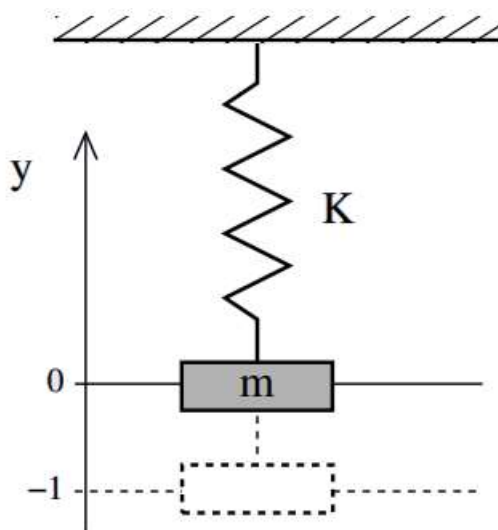
Pojmem model systému rozumíme napodobení systému jiným systémem, přičemž tento modelový systém musí co nejlépe reprezentovat a vlastnosti a chování své předlohy. Modelováním pak rozumíme proces, při kterém se zkoumanému objektu podle určitých kritérií jednoznačně přiřadí fyzický či abstraktní model. Podstatou modelování je náhrada zkoumaného systému jeho modelem. S modelem následně provádíme experimenty, pomocí nichž získáváme další znalosti o modelovaném systému [15, 16].

3.4 Klasifikace modelů

Konceptuální modely

Konceptuální modely představují první fázi jakéhokoliv modelování systému. Veškeré relevantní znalosti o systému musí být zahrnuty tak, aby byly zřejmé souvislosti a vzájemné interakce jednotlivých prvků modelu. Konceptuální model nemusí obsahovat dynamické parametry systému, neboť slouží primárně pro správné pochopení v počátečních fázích plánování. Nejpokročilejší verzí konceptuálního modelu by byla

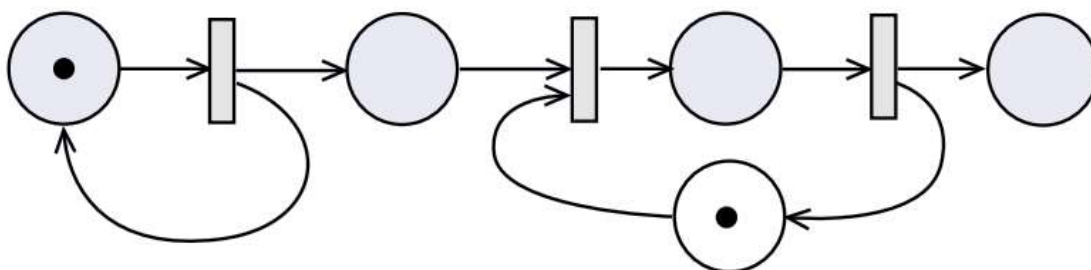
objektově orientovaná databáze obsahující všechny aspekty vzorového systému [15, 17]. Příkladem konceptuálního modelu systému může být například obrázek závaží na pružině na obrázku níže.



Obr. 3 - Konceptuální model – závaží na pružině, převzato z [15], upraveno

Deklarativní modely

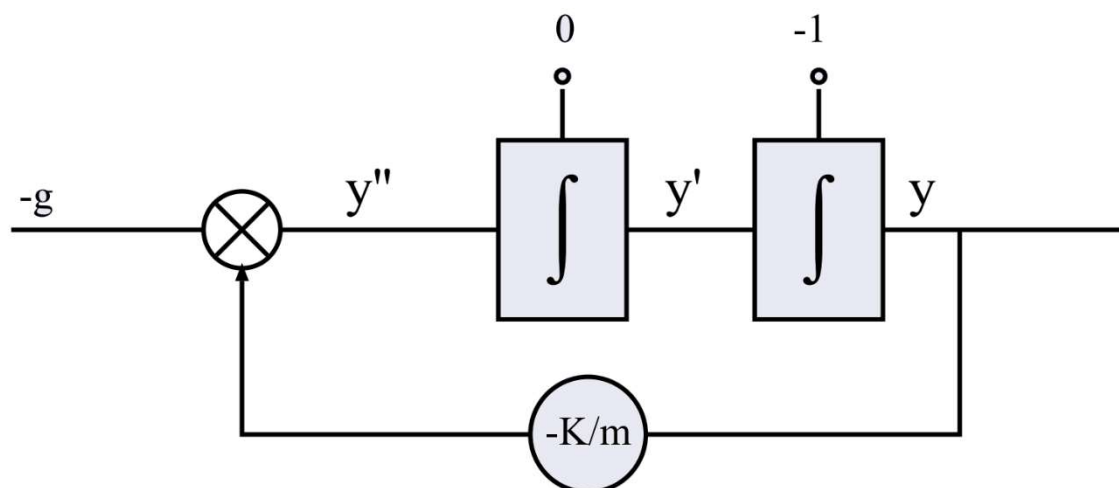
Tyto modely umožňují zahrnout dynamiku systému pomocí přechodů mezi stavy či událostmi v rámci systému. Deklarativní model se soustředí na strukturu stavů a událostí způsobujících přechod z jednoho stavu do druhého za určitých podmínek. Tyto samotné podmínky či omezení určující přechody mezi stavy nejsou z tohoto pohledu podstatné. Vzhledem ke sledování skokových změn stavů jsou deklarativní modely vhodné především pro diskrétní modely [15, 17]. Příkladem deklarativního diskrétního modelu systému mohou být například Petriho sítě na obrázku níže.



Obr. 4 - Petriho sítě, převzato z [15], upraveno

Funkcionální modely

Funkcionální modely představují směrový tok signálu mezi jednotlivými funkcemi. V rámci funkcionálního modelu je systém převeden na soubor bloků komunikujících pomocí zpráv a signálů. Rozlišujeme dva základní druhy funkcionálních modelů – modely, kdy bloky představují funkce a modely, kdy bloky představují předávané proměnné [15, 17]. Příklad prvního zmíněného druhu se nachází na obrázku níže.



Obr. 5 - Funkcionální model, převzato z [15], upraveno

Modely popsané rovnicemi

V rámci těchto modelů taktéž rozlišujeme dva základní druhy – modely popsané matematickými rovnicemi a neorientované grafy. Tyto modely pracují s konkrétní vlastností systému, která je nejčastěji popsána matematickou rovnicí (algebraickou, diferenciální, diferenční). Vlastnosti systému pak zkoumáme pomocí řešení těchto rovnic [15, 17]. Na obrázku níže je možno vidět sestavu rovnic popisující model závaží na pružině rozebraný v rámci konceptuálních modelů.

$$y'' = -g - \frac{K}{m}y$$

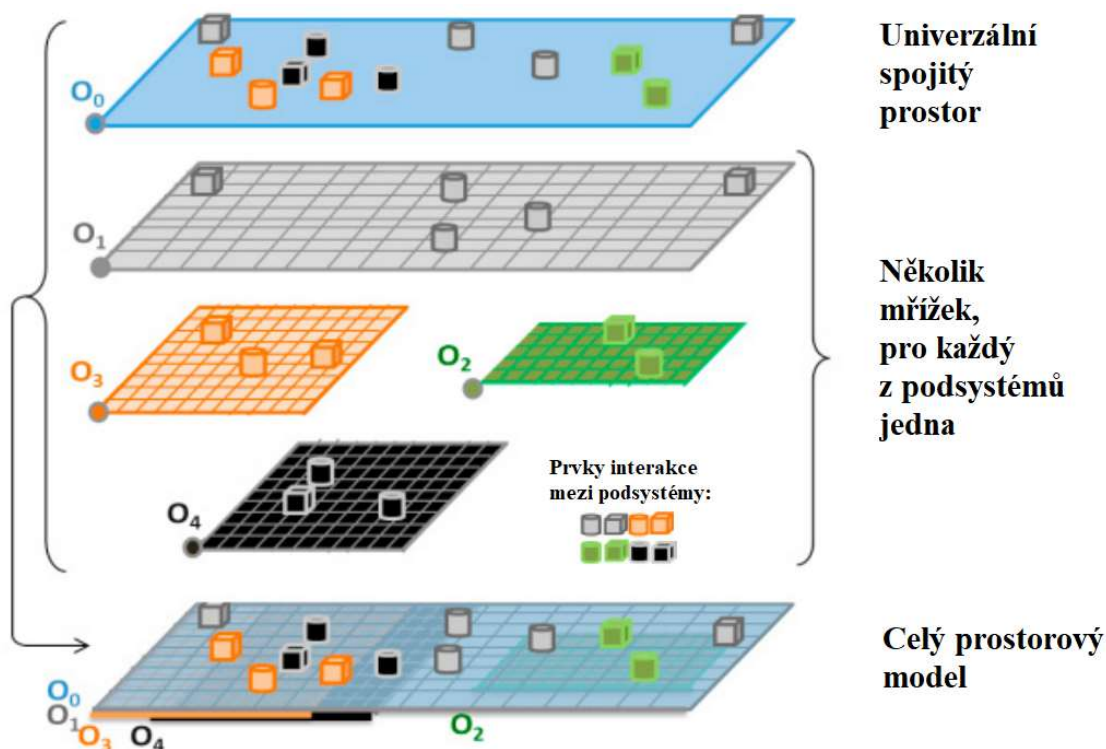
pro počáteční podmínky:

$$y(0) = -1$$

$$y'(0) = 0$$

Prostorové modely

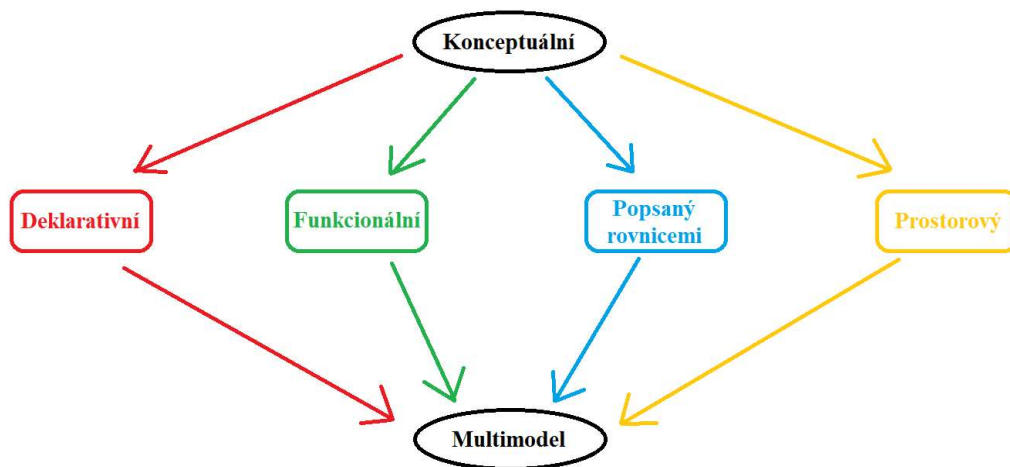
V rámci prostorových modelů rozdělujeme systém na menší ohraničené podsystémy. Tyto typy modelů jsou použity v situacích, kdy je potřeba modelovaný systém zachytit velmi detailně. I u těchto modelů pak rozlišujeme dva druhy. První z nich se soustředí na prvky modelu a dynamiku jejich interakcí na přesně vymezeném prostoru, zatímco druhý se zaměřuje i na změny prostorových dispozic modelu [15, 17]. Příklad druhé varianty lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 6 - Prostorový model, převzato z [18], upraveno

Multimodely

Modely, jejichž dílčí komponenty jsou samy o sobě vlastními modely, nazýváme multimodely. Rozdílnost dílčích modelů pak umožňuje nahlížet na modelovaný systém z pohledu různých úrovní abstrakce. Nejméně abstraktní náhled na systém zpravidla představují prostorové modely, zatímco nejabstraktnější budou konceptuální modely. Tento přístup umožňuje vybírat si v průběhu simulace ten model, jehož úroveň abstrakce nejlépe odpovídá zkoumané problematice [15, 17]. Z následujícího obrázku je patrné, jak propojením rozdílných způsobů namodelování téhož systému vytvoříme jeho celkový multimodel.



