

Technická univerzita v Liberci

**Fakulta strojní
Katedra výrobních systémů**



**ASPEKTY A APLIKAČNÍ MOŽNOSTI
MODERNÍCH SIMULAČNÍCH SYSTÉMŮ**

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071336

HABILITAČNÍ PRÁCE

Dr. Ing. František Manlig

Liberec 1999

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Univerzitní knihovna

Voroněžská 1329, Liberec 1

PSČ 461 17

U334 8

442.1.1.1
442.1.1.1

U334

Dr. Ing. MANLIG

Od: "Zdenka Machotkova" <TYTO/ZDENKA_MACHOTKOVA>
Organizace: Technical University of Liberec
Komu: jirina_cechova
Datum odeslání: Thu, 29 Jun 2000 12:59:43 +0200
Víc: název habil. práce Dr. Manliga v anglictine
Poštovní prog.: Pegasus Mail for Windows (v2.54CZ)

Nazdar Jirino,
včera jsem odnesla do knihovny 2 výtisky habilitační práce Dr.
Manliga, ale zapomněla jsem na název v anglictine.

Ten zní :

Aspects and application possibilities of the modern simulating
systems.

Zdenka Machotkova

ASPEKTY A APLIKAČNÍ MOŽNOSTI MODERNÍCH SIMULAČNÍCH SYSTÉMŮ

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071336

HABILITAČNÍ PRÁCE

Dr. Ing. František Manlig

Liberec 1999

U334 8

942, 1. vyd.
ob. tab.

Anotace

Aspekty a aplikační možnosti moderních simulačních systémů

V dnešní době vysoké dynamiky a komplexnosti podnikových úloh, a tím i vysokého rizika chybných rozhodnutí, získává počítačová simulace vzhledem k její schopnosti napodobovat a předpovídat chování zkoumaného systému stále více na významu.

Práce se zaměřuje na počítačovou simulaci diskretních událostí a pojednává o jejím významu pro podnikovou praxi. Jejím cílem je poukázat na efektivnost využívání moderních simulačních systémů a na konkrétních praktických příkladech prezentovat široké možnosti jejich uplatnění při řešení komplexních a dynamických úloh z oblasti projektování, analýz, „optimalizace“ a řízení výrobních systémů. V publikaci je rovněž rozpracována metodologie simulačního projektu. Hlavní důraz je přitom kladen na ty činnosti, které jsou nezbytné pro efektivní a „správné“ využití jak moderních simulačních prostředků, tak i lidského potenciálu.

Kurzfassung

Aspekte und Applikationsmöglichkeiten der modernen Simulationssysteme

Die Arbeit befaßt sich mit der Problematik der Rechnersimulation von diskreten Ereignissen und beschreibt ihre Bedeutung für die betriebliche Praxis. Das Ziel der Publikation ist, auf die Effektivität der Nutzung von modernen Simulationssystemen zu zeigen und dies auf konkreten praktischen Beispielen aus dem Bereich der Projektierung, Analysen, „Optimierung“ und Steuerung von Fertigungssystemen zu präsentieren. In der Arbeit ist auch die Methodologie des Simulationsprojektes durchgearbeitet. Dabei sind diejenige Schritte hervorgehoben, die für die effektive und „richtige“ Nutzung sowohl der modernen Simulationsmittel, als auch des Menschenpotentials nötig sind.

Summary

Aspects and application possibilities of the modern simulating systems

Work deals with the computer simulation of discrete events as well as its value for the industrial use. The objective is to demonstrate modern simulating systems as effective tool for solving complex dynamical tasks related with design, analysis, optimisation and control of the manufacturing systems. The publication also presents methodology of simulation design. Emphases are placed on correct and effective use of the simulation software and the manpower as well.

Předmluva

Tato práce vznikla během mé práce odborného asistenta na Katedře výrobních systémů, Fakulty strojní, Technické univerzity v Liberci. Odrazily se v ní nejen zkušenosti z pedagogické a vědeckovýzkumné činnosti, ale i z řady projektů vypracovaných zejména pro strojírenský průmysl.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat hlavně své rodině a svým rodičům za jejich trpělivost a podporu, které se mi z jejich strany dostávalo.