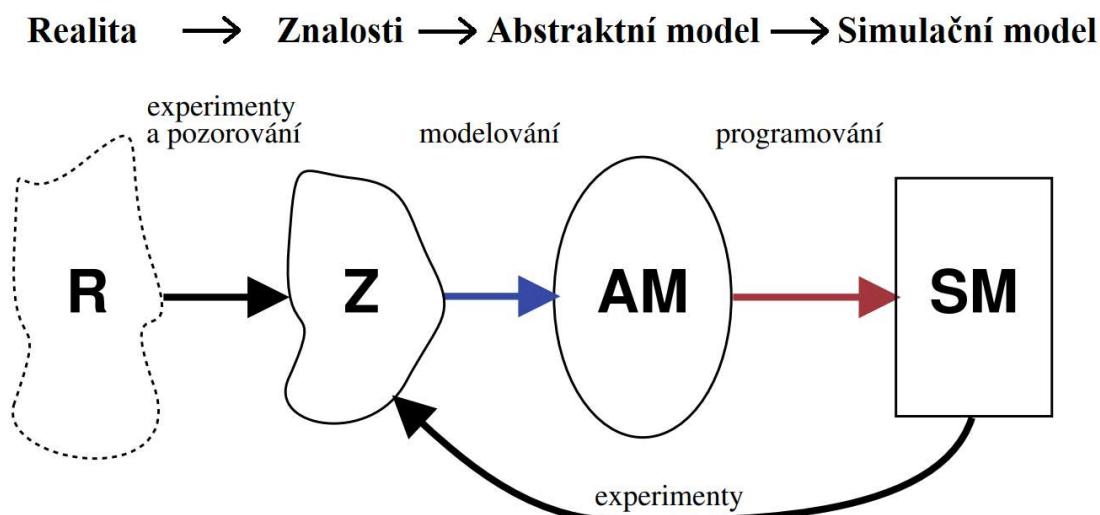
Obr. 7 - Vzájemné vztahy modelů, vlastní tvorba dle [17]

3.5 Analytické řešení modelů

Analytické řešení lze z pohledu simulací reálných výrobních systémů považovat spíše za alternativní model, jeho aplikovatelnost je totiž z podstaty velmi omezená. Analytické modely využívají k popisu chování systému matematické vztahy a jejich následná matematická řešení. Vhodné jsou pouze pro jednoduché či podstatně zjednodušené systémy. Veškeré relevantní aspekty systému totiž musíme být schopni popsat pomocí řešitelných matematických rovnic. Výsledky získáme ve formě funkčních vztahů, ve kterých budou jako proměnné vystupovat parametry modelu. Dosazením konkrétních hodnot pak získáme řešení. Hlavní předností analytických modelů výrobních systémů je přesnost řešení a jeho menší časová náročnost v porovnání s řešením pomocí simulace. Uplatnitelnost u reálných systémů je však velmi omezená [15].

3.6 Simulační řešení modelů

Pod pojmem simulace rozumíme získávání nových znalostí o reálném systému, tedy souboru elementárních vzájemně propojených prvků, pomocí provádění experimentů s jeho modelem [15]. Je zřejmé, že simulace je přímo ovlivňována řešením reálným systémem, neboť z něj vychází. Jak je však patrné z obrázku níže, interakce probíhá i opačným směrem. Nově získaná data a poznatky ze simulace totiž rozšiřují naše znalosti o systému a s jejich pomocí obvykle reálnou předlohu pro simulační řešení upravujeme či jinak optimalizujeme.



Obr. 8 - Princip modelování a simulace – převzato z [15], upraveno

Vývoj simulačního modelu je však neustálý cyklický proces. Na samém začátku budeme vycházet z počátečního jednoduchého modelu, ten budeme postupně rozšiřovat o poznatky získané ze simulačních běhů či jiné aspekty, jejichž relevantnost se projeví až po několika simulacích. Podle [15] pak rozlišujeme těchto 5 základních etap modelování a simulace:

- 1) Vytvoření abstraktního modelu (*formování zjednodušeného popisu zkoumaného systému*)
- 2) Vytvoření simulačního modelu (*zápis abstraktního modelu formou programu*)
- 3) Verifikace a validace (*ověřování správnosti modelu*)
- 4) Simulace (*experimentování se simulačním modelem*)
- 5) Analýza a interpretace výsledků (*získávání nových znalostí o zkoumaném systému*)

3.6.1 Výhody simulačních modelů

Experimentování se simulačními modely namísto přímých reálných systému s sebou nese celou řadu výhod. V první řadě je zde aspekt ceny – obecně jakákoliv zkouška, která zahrnuje destrukci zkoumaného tělesa a s tím spojené náklady na výrobu, je vhodným kandidátem pro nahrazení pomocí simulace. Další výhodou je možnost mít plnou kontrolu nad rychlostí běhu simulace. Můžeme tedy pozorovat simulace procesů velmi rychlých (např. chemické reakce), ale stejně tak i procesů trvajících dlouhou dobu (např. pohyby kosmických těles). Zpracovávat jako simulace můžeme i systémy, u nichž by reálné experimenty byly velmi nebezpečné (např. jaderné exploze). Řešení cestou počítačové simulace může také být jedinou reálnou cestou, jak systém zpracovat (např. kolize vesmírných těles). Výhodou zejména patrnou v porovnání s analytickými modely je pak možnost řešit i složitější modely (např. meteorologické modely) [15].

3.6.2 Nevýhody simulačních modelů

I zpracování reálných systémů pomocí simulačních metod s sebou však pochopitelně nese řadu nevýhod. V první řadě jde o nutnost potvrzení validity daného modelu, v rámci něhož se snažíme ověřit, že model a systém, na základě něhož byl model sestaven, si z hlediska relevantních aspektů odpovídají. Samotné sestavování počítačového modelu může pak být u složitějších systémů velmi náročná. Zbývající problémy se pak odvíjejí zejména od numerického charakteru řešení. Se složitostí modelů rostou nároky na výkon počítačů, na nichž simulace poběží. Jelikož výstupem simulace jsou konkrétní numerické výsledky, vyžaduje si změna jakéhokoliv vstupního parametru nový běh celé simulace. Samotný výstup také nemusí být vždy snadné správně vyhodnotit, správná interpretace si vyžaduje znalost simulovaného systému. Získané numerické řešení navíc také může být na rozdíl od analytického nepřesné, případně mohou použité numerické hodnoty vykazovat nestabilitu vzhledem ke vstupním parametrům [15, 19].

3.6.3 Kdy je vhodné použít simulaci

Z výše uvedeného plyne, že před zahájením zpracování problému pomocí simulace je nutno zvážit, jestli je simulační běh vhodným řešením. Dle [15, 20] je vhodné využít simulaci zejména v následujících situacích:

- 1) Neexistuje úplná matematická formulace problému nebo nejsou známé analytické metody řešení matematického problému,

- 2) Analytické metody vyžadují tak zjednodušující předpoklady, že je není možné pro daný problém přijmout
- 3) Analytické metody existují pouze teoreticky a simulační řešení by bylo jednodušší
- 4) Experimenty ve reálném světě nejsou přípustné a počítačová simulace je jedinou možností
- 5) Proveditelnost simulace je podmíněna schopností ovládat časové měřítko, a tedy urychlování či zpomalování dějů.

3.6.4 Validace modelu

Pakliže je rozhodnuto uplatnit pro zpracování daného problému simulaci, musí před samotným zahájením vyhodnocování proběhnout validace modelu. V rámci tohoto procesu je nutno prokázat, že model adekvátně zobrazuje modelovaný systém. Jde o jeden z nejobtížnějších problémů modelování systémů, neboť musíme neustále porovnávat známé informace o systému s informacemi získanými simulačními běhy. Pakliže chování modelu neodpovídá chování originálu, je nezbytné model nejprve opravit. Přesnost modelu nelze navíc nikdy absolutně dokázat. Validita modelu je tedy brána jako míra použitelnosti tohoto modelu [15, 19].

4 SIMULACE

Simulace představuje proces návrhu model reálného systému, situace či procesu a následné provádění experimentů s tímto modelem za účelem pochopení chování systému v určitých situacích či obecně rozšíření našich poznatků o daném systému. Pro účely simulace charakterizujeme chování systému pomocí matematických závislostí a algoritmů. Nové informace o systému získáváme pomocí opakovaného řešení modelu, tedy prováděním takzvaných simulačních běhů. V rámci nich do modelu postupně zadáváme hodnoty vstupních parametrů a počáteční stav modelu, definujeme případné další podněty zasahující do systému v průběhu simulace. Následně vyhodnotíme získaná výstupní data. Simulační běhy lze provádět tak dlouho, dokud nezískáme dostatek hledaných informací o chování zkoumaného systému nebo dokud nenalezneme takové hodnoty vstupních parametrů, při nichž se bude systém chovat požadovaným způsobem [15, 21].

Rostoucí komplexnost jak samotných produktů, tak i jejich výrobních systémů vede k většímu zapojování simulačních metod, a to jak v oblasti plánování, tak i implementace a následného provozu výrobních systémů. V souladu s konceptem Průmyslu 4.0 simulace podporuje snižování TTM (Time-to-market) a podporuje rozhodování v rámci celého životního cyklu produktu. Simulace je zejména užitečná pro analýzu takových systémů, kde přímé analytické řešení matematickými vztahy není vzhledem ke komplexnosti možné [22].

Simulace je cenným nástrojem již od počátečních fází plánování budoucích systémů. Umožňuje takové experimentování s různými variantami budoucího systému, které by v realitě bylo velmi nákladné či zcela neproveditelné. Simulovat lze již samotné možnosti rozložení výrobního pracoviště, jako je rozmístění a počty strojů, tok materiálu pracovištěm či počet obsluhujících pracovníků. Nasimulování více možných variant následně umožňuje zhodnotit jejich dopad na efektivitu, produktivitu či vyčíslenost zdrojů a následnou volbu nevhodnější z nich. Nasimulovat lze chod produkce jak v rámci jejího rozběhu, tak i následný chod po dosažení plné kapacity. Znalost chování systému v době přechodu z fáze úvodního rozběhu do plného operačního nasazení pak umožňuje zajistit co možná nejplynulejší začlenění nového úseku do výrobního procesu [22, 23].

V rámci produkčního nasazení systému jeho simulace umožňuje optimalizovat kontrolní strategie a jejich dopad na výkonnost systému. Lze nasimulovat chod pro rozdílné vyčíslení, velikosti výrobních dávek, prioritizaci některých výrobků a jiné. Následné porovnání dat získaných simulací s daty odečtenými ze skutečného systému pak umožňuje přesnější optimalizace vyčíslení zdrojů a nalezení případných úzkých míst systému. Simulace taktéž umožňuje získat odpovědi na nejrůznější otázky typu: „Co kdyby...?“. Do simulace můžeme zahrnout různá narušení chodu systému, jako jsou poruchy strojů a s nimi spojené časy oprav či náhlé změny výrobních plánů. Z tohoto pohledu pak lze identifikovat kritické body systému a vliv jejich selhání na celek. Na základě takto získaných dat je pak možné lépe implementovat principy preventivní

údržby a u obzvláště kritických systémů tak minimalizovat pravděpodobnost jejich selhání [22].

Se současným rozmachem aplikací technologií virtuální a případně rozšířené reality se pojí i její možné aplikace v průmyslovém sektoru. V kombinaci s využitím simulace reálného výrobního systému umožňuje zapojení virtuální reality zaškolení pracovníků na strojích bez nutnosti jejich přímého zapojení do výrobního procesu [22, 24].



Obr. 9 - Aplikace AR pro školicí účely – převzato z [25]

Zaškolení tímto způsobem umožňuje pracovníkům vyzkoušet si reálné ovládání daného systému. Chyby operátora očekávatelné ve fázi zaškolení se však neprojeví na skutečném produkčním systému. Tyto aspekty zajišťují výrazně plynulejší začlenění operátora do nového výrobního procesu či stanoviště [22, 24]. V současné době již existuje mnoho firem specializujících se na služby zaškolení pracovníků ve virtuální realitě. Na obrázku níže se nachází výukový trenažér využívající rozšířené reality pro výuku obsluhy jeřábu od společnosti JLG Industries, Inc.



Obr. 10 - Trenažér pro výuku obsluhy jeřábu - převzato z [25], upraveno

4.1 Volba simulačního nástroje

Volbu vhodného simulačního nástroje lze považovat za jeden z nejdůležitějších kroků simulačního procesu. Před tím, než je zvolen nejvhodnější simulační software, je nutno kromě účelů a cílů této simulace jasně definovat i další aspekty, na základě nichž bude nakonec vybrán software. Navzdory zjevné důležitosti volby vhodného simulačního nástroje neexistuje v současné době mnoho ucelených metod, na základě nichž by bylo možno před zahájením projektu objektivně vybrat nejvhodnější software. Za pomoci [26] bylo vybráno následujících 9 kritérií, která je nutno zohlednit při volbě simulačního softwaru:

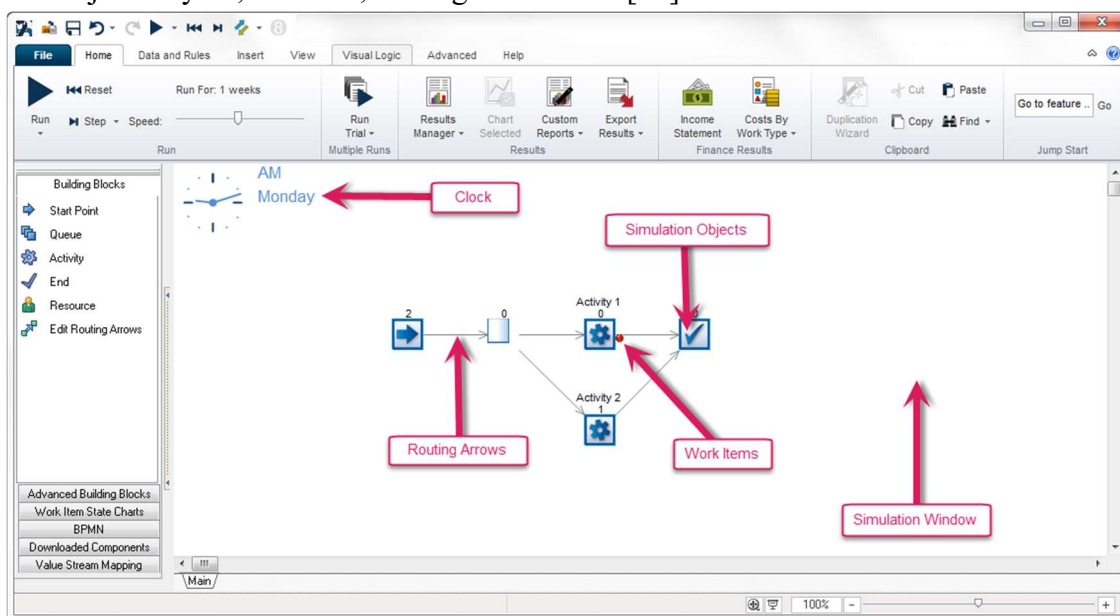
- 1) *Zadávaný model: Parametry simulovaného výrobního systému se musí dát snadno převést do jeho počítačového modelu, výhodou je přímá spolupráce software s externími zdroji, například import CAD modelů či dat jako CSV souborů.*
- 2) *Simulační techniky: Je nutno zvážit rozsah simulačních technik, které daný software poskytuje, například jestli umožňuje simulace diskrétních i spojitých procesů.*
- 3) *Simulační běh: Důležitými parametry jsou zejména rychlost, u větších modelů schopnost paralelního řešení a zejména pak stabilita běhu.*
- 4) *Výstup modelu: Software musí umožňovat sledování všech relevantních dat z průběhu animace a jejich uchování pro účely následné hlubší analýzy výsledků.*
- 5) *Možnosti vizualizace: Přehledné prezentování pomocí vykreslování dat do grafů, animací či jiné možnosti přizpůsobení umožní snazší prezentování výsledků simulace.*
- 6) *Spolehlivost: Netyká se pouze spolehlivosti samotného simulačního běhu, ale i podpory ze strany vývojářů daného softwaru a případné uživatelské komunity.*
- 7) *Uživatelská přívětivost: Program by měl poskytovat přehledné a intuitivní uživatelské rozhraní, kompletní dokumentaci k jeho fungování či případné tutoriály vysvětlující základní funkce.*
- 8) *Rozšiřitelnost: Pakliže je do budoucna předpoklad růstu simulace, musí být software schopen pojmout i tyto budoucí nároky, zejména pak větší množství současně simulovaných entit a zdrojů.*
- 9) *Cena: Ať již jednorázový poplatek či měsíční nebo roční platba za službu, je nezbytné před pořízením softwaru zvážit jeho přínos a celkovou návratnost investice.*

4.2 Programy pro simulaci výroby

Nyní budou stručně představeny tři programy sloužící k simulaci výroby, které byly uvažovány jako možná prostředí pro zpracování simulace v rámci této práce. Níže je taktéž zdůvodněno, který program byl nakonec zvolen a proč.

Simul8

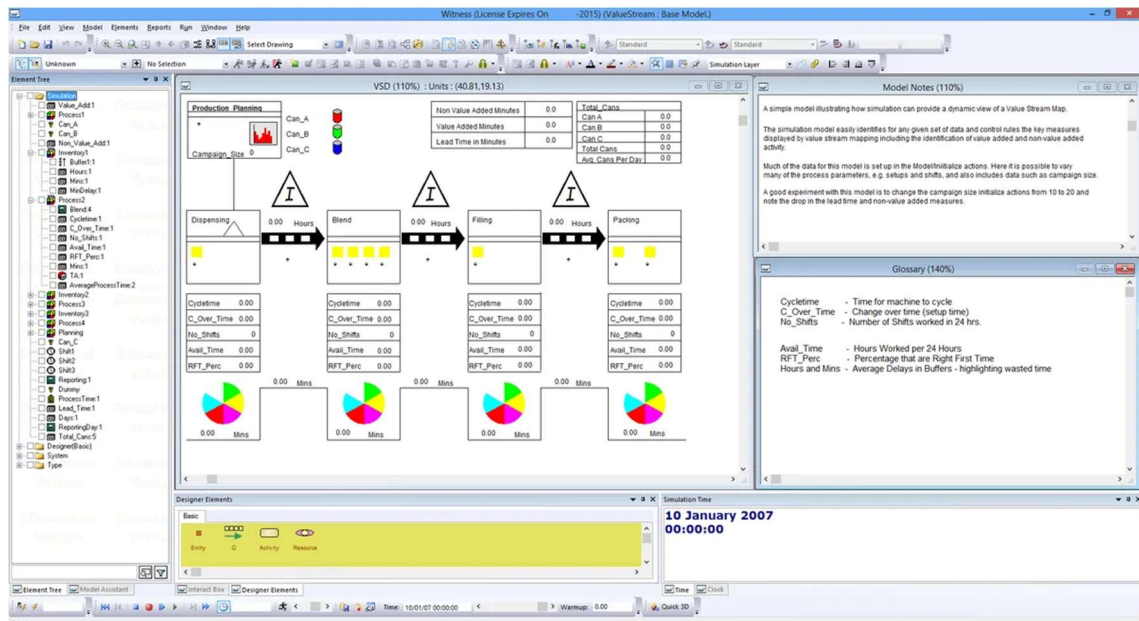
Program SIMUL8 vyvíjený britskou společností SIMUL8 Corporation slouží pro simulování diskrétních systémů a procesů. Uživatelské prostředí je intuitivní a přehledné s možností snadno rozvíjet simulované modely přidáváním dalších objektů principem „Drag and Drop“. Objekty obsažené v modelu si uživatel může přizpůsobovat jak po stránce jejich parametrů a vlastností, tak i z pohledu jejich vzhledu. Tento software nachází své uplatnění v širokém spektru průmyslových aplikací do zdravotnictví přes automotive až po vládní organizace. Mezi firmy využívající software SIMUL8 patří mimo jiné Toyota, BOSCH, Boeing či Unilever [27].



Obr. 11 - Uživatelské prostředí programu SIMUL8 - převzato z [27]

Witness

Witness byl na trh uveden již před více než 20 lety britskou společností Lanner Group Ltd. Program nabízí možnost modelování diskrétních i spojitých systémů. V rámci vizualizace modelu si uživatel může model nejprve vyvinout v jednoduchém a přehledném 2D prostředí a následně jej převést do 3D pro snazší představitelnost. Witness umožňuje import modelů CAD stejně jako dat přímo z programu Microsoft Excel či jako CSV souborů. Funkcionalitu je dále možné rozšířit o knihovny psané v jazycích C++, C# či VB.net. K uživatelům tohoto programu se řadí například Ford, 3M, Rolls-Royce a British Airways [28].

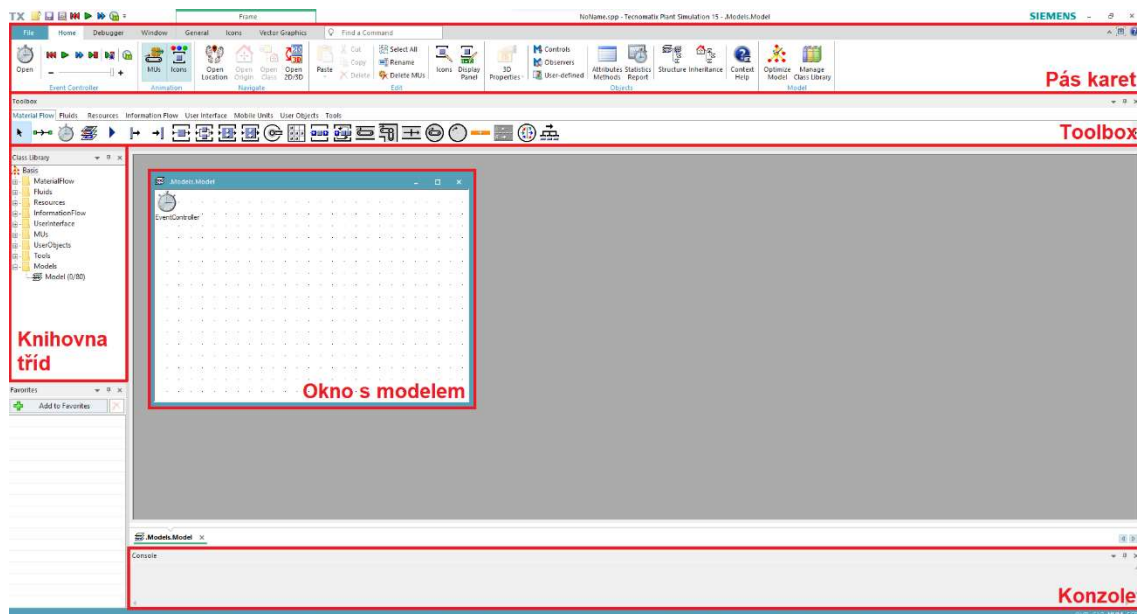


Obr. 12 - Uživatelské prostředí programu Witness - převzato z [29]

Tecnomatix Plant Simulation

Posledním zmíněným programem a zároveň i programem zvoleným pro vypracování této práce je Tecnomatix Plant Simulation. Firma Tecnomatix se sídlem v Izraeli soustředí se na vývoj softwaru pro simulaci a správu životního cyklu výrobku je v současné době vlastněná německým koncernem Siemens. Plant Simulation se soustředí na diskrétní simulace a je integrován do portfolia Tecnomatix digital manufacturing solutions. Dalšími programy v rámci tohoto portfolia jsou například NX Line Designer soustředící se na navrhování výrobních linek nebo Tecnomatix Process Simulate, který mimo jiné umožňuje sledovat ergonomii pohybů pracovníků ve výrobě a upozornit na případná rizika [30].

Samotný program Plant Simulation se soustředí na objektově orientované modely produkčních a logistických systémů a možné strategie jejich řízení. Za použití takto získaných simulačních modelů je možné provádět analýzy charakteristických vlastností systému, detekovat potenciální rizika či úzká místa a optimalizovat tak využití výrobních kapacit a maximalizovat propustnost systému. Data získaná simulací je možno vykreslovat prostřednictvím grafů či je dále analyzovat přímo v programu například pomocí integrovaných neuronových sítí či genetických algoritmů. Otevřená systémová architektura umožňuje propojení programu s dalšími aplikacemi například pomocí frameworku ActiveX či přístup do SQL databází prostřednictvím rozhraní ODBC. Plant Simulation již v základu obsahuje množství knihoven rozšiřujících program o další objekty či funkce. Uživatel si může případně naprogramovat své vlastní knihovny. Interakce mezi jednotlivými objekty v rámci programu je řešena zejména pomocí metod, což jsou úseky kódu v programovacím jazyce SYMTALK, které jsou v rámci simulace spouštěny událostmi či diskrétními časovými okamžiky. Mezi uživatele softwaru Plant Simulation se řadí například HONDA MOTOR, Audi, LG Production Research Institute nebo Magna Steyr Fahrzeugtechnik [30].