Rovněž bych chtěl poděkovat všem spolupracovníkům Katedry výrobních systémů za veškeré náměty a připomínky, které napomohly ke vzniku této práce.

Obsah	
Seznam zkratk	5
Seznam nejdůležitějších pojmů	6
0 Úvod	7
0.1 Úvod do problematiky	7
0.2 Cíl práce	8
0.3 Členění práce	8
1 Moderní podnikové koncepce	9
1.1 Změna v myšlení podniku	9
1.2 Inovace podnikových procesů	10
1.3 Počítačová simulace podnikových procesů	11
2 Modelování výrobních systémů	14
2.1 Zefektivňování provozu výrobních systémů	14
2.2 Analytické modelování výrobních systémů	15
2.3 Princip počítačové simulace výrobních systémů	15
2.4 Analytické modelování versus počítačová simulace	16
3 Počítačová simulace - klíčová technika průmyslového inženýrství	19
3.1 Proč využívat počítačovou simulaci	19
3.2 Využití počítačové simulace	22
3.3 Přínosy a náklady simulace	25
3.4 Simulační nástroje	27
4 Metodologie zpracování simulační studie	29
4.1 Simulační projekt	29
4.2 Definování simulačního projektu	32
4.3 Tvorba simulačního modelu	35
4.4 Experimentování	39
4.5 Dokončení simulačního projektu	42
4.6 Zavádění počítačové simulace	44

5	Příklady využití	46
5.1	Stručná charakteristika simulačního systému Witness™	46
5.2	Projektování výroby	47
5.2.1	Definování projektu	47
5.2.2	Tvorba modelu	48
5.2.3	Experimentování	49
5.2.4	Dokončení projektu	53
5.3	Analýza a zlepšování stávajícího výrobního systému	54
5.3.1	Definování projektu	54
5.3.2	Tvorba modelu	54
5.3.3	Experimentování	55
5.3.4	Dokončení projektu	56
5.4	Řízení výroby	57
5.4.1	Definování projektu	57
5.4.2	Tvorba modelu	58
5.4.3	Experimentování	59
5.4.4	Dokončení projektu	60
5.5	Školení pracovníků	61
5.5.1	Definování projektu	61
5.5.2	Tvorba modelu	61
5.5.3	Experimentování	61
5.5.4	Dokončení projektu	62
5.6	Porovnání přínosů a nákladů simulačních projektů	63
6	Závěr	64
	Seznam literatury	66
	Seznam příloh	76

Seznam zkratek

CAX	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided ...	Počítačová podpora v oblasti ...
CAE	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>E</u> ngineering	Počítačem podporovaný vývoj
CAN-Q	<u>C</u> omputer <u>A</u> nalysis of <u>N</u> etworks of <u>Q</u> ueues	Počítačová analýza obslužných sítí
CIE	<u>C</u> omputer <u>I</u> ntegrated <u>E</u> nterprises	Počítačem integrovaný podnik
CIM	<u>C</u> omputer <u>I</u> ntegrated <u>M</u> anufacturing	Počítačem integrovaná výroba
CIP	<u>C</u> ontinuous <u>I</u> mprovement <u>P</u> rocess	Neustálé zlepšování procesů
CQN	<u>C</u> losed <u>Q</u> ueuing <u>N</u> etwork <u>M</u> odel	Model uzavřených obslužných sítí
FEM	<u>F</u> inite <u>E</u> lements <u>M</u> ethod	Metoda konečných prvků
FIFO	<u>F</u> irst- <u>I</u> n- <u>F</u> irst- <u>O</u> ut	První dovnitř, první ven
JIT	<u>J</u> ust in <u>T</u> ime	Právě včas
KAIZEN		Neustálé zlepšování procesů
KANBAN		Princip řízení „TAHEM“
KVP	<u>K</u> ontinuierlicher <u>V</u> erbesserungsproceß	Neustálé zlepšování procesů
MOST	<u>M</u> aynard <u>O</u> peration <u>S</u> equence <u>T</u> echnique	Maynardova technika určování posloupnosti činností
MRP II	<u>M</u> anufacturing <u>R</u> esource <u>P</u> lanning	Plánování výrobních zdrojů
MTM	<u>M</u> ethod <u>T</u> ime <u>M</u> easurement	Metoda předem určených časů
MVAQ	<u>M</u> ean- <u>V</u> alue <u>A</u> nalysis of <u>Q</u> ueues	Analýza středních hodnot front
PLC	<u>P</u> rogrammable <u>L</u> ogic <u>C</u> ontroller	Programovatelný automat
POKA-YOKE		Zabraňování chybám
PSA	<u>P</u> roduction <u>S</u> ystems <u>A</u> nalyser	Analýzátor výrobních systémů
SE/CE	<u>S</u> imultaneous/ <u>C</u> oncurrent <u>E</u> ngineering	Paralelní, integrovaný vývoj (simultánní inženýrství)
TPM	<u>T</u> otal <u>P</u> roductive <u>M</u> aintenance	Produktivní údržba
TQM	<u>T</u> otal <u>Q</u> uality <u>M</u> anagement	Celopodnikové řízení kvality
VDI	<u>V</u> erein <u>D</u> eutscher <u>I</u> ngenieur	Svaz německých inženýrů