Obr. 13 - Uživatelské prostředí v programu Tecnomatix Plant Simulation

5 OPTIMALIZACE

Neustálý dynamický vývoj v oblasti průmyslové výroby vede k neustálé snaze o optimalizaci výrobních systémů ať už po stránce efektivity, produktivity či ziskovosti. Výrobní systémy sdružují velké množství vzájemně se ovlivňujících prvků, jako jsou stroje, materiál a produkty, ale i přítomná obsluha. Jedině prostřednictvím optimalizace všech ovlivnitelných parametrů lze zajistit maximálně efektivní provoz systému. Komplexnost většiny reálných výrobních systémů také znamená, že jejich optimalizace je proveditelná pouze za využití simulačních programů. Postupně jsou tedy upravována vstupní data a je pozorováno, jak jsou ovlivněny ty parametry systému, které jsou předmětem optimalizace. Níže jsou uvedeny některé z obvyklých problémů výrobních systémů. Právě snaha o jejich odstranění či minimalizace je předmětem optimalizace [31, 32].

Čekání

Podstata čekání spočívá v tom, že v daný okamžik jsou na pracovišti k dispozici zdroje, které však nejsou nijak využívány. Těmito zdroji mohou být jak nevyužité stroje v provozu, tak i jejich obsluha. Tento problém je zpravidla dobře identifikovatelný, software pro simulaci výroby zpravidla obsahuje nástroje pro monitoring využívání zdrojů, z nichž je pak zřejmé, kdy jsou výrobní prostředky ve stavu čekání. Nejčastěji dochází k čekání na materiál, případně na opravu či seřízení stroje. Pomocí úprav procesních plánů a rozvržení výroby vstupujících do simulace můžeme upravovat chování systému pro minimalizace čekání ve výrobě [23].

Zbytečná manipulace

Manipulace s výrobky či výrobními prostředky na pracovišti je nutná, musí však být prováděna co nejefektivněji. Lze se zaměřit například na tok materiálu procesem a identifikovat jeho zbytečné přesuny. Zejména u dávkové výroby jsou častým příkladem zbytečné manipulace přepravy materiálů do meziskladů a poté nazpět do výroby. Předmětem optimalizace se taktéž může stát samotné rozložení pracoviště. Vzájemné pozice jsou při optimalizaci upravovány tak, aby výrobky vykonávaly pouze co nejméně přesunů, a to navíc vždy pouze o nejkratší možnou vzdálenost. Optimální rozložení pracoviště je zpravidla hledáno již v počátku jeho simulací ve fázi návrhu [23].

Špatný pracovní postup

Pracovní postup také nazývaný jako procesní plán určuje souslednost jednotlivých kroků vedoucích ke zhotovení daného výrobku či provedení dané operace. Jeho nevhodnost může spočívat například ve zbytečném využití zdrojů, které nejsou nezbytně nutné pro zhotovení výrobku. Optimalizace procesního plánu úzce souvisí se zbytečnou manipulací, neboť nevhodná posloupnost pracovních kroků může vest ke zbytečným přesunům materiálu mezi stroji. Jako optimalizaci lze pak v tomto smyslu chápat například snahu o provedení více operací na témže stroji, a tedy snížení času stráveného přepravou [23].

Nevhodně naplánovaná výroba

Rozvržení výroby silně ovlivňuje mnoho dalších aspektů výrobního procesu produktu. V důsledku neoptimálního plánu může například nastat situace, kdy všechny výrobky musí projít přes jeden stroj. Přestože jsou tyto výrobky následně rozděleny mezi větší množství strojů, zmíněný jeden stroj, který je součástí pracovního postupu každého z nich, by se tak velmi pravděpodobně stal kritickým místem a jeho případná odstávka znamenala celkové zastavení výroby. Naopak vhodné rozvržení výroby může přinést úsporu mimo jiné z hlediska seřizovacích časů. Pokud budou výrobky po sobě jdoucí na lince dostatečně podobné, lze očekávat kratší seřizovací časy na strojích či možnost použít tytéž nástroje [23].

Nevhodná technická řešení

Nevhodně vyřešený tvar či materiál výrobku mohou vést navýšení složitosti výroby. V rámci optimalizace je tak možné se zaměřit na to, jestli je u výrobku skutečně dodrženo pouze to, co zákazník požaduje. Nevhodným technickým řešením tak mohou být například příliš přesné předepsané tolerance, materiály vyžadující složitější obrábění či zbytečné sledování nepožadovaných vlastností. Optimalizací těchto prvků můžeme docílit například toho, že výrobek bude nově možno zpracovávat na širší paletě strojů a bude tedy možnost dále optimalizovat využití zdrojů a tok materiálu pracovištěm [23].

Zmetky

Zmetky či neshodné kusy zatěžují chod podniku jak po stránce časové, tak i finanční. Neshodné kusy v případě jejich zachycení výstupní kontrolou v továrně vyžadují posouzení charakteru zmetkovitosti, případně vyjádření zákazníka, jestli jde o opravitelný

kus, či má dojít k jeho sešrotování. V době čekání na rozhodnutí o následném zpracování neshodného kusu je nutné tento kus skladovat, což v případě vyšší zmetkovitosti klade vysoké nároky na prostorovou zástavbu výroby. V případě zachycení neshodného kusu až na straně zákazníka může navíc zákazník vyměřit pokutu či požadovat nápravu. Zmetky zachycené na straně zákazníka také mohou poškodit reputaci výrobního podniku. Důsledkem optimalizace ve vztahu k minimalizaci zmetkovitosti pak může být například zavedení automatických inspekčních mechanismů kontroly kvality či přepracování procesního plánu výrobku [23].

Úzká místa

Úzká místa (anglicky bottlenecks) jsou takovými body ve výrobním procesu, které samy o sobě nejvíce zpomalují produkci. Ačkoliv nalezení stroje či procesu, který je v dané výrobě úzkým místem, je komplexní záležitostí, lze obecně dle [33] definovat tři základní vlastnosti společné všem úzkým místům:

- 1) Stroj či proces, který je úzkým místem, má téměř stoprocentní časové vytižení po celou dobu sledování.
- 2) Před strojem se hromadí materiál, stroje za úzkým místem jsou naopak nevytížené a čekají.
- 3) Selhání úzkého místa zpravidla vede k zastavení celé produkce.
- 4) Úzká místa nelze z procesu zcela odstranit. Jakmile bychom optimalizací odstranili jedno úzké místo, okamžitě se úzkým místem stane jiný bod procesu.

6 SIMULOVANÉ PRACOVÍŠTĚ

6.1 Popis pracoviště

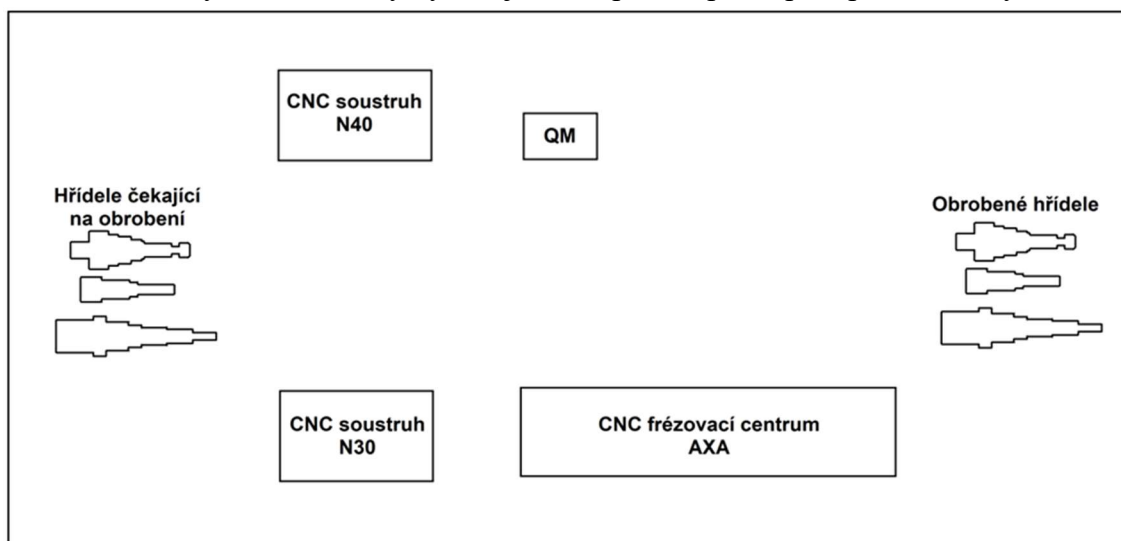
V rámci simulace je řešeno pracoviště na opracování hřídelí skutečného výrobního podniku zabývajícího se výrobou elektromotorů. Toto pracoviště tvoří konkrétní ucelený prvek celkového výrobního procesu hřídelí. Vstupním materiálem je polotovar pro výrobu hřídelí, výstupem pak kompletně opracované hřídele připravené na vložení do rotorových svazků elektromotorů.

Zpracovávaný materiál je možné rozdělit na dva základní druhy hřídelí. Prvním druhem jsou hřídele pro uložení ve valivých ložiscích, druhým pak hřídele pro uložení v kluzných ložiscích. Tyto kategorie hřídelí se principiálně liší jak po stránce strojů, které je zpracovávají, tak i po stránce procesních časů na těchto strojích.

Na řešeném pracovišti se nachází tři výrobní stroje. Prvním z nich je počítačem řízené soustružnické centrum označované v rámci práce jako N30, druhým strojem je větší taktéž počítačem řízené soustružnické centrum označené N40. Třetím a posledním zařízením je pak opět počítačem řízené frézovací centrum v rámci této práce označované jako AXA.

Kromě zmíněných strojů se na pracovišti nachází také sklad hřídelí čekajících na opracování. Do něj jsou hřídele postupně dopravovány z předchozích výrobních

stanovišť, jako je například žíhací pec. Na pracovišti se také nachází stanoviště kontroly označované v práci jako QM (Quality management). Pracovník na tomto stanovišti podle typu a určení hřídele provádí buď stoprocentní kontrolu, nebo pouze kontrolu funkčních parametrů hřídele. Od charakteru této kontroly se následně odvíjí čas, který je na ni v procesním plánu vyčleněn. Bez ohledu na typ či konkrétní vlastní hřídele, kontrola kvality je vždy posledním krokem procesního plánu. Odtud je hřídel již následně odeslán na skladiště dále do výroby. Všechny výše uvedené prvky jsou uvedeny na schématickém nákresu na obrázku níže. Tento nákres zároveň posloužil v prvotních fázích tvorby simulace jako konceptuální model. Jsou v něm tedy zahrnuty relevantní vlastnosti simulovaného systému tak, aby bylo zajištěno správné pochopení problematiky.



Obr. 14 - Schématický nákres simulovaného výrobního stanoviště

6.2 Výrobní stroje na pracovišti

CNC soustruh N30

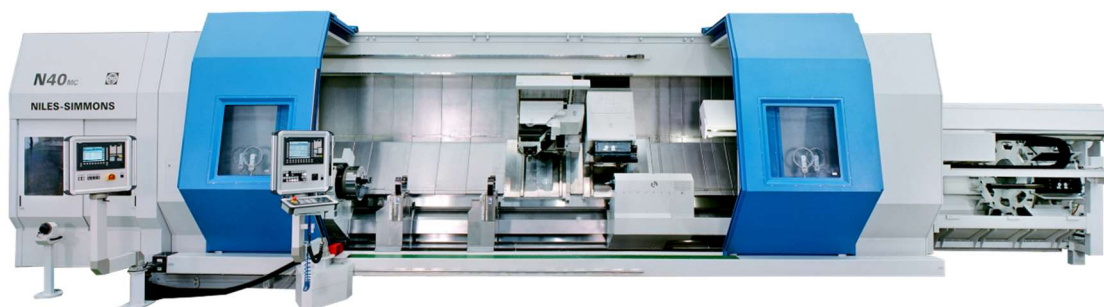
Prvním zmíněným strojem na pracovišti je stroj N30. Jde o menší z dvou soustruhů, je tedy schopen vyrábět hřídele pouze do určité velikosti. Hřídele nad tuto velikost musí dle procesního plánu vždy směřovat a N40. Dalším omezením, které je nutné u soustruhu N30 v rámci modelu zahrnout, je jeho schopnost obrábět pouze hřídele pro uložení ve valivých ložiscích. Toto omezení souvisí s velikostním omezením na opracovávané hřídele, neboť hřídele ukládané do ložisek kluzných jsou zpravidla větší. Následující obrázek zobrazuje CNC soustruh odpovídajícího typu, jakým je zmíněný N30.