PROMODEL® registrovaná známka fy Promodel, Corp.
QUEST® registrovaná známka fy Deneb Robotics, Inc.

ARENA™ ochranná známka fy Systems Modelling Corp.
SIMPLE++™ ochranná známka fy Tecnomatix Technologies Ltd.
WITNESS™ ochranná známka fy Lanner Group Ltd.

Seznam nejdůležitějších pojmů

Diskrétní simulace	- simulace diskretních systémů, tzn. „stavy modelu se mění jen v diskretních okamžicích, tj. v okamžicích výskytu určitých událostí“ [GRE-92].
Diskrétní systémy	- systémy, kde změna stavu (událost) „nastává diskretně v určitých časových okamžicích, které mohou být náhodné“ [NEU-88].
Doba simulace	- rozdíl simulačního času na konci a na začátku simulace.
Experimentování	- „cílené empirické zkoumání chování modelu opakováním simulačních běhů se systematickou změnou parametrů“ [VDI-93].
Kódování modelu	- vlastní tvorba modelu v simulačním prostředí.
Model	- „zjednodušené zobrazení reality nebo záměru, na kterém se dají studovat vlastnosti, které se považovaly za problematické“ [HAN-82].
Proces	- „posloupnost stavů prvků v časovém intervalu“ [PID-90].
Realizace simulačního modelu	- „jedno dosazení veličin do simulačního modelu“ [HAN-82].
Simulace	- „numerická metoda počítačového experimentování s modelem popisujícím chování složitých systémů v průběhu delších intervalů času“ [HAN-82].
Simulační běh	- posloupnost opakovaných realizací simulačního modelu.
Simulační čas	- čas modelu.
Simulační experiment	- „soubor opakovaných simulačních běhů, ve kterých může v modelu docházet ke změnám“ [NEU-88].
Simulant	- odborník na simulaci.
Simulátor	- programový nástroj pro vykonávání simulačních experimentů.
Událost	- „každá změna stavu systému“ [NEU-88].
Validace modelu	- makrokontrola konečného modelu (ověření platnosti konečného modelu).
Verifikace modelu	- mikrokontrola během programování modelu (postupné ověřování funkčnosti modelu).

0. Úvod

0.1 Úvod do problematiky

Tvrdý konkurenční boj a tzv. „turbulentní“ prostředí vyžaduje využívání takových metod a podpůrných nástrojů, které umožňují vyzkoušet a zvážit různé varianty řešení, a tím minimalizovat rizika chybných rozhodnutí. Stále větší důraz se tak klade na počítačovou simulaci, která se díky svým schopnostem napodobovat zkoumané procesy stává významným pomocníkem práce jednotlivých pracovníků.

Zatímco se počítačová simulace v oblasti konstrukčních prací (např. FEM simulace napětíových polí na bázi konečných prvků) a NC obrábění (simulace dráhy nástroje) pomalu stává základem práce konstruktérů a technologů, praktické využívání diskrétní simulace v oblasti výrobních, logistických a obchodních procesů je u nás stále ještě v „plenkách“, a téměř se nepoužívá.