Obr. 15 - CNC soustruh stejného typu jako N30 – převzato z [34]

CNC soustruh N40

Druhým soustruhem na simulovaném pracovišti je pak větší N40. Ten je schopen pojmout hřídele všech obráběných velikostí a určení. Je schopen obrábět hřídele pro uložení do valivých ložisek i do ložisek kluzných. V případě poruchy CNC soustruhu N30 je jej schopen N40 zastoupit. N40 však pomocí N30 může být zastoupena pouze pro případy, které jsou na N30 obrobitelné. Na obrázku níže se nachází soustruh typu odpovídajícího N40.



Obr. 16 - CNC soustruh stejného typu jako N40 - převzato z [34]

CNC frézovací centrum AXA

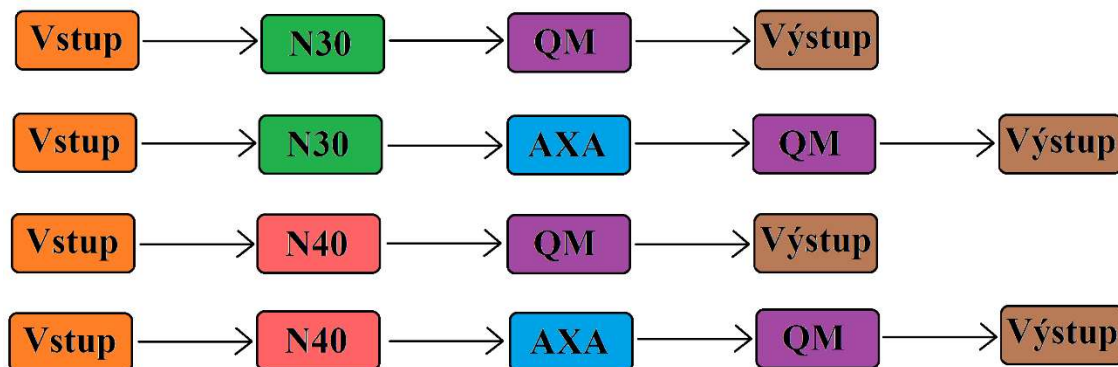
Posledním z obráběcích strojů na pracovišti je pak frézovací centrum AXA. Pomocí něj jsou na hřídelích, které to vyžadují, frézovány například drážky pro pero, závity na čele či případné otvory pro následné protažení kabelů k senzorům uloženým uvnitř hřídele. Vzhledem k technologickému charakteru těchto operací není možné u hřídelí vyžadujících tyto operace centrum AXA zastoupit žádným jiným ze strojů na pracovišti. Obrázek níže vyobrazuje principiálně odpovídající frézovací centrum.



Obr. 17 – CNC frézovací centrum stejného typu jako AXA – převzato z [35]

6.3 Procesní plán

Bez ohledu na typ hřídele či potřebné operace, začínají operace vždy odebráním hřídele z palety, na které byla uložena při čekání na opracování (z pohledu zmíněného nákresu zcela vlevo). Všechny hřídele pak pokračují na soustružení. Jde-li o hřídele, které budou uloženy ve valivých ložiscích, budou obrobeny na CNC soustruhu N30. Pakliže se jedná o hřídele uložené v kluzných ložiscích, budou směřovat na CNC soustruh N30. Pokud daná hřídel nevyžaduje žádný technologický prvek, který by bylo nutné frézovat, může po osoustružení přímo pokračovat na kontrolu kvality a po dokončení kontroly kvality pokračovat dále do výroby. Jestli hřídel vyžaduje například vyfrézování drážky pro pero, bude ze soustruhu N30 respektive N40 přesunuta na CNC frézovací centrum AXA a až po dokončení frézovacích operací přesunuta na kontrolu kvality. Odtud následně také pokračují dále do výroby. Nákres níže zobrazuje možné toky materiálu pracovištěm.



Obr. 18 - Grafické znázornění procesního plánu

7 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

7.1 Identifikace pracoviště vhodného k nasimulování

Prvním krokem v rámci řešení simulace v daném podniku byla identifikace pracoviště vhodného k nasimulování. Vhodným k nasimulování je takové pracoviště, které je z pohledu celého výrobního procesu úzkým místem. Optimalizace takového pracoviště by totiž ze své podstaty měla největší vliv na tok materiálu celým výrobním procesem.

Po dokončení prohlídky celého výrobního procesu výrobním závodem byly nejprve vyloučena stanoviště s vysokým podílem ruční práce, jako je například navijárna. Vzhledem k velkému vlivu individuálního lidského faktoru by optimalizace těchto pracovišť pomocí metod jednoduché simulace byla jen těžce realizovatelná. Následně bylo uvažováno kritérium, aby v rámci simulace daného pracoviště bylo možné vůči sobě přímo porovnat více variant jeho řešení.

Jako nejvhodnější pracoviště k nasimulování se ukázalo pracoviště obrábění hřídelí. Je možné jej objektivně označit za úzké místo a současně nabízí více možných variant k porovnání.

7.2 Simulované varianty

Samotným předmětem simulace jsou různé možnosti přesunů hřídelí mezi jednotlivými pracovišti. Vzhledem k vysoké hmotnosti zpracovávaných hřídelí, která se zpravidla pohybuje v řádu stovek kilogramů, je k přepravě vždy nutné použít těžké techniky.

První variantu představuje taková konfigurace pracoviště obrábění hřídelí, která byla provozována v minulosti. V rámci ní byly veškeré přesuny hřídelí po pracovišti obstarávány jedním mostovým jeřábem. Mostový jeřáb obdobného typu je možno vidět na fotografii níže.



Obr. 19 - Mostový jeřáb - převzato z [36], upraveno

Druhou porovnávanou variantou v rámci simulace je aktuální stav. K původnímu jedinému jeřábu byl později na tutéž kolejnici doinstalován druhý. Účelem bylo zajistit rozdělení přesunů, kdy první (původní) jeřáb by se staral o přesuny ze vstupu na CNC soustruhy N30 respektive N40, přičemž druhý nově nainstalovaný by zajišťoval přesun hřídelí z těchto soustruhů na frézovací centrum AXA případně na kontrolu kvality a následně na výstupní překladiště. Obrázek níže zachycuje příklad umístění dvou mostových jeřábů na těžce kolejnici.



Obr. 20 - Dva mostové jeřáby na těžce kolejnici - převzato z [37], upraveno

Třetí variantou přesunu hřídelí uvažovanou do budoucna je zkombinování jednoho mostového jeřábu společně s robotickým ramenem. Robotické rameno by při této variantě obstarávalo přesun hřídelí ze vstupu na první dva stroje, tedy na soustruhy N30 či N40. Mostový jeřáb by pak hřídele odsud odebíral a umísťoval je na frézovací centrum AXA, kontrolu kvality či na výstup. Tato varianta s sebou nese mnohé výzvy, jako je například již samotné uchycení hřídele na robot. V případě přesunu jeřáby se využívá zavěšení hřídele ocelovými popruhy potaženými textilií, zavěšení zde však vzhledem ke charakteru pohybu robotu není možné. V rámci technologického oddělení byla diskutována také varianta uchycení hřídelí na koncový efektor robotu magnetem. Tato varianta se však vzhledem k použití hřídelí ukázala jako neproveditelná. Při přesunu kovového předmětu magnetem totiž dojde k ovlivnění jeho magnetických vlastností. Jelikož jsou hřídele vyráběné na tomto pracovišti následně umísťovány do elektromotorů, není vzhledem k principu fungování elektromotoru ovlivnění magnetických vlastností hřídele přípustné. V případě reálné aplikace by varianta přesunu hřídelí na CNC soustruhy robotickým ramenem vyžadovala přesun obou soustruhů blíže k sobě, než je tomu aktuálně. Jinak by obsluha obou zařízení tímž ramenem nebyla možná. Na následujícím obrázku lze vidět příklad průmyslového robota pro vysoká užitečná zatížení.



Obr. 21 - Příklad průmyslového robota pro vysoká zatížení - převzato z [38]

7.3 Získání dat a výběr reprezentativního vzorku hřídelí

Po vymezení předmětu simulace následoval proces získávání potřebných dat. Data obdržená z daného podniku měla charakter dvou tabulek v programu Excel obsahujících celkové procesní plány popisující veškeré kroky pracovního postupu veškerých hřídelí za posledního půl roku provozu. Jedna tabulka se vztahovala k hřídelím pro uložení na ložiska valivá, druhá k hřídelím pro ložiska kluzná. První krok tedy spočíval ve výběru relevantních dat z těchto tabulek. Byla vyfiltrována pouze ta data, která se přímo vztahovala k procesům prováděným na stanovišti obrábění hřídelí.

Vzhledem ke značně kusovému charakteru výroby v tomto závodě by bylo obtížné provést simulaci pro celé toto časové období. Výsledky by navíc byly zřejmě velmi odlišné podle toho, jaké hřídele by se zrovna vyráběly. Z toho důvodu bylo po vyhodnocení celé tabulky rozhodnuto vybrat reprezentativní vzorek 10 hřídelí pro ložiska valivá a 10 hřídelí pro ložiska kluzná. Byly vybrány takové hřídele, které se nejčastěji vyskytovaly ve výrobních zakázkách a jejichž procesní plány a postupy byly zároveň dostatečně univerzální, aby poznatky získané na nich byly uplatnitelné pro co nejširší spektrum dalších hřídelí.

7.4 Sestavení procesního plánu

Následujícím krokem řešení pak bylo sestavení procesních plánů pro zpracování těchto celkem 20 hřídelí v rámci řešeného stanoviště. 20 takto získaných procesních plánů popisuje pohyb příslušné hřídele stanovištěm opracování hřídelí stejně jako i přípravné a procesní časy pro danou hřídel a daný stroj. Pro účely zveřejnitelnosti v rámci bakalářské práce byla označení hřídelí stejně jako příslušné časy a procesy zobecněny. Principiálně nicméně stále dobře reprezentují charakteristické vlastnosti, které by vykazovala i reálná data. Následující tabulka poskytuje přehled těchto dat použitých v rámci simulace.

Tab. 1: Procesní plán pro 20 charakteristických hřídelí

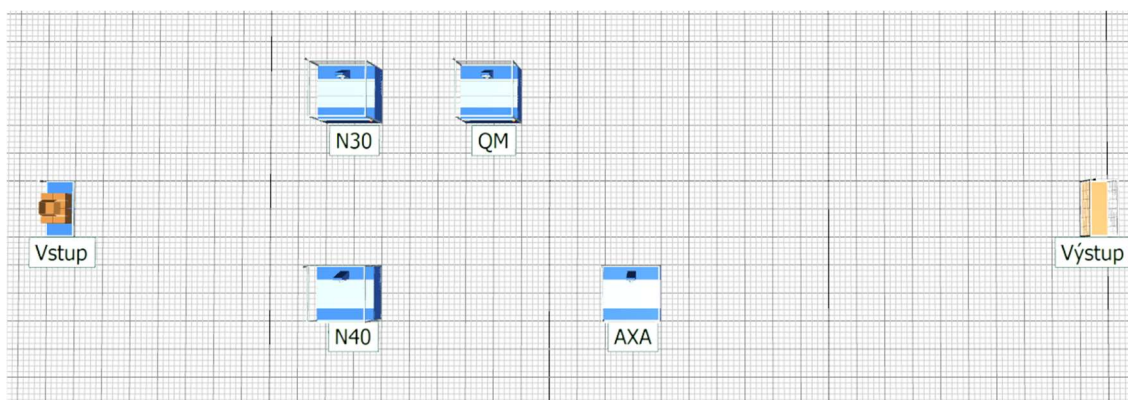
Hřídel	Stanoviště	Příp. čas	Stroj. čas	Hřídel	Stanoviště	Příp. čas	Stroj. čas
Hřídele pro valivá ložiska				Hřídele pro kluzná ložiska			
V1	N30	1:04:12	3:13:12	K1	N40	0:28:12	9:34:12
	QM	0:00:00	0:50:00		AXA	0:31:48	0:30:00
	Výstup				QM	0:00:00	0:20:00
V2	N30	1:04:12	2:24:36		Výstup		
	AXA	0:53:22	4:32:02	K2	N40	0:33:00	3:10:48
	QM	0:04:51	1:36:30		AXA	0:31:48	0:28:12
	Výstup				QM	0:04:51	1:36:30
V3	N30	0:31:48	0:24:00		Výstup		
	AXA	1:02:24	1:58:12	K3	N40	0:23:34	4:52:48
	QM	0:04:51	0:46:30		AXA	0:31:48	0:27:36
	Výstup				QM	0:00:00	0:20:00
V4	N30	0:31:48	0:28:12		Výstup		
	AXA	1:02:24	1:48:00	K4	N40	0:57:36	11:57:36
	QM	0:00:00	1:36:30		AXA	0:31:48	0:50:24
	Výstup				QM	0:00:00	0:20:00
V5	N30	0:31:48	0:28:12		Výstup		
	AXA	1:03:00	2:04:12	K5	N40	1:01:48	5:58:12
	QM	0:04:51	1:36:30		QM	0:00:00	0:20:00
	Výstup				Výstup		
V6	N30	0:31:48	0:28:12		K6	N40	0:22:12
	AXA	1:04:48	1:54:36	AXA		0:31:48	0:27:36
	QM	0:04:41	1:36:30	QM		0:00:00	0:20:00
	Výstup			Výstup			
V7	N30	0:31:48	0:28:48	K7	N40	0:23:24	2:51:36
	AXA	1:03:00	1:57:00		AXA	0:31:48	0:19:48
	QM	0:04:51	1:36:30		QM	0:01:56	0:32:22
	Výstup				Výstup		
V8	N30	0:31:48	0:25:48	K8	N40	0:57:36	10:30:36
	AXA	1:03:36	1:37:12		AXA	0:24:00	0:25:00
	QM	0:04:51	1:36:30		QM	0:00:00	0:20:00
	Výstup				Výstup		
V9	N30	0:31:48	0:22:12	K9	N40	0:22:12	5:30:36
	AXA	1:01:48	1:42:00		AXA	0:31:48	0:27:36
	QM	0:04:51	1:36:30		QM	0:00:00	0:20:00
	Výstup				Výstup		
V10	N30	0:31:48	0:28:48	K10	N40	1:14:10	9:21:01
	AXA	1:04:48	2:01:12		QM	0:00:00	0:20:00
	QM	0:00:00	0:50:00		Výstup		
	Výstup						

7.5 Zanesení dat do prostředí Tecnomatix Plant Simulation

7.5.1 Modelování pracoviště

Pro modelování výrobního systému byly využity 3 základní elementy z knihovny programu Plant Simulation:

- 1) **Source:** Tímto objektem je znázorněn vstup hřídelů na pracoviště. Je nastaveno rovnoměrné generování hřídelů z tabulky, ve které je uvedeno všech 20 uvažovaných hřídelů. V objektu source každá hřídel z pohledu simulace vzniká.
- 2) **Station:** Těmito objekty jsou modelovány soustruhy N30 respektive N40, frézovací centrum AXA, ale i kontrola kvality. Při vstupu na stanici pak každá hřídel upraví její parametry tak, aby přípravné a procesní časy odpovídaly časům z tabulky výše pro danou hřídel.
- 3) **Drain:** Pomocí objektu Drain je v simulaci řešen výstup hřídelů z pracoviště. Tento objekt umožňuje sledovat statistiky o prošlých hřídelích, vstupem do tohoto objektu hřídel z pohledu simulace zaniká.



Obr. 22 – Základní rozložení pracoviště v programu

7.5.2 Zanesení procesních plánů

Pro účely zanesení dat o procesních plánech a jednotlivých časech pro příslušné hřídele bylo využito takzvaných vnořených tabule (nested tables). První tabulka obsahuje seznam všech uvažovaných hřídelů jako samostatně definovaných objektů. Každý z těchto objektů má pak v posledním sloupci vloženou tabulku s atributy, v níž se nachází konkrétní procesní plán daného objektu. Následující obrázek přehledně zobrazuje příklad vnořené tabulky atributů pro jednu konkrétní hřídel.

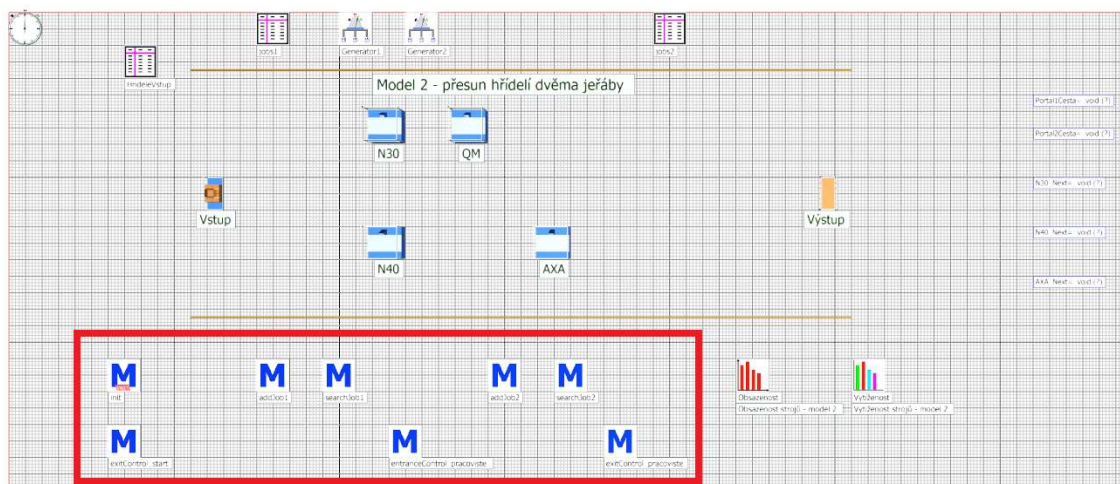
	object 1	real 2	integer 3	string 4	table 5
string	MU	Portion	Number	Name	Attributes
1	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V1	x
2	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V2	x
3	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V3	x
4	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V4	x
5	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V5	x
6	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V6	x
7	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V7	x
8	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V8	x
9	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V9	x
10	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_V10	x
11	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K1	x
12	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K2	x
13	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K3	x
14	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K4	x
15	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K5	x
16	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K6	x
17	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K7	x
18	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K8	x
19	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K9	x
20	.UserObjects.Hridel	5.00	1	Hridel_K10	x

	string 1	integer 2	time 3	time 4
string	Nazev atributu	Poradi	Pripravny cas	Strojni cas
1	Pozice	2		
2	N30		31:48.0000	25:48.0000
3	AXA		1:03:36.0000	1:37:12.0000
4	QM		4:51.0000	1:36:30.0000
5	Drain			

Obr. 23 - Vnořená tabulka atributů pro danou hřidel

7.5.3 Programování simulace prostřednictvím metod

Jak již bylo podrobněji rozeepsáno v rámci rozboru programu Tecnomatix Plant Simulation, pro účely přesného nastavení modelu se využívá takzvaných metod. Jedná se o úseky kódu v programovacím jazyce SIMTALK. Tyto úseky kódu mohou být volány buď periodicky po uběhnutí nastaveného času pomocí takzvaných generátorů, nebo v situaci, kdy v programu nastane určitá situace (například při vstupu materiálu na daný stroj). V rámci této simulace slouží metody k ovládání transportních prostředků (robotického ramene i jeřábu) či nastavování přípravných a procesních časů na příslušných strojích podle toho, jaká hřidel je aktuálně zpracovávána.



Obr. 24 - Použité metody (příklad pro variantu se dvěma jeřáby)

Metody umožňují v rámci svého chodu pracovat s proměnnými, využívat běžných programovacích cyklů FOR, WHILE či podmínek IF. Programovací jazyk SYMTALK je objektově orientovaným, přičemž atributy v rámci objektu adresujeme opět standardním způsobem pomocí tečky. Pro lepší představu je níže přiložen úryvek kódu jedné z metod zajišťující přesun hřídele ze vstupu pomocí prvního jeřábu na soustruh N30 či N40.

```
-- Identifikace vygenerovaného MU
var nazev:string
nazev := ?.cont.Name

-- Prirazení příslušné subtabulky + určení pozice kurzoru
var sloupec:integer
var radek:integer
var kurzor:integer

HrideleVstup.setCursor(1,1)
HrideleVstup.find(nazev)

sloupec := HrideleVstup.CursorX
radek := HrideleVstup.CursorY
HrideleVstup[sloupec+1,radek][2,1] := 2      -- Nastavení kurzoru na počáteční hodnotu
kurzor := HrideleVstup[sloupec+1,radek][2,1]

-- Nalezení následující stanice z procesního planu
var target:object
target := HrideleVstup[sloupec+1,radek][1,kurzor]

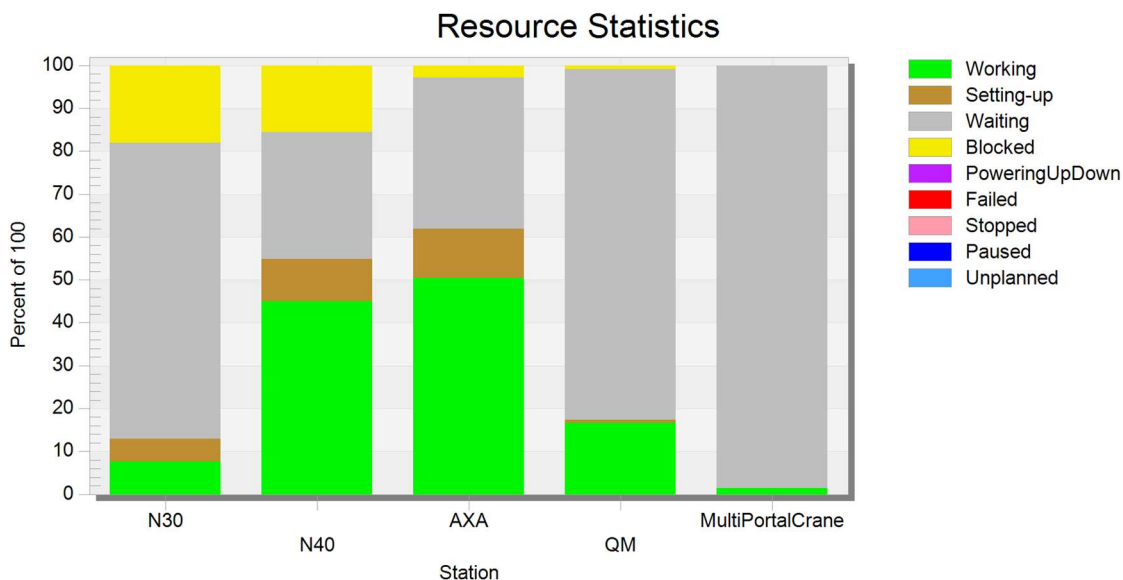
-- Čekání, dokud cílová stanice nebude volná
waituntil target.empty and Portal1Cesta /= target and Portal2Cesta /= target
addJob1(?,target)
Portal1Cesta := target
```

Obr. 25 - Úryvek kódu v jazyce SYMTALK

7.6 Výsledky pro jednotlivé simulované varianty

Jak již bylo uvedeno výše, vykazuje výroba v daném podniku značně kusový charakter. Abychom se vyhnuli zkreslení dat vlivem právě vygenerovaných hřídelí, byl pro simulaci zvolen delší časový úsek, konkrétně pak 5 dní.