Je zajímavé, že i přes velmi dobré teoretické zázemí (viz např. [HAN-82], [MOJ-88], [NEU-88], [PID-90], [GRE-92]) hlavním důvodem, který brání výraznému rozšíření počítačové simulace diskrétních událostí do průmyslu, stále zůstává „nízká“ úroveň znalostí potřebných pro její efektivní využívání.

Tim však nejsou myšleny ani tak teoretické znalosti z oboru diskrétní simulace. Pro úspěšné zavádění počítačové simulace je rovněž důležitá povědomost o důvodech pro její nasazení (tzn. vědět „proč zavádět“), o jejich přínosech, ale i slabých stránkách, o vývoji a možnostech využití moderních simulačních systémů včetně řady podpůrných prostředků, a v neposlední řadě i o „správném“ přístupu ke zpracování simulační studie.

Tyto, takřka základní informace, jsou však často roztržštěné, popř. nedostupné (velmi častý je nezájem o sdílení informací a zkušeností, protože se jedná o firemní Know-How). Potřebné informace se proto musí „pracně“ vyhledávat a získávat. Řešení problémů pomocí počítačové simulace se tak stále přehlíží a podceňuje („My ji nepotřebujeme“, „My ji nevyužijeme“, „Je příliš drahá“, „Nám stačí to co máme“ apod.).

Této situaci paradoxně napomáhá i to, že moderní simulační systémy značně usnadňují zpracování simulačního projektu. To však stále více svádí k podceňování tzv. přípravných činností (analýza problému, definování projektu, stanovení podrobnosti modelu, sběr dat, příprava experimentů, atd.), které jsou nezbytné k efektivnímu zpracování celého simulačního projektu. Výsledkem potom může být jak „rozladění“ z výsledků simulačního projektu, tak i neefektivní využití „drahých“ simulačních prostředků a zejména lidského potenciálu.

Přes celou řadu odborných publikací, zejména zahraničních, u nás stále chybí ucelené znázornění problematiky využívání simulace výrobních systémů a zejména metodologie zpracování simulačního projektu, která by přihlížela k okolnosti, že počítačová simulace není „*pouhé vytvoření (programování) modelu a hraní si s ním*“. Efektivní využití jejich vlastností a schopností totiž spočívá hlavně v *důsledném zpracování celého simulačního projektu* a v *týmové práci* všech zainteresovaných odborníků.

Mnohdy to však znamená zásadně změnit „myšlení“ odpovědných pracovníků.

0.2 Cíl práce

Vzhledem k naznačené situaci a zejména ke světovému trendu jsou cíle předkládané práce zaměřeny na zodpovězení otázky:

„Proč a jak využívat počítačovou simulaci výrobních systémů?“

Prvním cílem práce je rozebrat a vysvětlit důvody pro využívání počítačové simulace při řešení komplexních a dynamických úloh z oblasti výrobních systémů.

Protože i práce s počítačovými prostředky vyžaduje „své“, je dalším, neméně důležitým cílem ucelené, detailní rozpracování metodologie simulační studie, což má přispět k zefektivnění práce s moderními simulačními systémy.

Posledním cílem je na konkrétních příkladech prezentovat aplikační možnosti moderních simulačních systémů.

0.3 Členění práce

Práce vychází z principů řízení moderního podniku a nastiňuje možnosti uspokojování požadavků zákazníka využitím moderních podpůrných nástrojů a metod. Přitom je zdůrazněna důležitost používání modelové techniky a zejména počítačové simulace při podpoře různých činností výrobního podniku.

Druhá kapitola se krátce věnuje modelování výrobních systémů. Slouží k podtržení hlavních rozdílů mezi využíváním analytických metod (analytického modelování) a počítačové simulace diskrétních událostí.