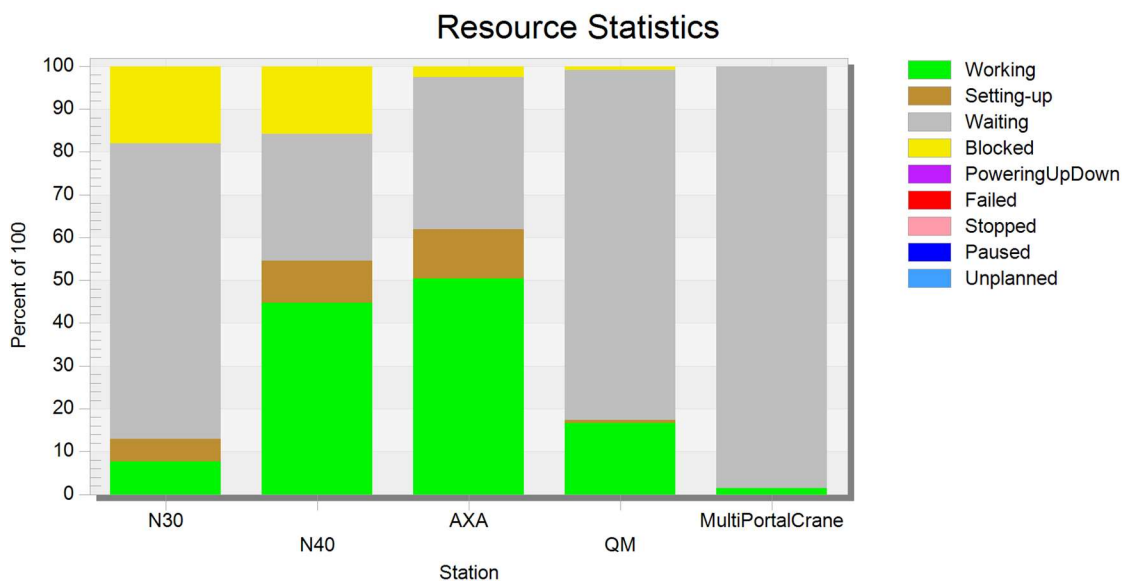
7.6.1 Přesouvání hřídelí pomocí jednoho jeřábu



Obr. 26 - Výsledky vytíženosti - varianta 1

Z výše uvedeného skládaného sloupcového grafu je evidentní, že nejvytíženějším zařízením, a tedy potenciálním úzkým místem je pro tuto variantu CNC frézovací centrum AXA. Je u něj největší podíl „Working“, tedy času, kdy stroj provádí práci, či z hlediska simulace času, kdy na stroji běží procesní čas. Jen o málo méně vytíženým je pak CNC soustruh N40. Jeho velká vytíženost plyne z jeho vyčlenění pro obrábění hřídelí s kluznými ložisky. Tyto hřídele mají totiž v porovnání s hřídelemi pro valivá ložiska obecně výrazně delší procesní časy. Oproti tomu soustruh N30 není zdaleka tolik vytížený, procesní časy na něm zpracovávaných hřídelí jsou totiž kratší. Za zmínku jistě stojí také velmi nízké vytížení jeřábu. Je tedy zřejmé, že jeřáb nebyl úzkým místem systému.

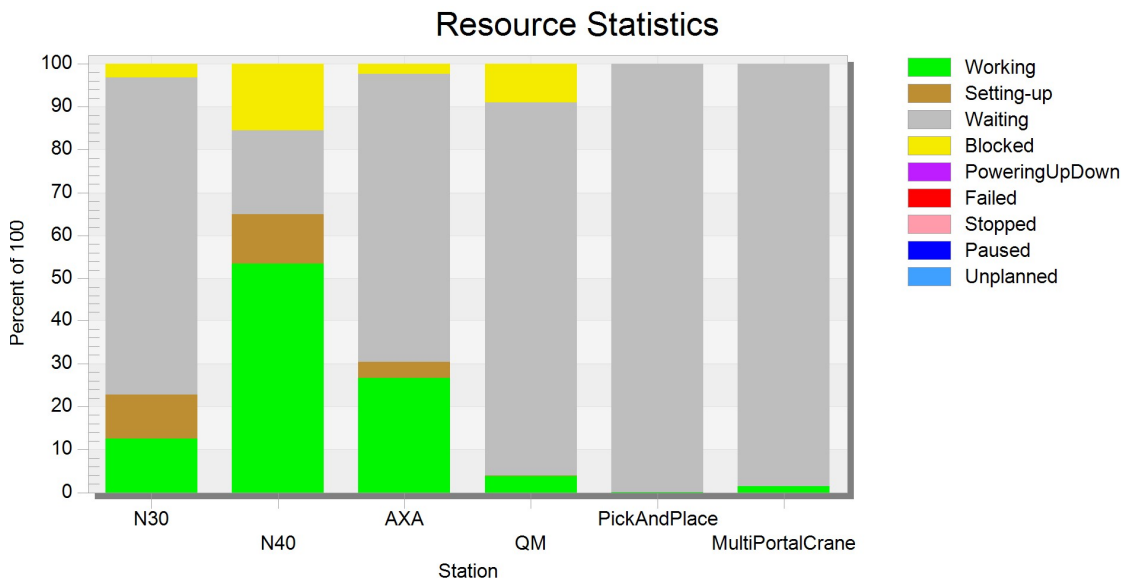
7.6.2 Přesouvání hřídelí pomocí dvou jeřábů



Obr. 27 - Výsledky vytíženosti - varianta 2

Na první pohled je patrné, že graf vytížení je pro variantu se dvěma jeřáby prakticky identický, jako pro situaci s jedním jeřábem. Toto zjištění tedy dále potvrzuje domněnku, že samotný jeřáb nebyl úzkým místem systému.

7.6.3 Přesouvání hřídelí pomocí robotického ramena a jeřábu



Obr. 28 - Statistika vytíženosti - varianta 3

Graf pro variantu s přesunem hřídele pomocí kombinace robotického ramena a jeřábu však již v porovnání s předchozími dvěma variantami vykazuje evidentní odlišnosti. Výrazně nejvytíženějším strojem je nyní CNC soustruh N40. Nárůst produkce na soustruhu N40 a pokles doby, kdy je zařízení ve stavu „Waiting“, jsou způsobeny ještě vyšší rychlostí robota v porovnání s jeřábem.

8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Prvním z cílů práce bylo provedení rešerše problematiky počítačové simulace diskrétních výrobních systémů. V první části práce byl v rámci aktuálních trendů v oblasti výroby podrobně rozveden koncept Průmysl 4.0 a jeho implementace. Jako jeden z důsledků uplatňování principů Průmyslu 4.0 byly pak detailně rozvedeny aspekty modelování, simulace a následné optimalizace výrobních systémů. Tohoto cíle tedy bylo dosaženo.

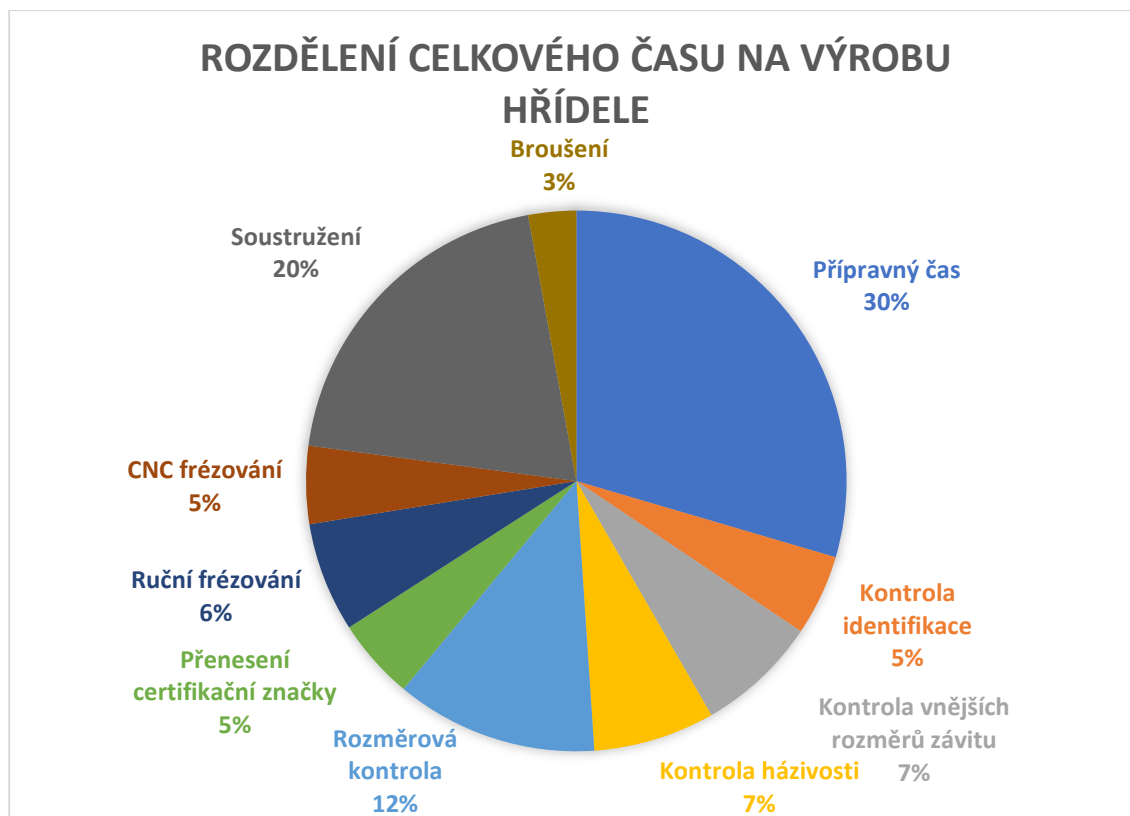
Druhým cílem bylo provedení analýzy pracoviště soustružení hřídelí. Před samotným zahájením modelování pracoviště byla provedena prohlídka celého výrobního procesu v daném podniku, přičemž důraz byl kladen zejména na zkoumané pracoviště. Byly identifikovány úlohy jednotlivých prvků na pracovišti, jejich vzájemné interakce a tok materiálu pracovištěm. I tento cíl byl tedy naplněn.

Třetím cílem pak bylo provedení simulace tří variant možného přesunu hřídelí pracovištěm – přesouvání hřídelí zajištěno jedním jeřábem, přesouvání hřídelí zajištěno dvěma jeřáby a přesouvání hřídelí součinností robotického ramene a jeřábu. Simulace všech tří variant se podařilo úspěšně zrealizovat včetně vykreslování relevantních údajů o systému do grafů pro snazší interpretaci, cíle tedy bylo dosaženo.

Čtvrtým cílem bylo nasimulovat řazení hřídelí do určitých rozměrů na jeden soustruh a hřídelí nad tento rozměr na soustruh druhý. Toto rozvržení zohledněno bylo, neboť materiál byl na základě svého procesního plánu přesouván tak, že menší hřídele pro valivá ložiska byla soustružena na soustruhu N30, zatímco větší hřídele pro kluzná ložiska na soustruhu N40. Cíl byl tedy dosažen.

Posledním a zároveň hlavním cílem bylo zhodnocení výstupů simulace. Z vykreslených grafů je na první pohled zřejmé, že instalace druhého jeřábu na stejné kolejnice neměla znatelný vliv na chod pracoviště. Čas přepravy hřídelí mezi jednotlivými stroji je v porovnání s pracovními časy na strojích zanedbatelný. Přeprava se pohybuje v řádu minut, opracování na strojích zpravidla v řádu desítek minut až hodin. Kombinace zapojení robotického ramene a jeřábu se však již na fungování pracoviště projevila. Nejvytíženějším strojem se místo CNC frézovacího centra stal CNC soustruh N40. Za zmínku stojí jistě nárůst celkové propustnosti, kdy za 5 simulovaných dní pro první dvě varianty bylo vyrobeno shodně 25 hřídelí, při zapojení robotického ramene vzrostla propustnost na 36 hřídelí. Tento nárůst spolu se změnou vytížení lze připočítat ještě vyšší rychlosti přepravy pomocí robotického ramene v porovnání s jeřábem. Robotické rameno tak vždy zajistí v rámci právě vyráběných hřídelí maximální možné vytížení obou soustruhů, přičemž jeřáb pouze odebírá osoustružené hřídele a předává je dále do procesu. I poslední z cílů práce byl tedy také dosažen.

Na první pohled ne zcela patrnou informací, kterou lze z grafů taktéž vyčíst, je vysoký procentuální podíl času, kdy jsou jednotlivé stroje ve fázi „Setting-up“. Z toho důvodu byla dodatečně provedena analýza složení jednotlivých časů u celého souboru hřídelí poskytnutého podnikem v počátečních fázích simulace. Toto složení bylo následně vyneseno do grafu, který je možné vidět na obrázku níže.