Následující tři kapitoly pojednávají výhradně o využití počítačové simulace výrobních systémů:

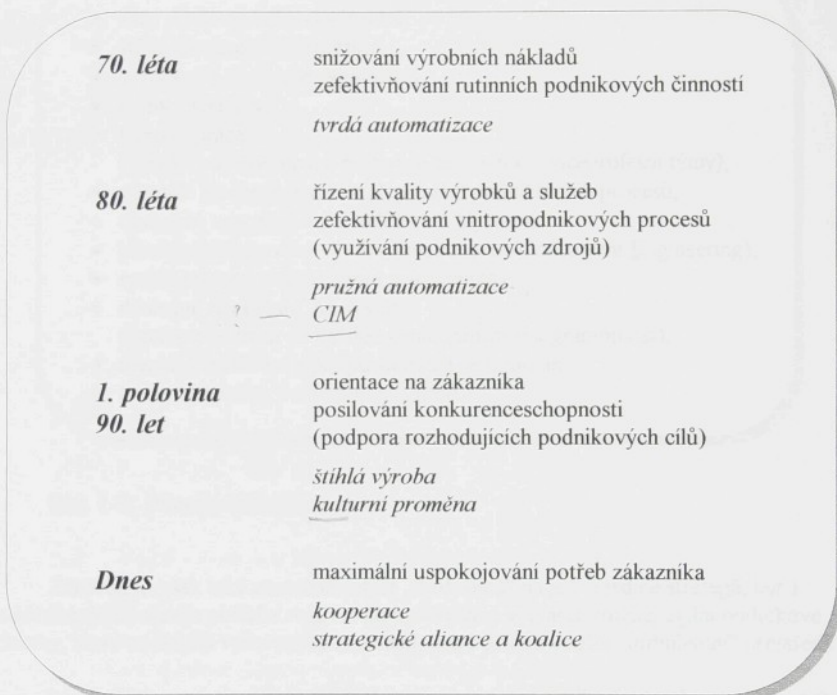
Třetí kapitola je zaměřena na zodpovězení otázky: „Proč využívat počítačovou simulaci diskrétních událostí“ a slouží ke zdůraznění úlohy diskrétní počítačové simulace při zvyšování produktivity a zisku podniku. V kapitole 4 je znázorněna metodika zpracování simulační studie, tzn. metodického postupu při vlastním plánování, provádění a vyhodnocování simulačních experimentů. Pátá kapitola ukazuje aplikační možnosti počítačové simulace na konkrétních příkladech.

V poslední kapitole je provedeno shrnutí práce.

1. Moderní podnikové koncepce

1.1 Změna v myšlení podniku

Změna tržních podmínek konce 80. let (konec studené války, globalizace trhu, silná konkurence, atd.) si vynutila zásadní změnu v pohledu na řízení podniku, která se odrazila v přehodnocení podnikových priorit a tím i dosavadních způsobů řízení (viz obr. 1-1).



Obr. 1-1. Priority podniku

Vedle převážně technicky orientované počítačové integrace (CIM/CIE, viz např. [KUR-97], [MAN-98c], [MOL-96], [ZEL-93a]) se proto začínají prosazovat i další filozofie řízení podniku, jako „Reengineering“, „Lean Production“, „Fraktálový podnik“, „Agilní výroba“, TQM, „Holonický podnik“, apod. (viz např. [KOŠ-93], [KOŠ-94b], [WAR-91], [WAR-93], [WES-92], [TOH-98] aj.), které zdůrazňují hlavně využívání organizačního a lidského potenciálu podniku.

Přes razantní vývoj v této oblasti i nesporné přínosy jednotlivých koncepcí však stále nelze jednoznačně říci, že některá z nich je právě ta „nejlepší“ a použitelná v „každém případě, pro každý podnik“.

To dokumentuje nejen používání stejných principů a metod v různých filozofiích (JIT, KAIZEN, simultánní inženýrství, týmová práce, výrokové uspořádání apod.), nýbrž i fakt, že každý podnik je svým způsobem „unikát“ (prostředí podnikání, velikost podniku, výrobní program, struktura pracovníků, apod.). V praxi se tedy musí jednat o kombinaci a prolínání jednotlivých principů (viz obr. 1-2), koncepci a metod s přihlédnutím ke specifikám konkrétního podniku.