Z grafu je patrné, že největším dílem k celkovému času potřebnému na výrobu hřídele přispívá přípravný čas. Do budoucna by tedy bylo vhodné zaměřit se na omezení těchto časů například pomocí řazení podobných hřídelů do sérií tak, aby stroje nebylo nutno po každé hřídeli přeseřizovat. Tato myšlenka sice překračuje rámec této práce, nicméně jelikož se jedná o reálný výrobní systém, je vhodné na ni poukázat.

9 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na počítačovou simulaci výrobních procesů. Důležitost simulace a v důsledku tedy i simulačních nástrojů výrazně roste zejména v poslední dekádě, a to díky aplikaci principů konceptu Průmyslu 4.0. V rámci simulace pracoviště je často vhodné ověřit či vůči sobě porovnat více možných variant řešení.

V rámci této práce byly prostřednictvím počítačové simulace porovnány tři různé způsoby přesouvání hřídelí mezi konkrétním pracovištěm na opracování hřídelí konkrétního podniku zabývajícího se výrobou elektromotorů. První možností, která představovala variantu v daném podniku využívanou v minulosti, je zajištění veškerých přesunů jedním jeřábem. Druhá varianta, která je aktuálně v praxi uplatňována, je přesun pomocí dvou mostových jeřábů na téže kolejnici. Poslední varianta, kdy se na přesunu podílí robotické rameno v kombinaci s jeřábem, je pak jednou z variant, která je v rámci daného podniku uvažována do budoucna.

Z výsledků simulačního běhu vyplynulo, že instalace druhého jeřábu měla jen minimální vliv na tok materiálu pracovištěm. Propustnost se pak nezvýšila vůbec. Přesto však lze pro instalaci druhého jeřábu nalézt opodstatnění. Tím může být například zvýšení spolehlivosti pracoviště jako celku. Jeřáby se díky umístění na týchž kolejnicích mohou v případě poruchy jednoho z nich vzájemně nahradit. Tato vlastnost je zejména důležitá, uvažujeme-li, že toto pracoviště je v rámci celé výroby nezastupitelné a jeho odstávka by tedy znamenala zastavení celé produkce.

Zajímavým poznatkem pak byla velikost vlivu instalace robotického ramene zajišťujícího zásobování prvních dvou strojů na pracovišti, tedy CNC soustruhů N30 a N40. Zapojením robotického ramene se změnila vytíženost jednotlivých strojů, a dokonce i citelně vzrostla propustnost pracoviště. Než by však bylo možné i u reálné předlohy tohoto systému uplatnit přesouvání pomocí robotického ramene, bylo by nejdříve nutné vyřešit problém samotného uchycení hřídelí na toto rameno.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUKASZEWICZ, A., Grzegorz SKORULSKI a Ryszard SZCZEBIOT. The main aspects of training in the field of computer-aided techniques (CAx) in mechanical engineering. In: *Proceedings of 17th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development*. 2018, s. 865–870.
- [2] MOURTZIS, D., M. DOUKAS a D. BERNIDAKI. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **25**, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution, 213–229. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2014.10.032
- [3] AFAZOV, S. M. Modelling and simulation of manufacturing process chains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2013, **6**(1), 70–77. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2012.10.005
- [4] HERNANDEZ-MATIAS, J. C., A. VIZAN, A. HIDALGO a J. RIOS. Evaluation of techniques for manufacturing process analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* [online]. 2006, **17**(5), 571–583. ISSN 1572-8145. Dostupné z: doi:10.1007/s10845-006-0025-1
- [5] LASI, Heiner, Peter FETTKE, Hans-Georg KEMPER, Thomas FELD a Michael HOFFMANN. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* [online]. 2014, **6**(4), 239–242. ISSN 1867-0202. Dostupné z: doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- [6] RAMI 4.0 - ISA. *isa.org* [online]. [vid. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr>
- [7] MELZER, Bettina. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). nedatováno.
- [8] *Úvod do problematiky a základní modely Industry 4.0* [online]. [vid. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/uvod-do-problematiky-a-zakladni-modely-industry-4.0.htm>
- [9] EDEN, Peter, Andrew BLYTH, Kevin JONES, Hugh SOULSBY, Pete BURNAP, Yulia CHERDANTSEVA a Kristan STODDART. SCADA System Forensic Analysis Within IIoT. In: Lane THAMES a Dirk SCHAEFER, ed. *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [vid. 2023-05-19], Springer Series in Advanced Manufacturing, s. 73–101. ISBN 978-3-319-50660-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-50660-9_4
- [10] VENANZI, Benedetta. Industry 4.0 technologies adoption: evidences from Italian SMEs in the manufacturing sector. nedatováno.
- [11] KERSTEN, Wolfgang, Thorsten BLECKER, Christian M. RINGLE, TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG a TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, ed. *Digitalization in supply chain management and logistics: smart and digital solutions for an industry 4.0 environment*. 1st edition. Berlin: epubli GmbH, 2017. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), 23. ISBN 978-3-7450-4328-0.

- [12] *Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective* | Elsevier Enhanced Reader [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpe.2019.107546
- [13] CRNJAC, Marina, Ivica VEŽA a Nikola BANDUKA. From Concept to the Introduction of Industry 4.0. nedatováno.
- [14] LEUNG, Y.-T. a R. SURI. Performance evaluation of discrete manufacturing systems. *IEEE Control Systems Magazine* [online]. 1990, **10**(4), 77–86. ISSN 2374-9385. Dostupné z: doi:10.1109/37.56281
- [15] HRUBY, Martin. Modelování a simulace [online]. 2020. Dostupné z: <http://perchta.fit.vutbr.cz/vyuka-ims/uploads/1/IMS-20.pdf>
- [16] DORDA, Ing Michal. Úvod do modelování a simulace systémů. nedatováno.
- [17] FISHWICK, Paul A. *Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds*. B.m.: Prentice Hall, 1995. ISBN 978-0-13-098609-2.
- [18] MBOUP, Pape Adama, Karim KONATÉ a Jean LE FUR. A multi-world agent-based model working at several spatial and temporal scales for simulating complex geographic systems. *Procedia Computer Science* [online]. 2017, **108**, International Conference on Computational Science, ICCS 2017, 12-14 June 2017, Zurich, Switzerland, 968–977. ISSN 1877-0509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2017.05.090
- [19] BANKS, Jerry. Introduction to simulation. In: *the 31st conference: Proceedings of the 31st conference on Winter simulation Simulation---a bridge to the future - WSC '99* [online]. Phoenix, Arizona, United States: ACM Press, 1999, s. 7–13 [vid. 2023-05-19]. ISBN 978-0-7803-5780-8. Dostupné z: doi:10.1145/324138.324142
- [20] ROBINSON, Stewart. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. B.m.: Bloomsbury Publishing, 2014. ISBN 978-1-137-32803-8.
- [21] INGALLS, Ricki G. Introduction to simulation. In: *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)* [online]. 2011, s. 1374–1388. ISSN 1558-4305. Dostupné z: doi:10.1109/WSC.2011.6147858
- [22] Chapter 1: Introduction to Simulation. *Plant Simulation* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://plant-simulation.de/schulungen/tutorial/tutorial-chapter1/>
- [23] NOVÁK, Ivo. *Optimalizace výrobních systémů využitím simulačních modelů* [online]. B.m., 2012 [vid. 2023-05-25]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/zfm8od/>
- [24] KARAGIANNIS, Panagiotis, Theodoros TOGIAS, George MICHALOS a Sotiris MAKRIS. Operators Training Using Simulation And VR Technology. *Procedia CIRP* [online]. 2021, **96**, 8th CIRP Global Web Conference – Flexible Mass Customisation (CIRPe 2020), 290–294. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.01.089
- [25] *AccessReady XR: Virtual Reality Training from JLG* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.jlg.com/en/destination/virtual-reality-training>
- [26] ARISHA, A a M El BARADIE. ON THE SELECTION OF SIMULATION SOFTWARE FOR MANUFACTURING APPLICATION. nedatováno.

- [27] *Manufacturing Simulation Software | Simul8* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.simul8.com/applications/manufacturing/>
- [28] *WITNESS Simulation Modeling Software | Lanner* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.lanner.com/en-gb/technology/witness-simulation-software.html>
- [29] WITNESS: App Reviews, Features, Pricing & Download. *AlternativeTo* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://alternativeto.net/software/witness-simulation/about/>
- [30] Tecnomatix digital manufacturing software | Siemens software. *Siemens Digital Industries Software* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/>
- [31] DE FELICE, F. a A. PETRILLO. Optimization of Manufacturing System through World Class Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2015, **48**(3), 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 741–746. ISSN 2405-8963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.171
- [32] DUVIVIER, D., V. DHAEVERS, V. BACHELET a A. ARTIBA. Integrating simulation and optimization of manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* [online]. 2003, **33**(2), 186–192. ISSN 1558-2442. Dostupné z: doi:10.1109/TSMCC.2003.914037
- [33] SUBRAMANIYAN, Mukund, Anders SKOOGH, Azam Sheikh MUHAMMAD, Jon BOKRANTZ, Björn JOHANSSON a Christoph ROSER. A generic hierarchical clustering approach for detecting bottlenecks in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2020, **55**, 143–158. ISSN 0278-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2020.02.011
- [34] Railway Wheel Set Maintenance, Production. *NSH USA Corporation* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://nsh-usa.com/>
- [35] Mach4metal is specialised in buying and selling used metalworking machines for the industry. -. *Mach4Metal* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://mach4metal.com/en/https://mach4metal.com/en>
- [36] Jeřáby a manipulační technika. *HALOVÉ OBJEKTY* [online]. [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.haloveobjekty.cz/jeraby/>
- [37] *Montáž a servis mostových jeřábů - Svitavy | KRANTECHNIK* [online]. 22. srpen 2022 [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://krantechnik.cz/mostove-jeraby>
- [38] *Průmyslový robot FANUC M-2000iA/1200 - Fanuc* [online]. [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/řada-m-2000/m-2000ia-1200>

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 - Model RAMI 4.0 - převzato z [8], upraveno.....	18
Obr. 2 - Životní cyklus výrobního systému – převzato z [14], upraveno	21
Obr. 3 - Konceptuální model – závaží na pružině, převzato z [15], upraveno	23
Obr. 4 - Petriho sítě, převzato z [15], upraveno.....	23
Obr. 5 - Funkcionální model, převzato z [15], upraveno.....	24
Obr. 6 - Prostorový model, převzato z [18], upraveno	25
Obr. 7 - Vzájemné vztahy modelů, vlastní tvorba dle [17].....	25
Obr. 8 - Princip modelování a simulace – převzato z [15], upraveno	26
Obr. 9 - Aplikace AR pro školící účely – převzato z [25].....	30
Obr. 10 - Trenažér pro výuku obsluhy jeřábu - převzato z [25], upraveno	30
Obr. 11 - Uživatelské prostředí programu SIMUL8 - převzato z [27]	32
Obr. 12 - Uživatelské prostředí programu Witness - převzato z [29].....	33
Obr. 13 - Uživatelské prostředí v programu Tecnomatix Plant Simulation	34
Obr. 14 - Schématický nákres simulovaného výrobního stanoviště.....	37
Obr. 15 - CNC soustruh stejného typu jako N30 – převzato z [34].....	38
Obr. 16 - CNC soustruh stejného typu jako N40 - převzato z [34]	38
Obr. 17 – CNC frézovací centrum stejného typu jako AXA – převzato z [35].....	39
Obr. 18 - Grafické znázornění procesního plánu.....	39
Obr. 19 - Mostový jeřáb - převzato z [36], upraveno	40
Obr. 20 - Dva mostové jeřáby na téže kolejnici - převzato z [37], upraveno	41
Obr. 21 - Příklad průmyslového robota pro vysoká zatížení - převzato z [38].....	42
Obr. 22 – Základní rozložení pracoviště v programu	44
Obr. 23 - Vnořená tabulka atributů pro danou hřídel	45
Obr. 24 - Použité metody (příklad pro variantu se dvěma jeřáby.....	46
Obr. 25 - Úryvek kódu v jazyce SYMTALK	46
Obr. 26 - Výsledky vytíženosti - varianta 1	47
Obr. 27 - Výsledky vytíženosti - varianta 2.....	48
Obr. 28 - Statistiky vytíženosti - varianta 3	48
Tab. 1: Procesní plán pro 20 charakteristických hřídelí	43

PŘÍLOHY

model1_jedenJerab.spp

model2_dvaJeraby.spp

model3_ramenoPlusJerab.spp