- silný důraz na inovaci výrobků,
- štíhlá, horizontální struktura,
- výrokové, buňkové uspořádání,
- řízení „TAHEM“,
- týmová práce
(vysoká odpovědnost a motivace pracovníků, viceprofesní týmy),
- neustálé zjednodušování a zlepšování podnikových procesů,
- okamžité odstraňování všech forem plýtvání,
- paralelní/integrovaný vývoj (Simultaneous/Concurrent Engineering),
- rychlé prototypování (Rapid prototyping),
- důsledné zavádění CAX systémů
(neautomatizovat za každou cenu, informační gramotnost),
- neustálé sledování a přizpůsobování se trendům
(v řízení výroby, v technologii, apod.).

Obr. 1-2. Principy řízení moderního podniku

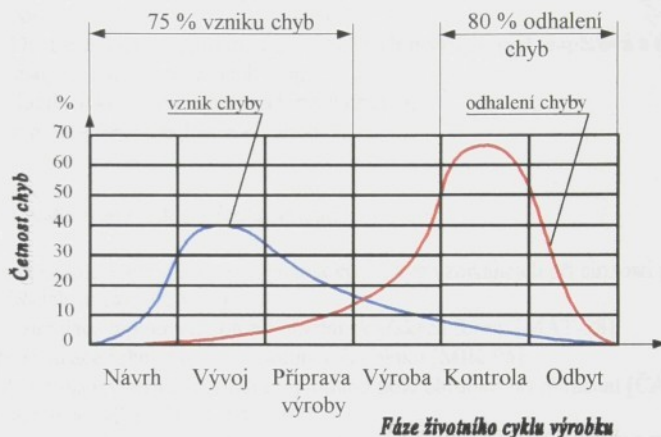
Zároveň to však také znamená nelpět „tvrději“ na jedné jediné strategii, byť i osvědčené. Stále více je potřeba se dívat do budoucna a vytvářet pružné, agilní podnikové jednotky, které se dokáží vyrovnat se změnami, které přináší dnešní „turbulentní“ prostředí.

Maximální uspokojování potřeb zákazníka a nutnost posilování konkurenceschopnosti podniku tedy vyžaduje neustálé sledování trendů a důslednou inovaci všech podnikových procesů.

1.2 Inovace podnikových procesů

Kláse důraz na inovaci podnikových procesů znamená zejména se snažit o jejich výrazné zkracování a zkvalitňování. Na jedné straně je proto třeba zavádět paralelní, integrovaný časový průběh jednotlivých činností, na straně druhé předcházením chyb „Jakost vyrábět a ne kontrolovat“.

Prakticky to znamená ve stále větší míře využívat principy a nástroje simultánního inženýrství (viz např. [KOŠ-94b], [WAR-93]) a zejména počítačovou simulaci, která umožňuje napodobovat a předvídat chování zkoumaných procesů. Tak lze výraznou měrou předcházet chybám a zkrátit časovou diferenci mezi výskytem a odhalením chyby na minimum (viz obr. 1-3). To je důležité především v oblasti předvýrobních procesů, které mohou ovlivnit až 80 % celkových výrobních nákladů.



Obr. 1-3. Možnost vzniku a odhalení chyb (pramen Pfaff Industriemaschinen GmbH [WES-92])

1.3 Počítačová simulace podnikových procesů

Princip a vlastnosti simulace dobře vystihuje Jan Petr [PET-86]:

„Simulace systémů: Experimentování na modelu systému. Získané a analyzované výsledky umožňují usuzovat na chování, vlastnosti a funkce modelovaného systému“.

„Simulace umožňuje napodobit chování, vlastnosti a funkce systému bez jeho skutečné realizace, která by jinak byla zcela nemožná nebo příliš nákladná, časově značně náročná či nepraktická vzhledem k povaze systému“.

Simulaci lze použít zejména tam, kde:

- je třeba zjistit zcela nové vlastnosti systému či chyby srovnatelné znalosti,
- komplexnost systému přesahuje lidskou představivost,
- systém nelze řešit analyticky,
- je nutné přezkoušet analytické řešení,
- experimentování s reálným modelem není možné, popř. je příliš nákladné.

Jak je znázorněno na obr. 1-4, je využití počítačové simulace všestranné a lze ji užít k podpoře takřka všech podnikových činností:

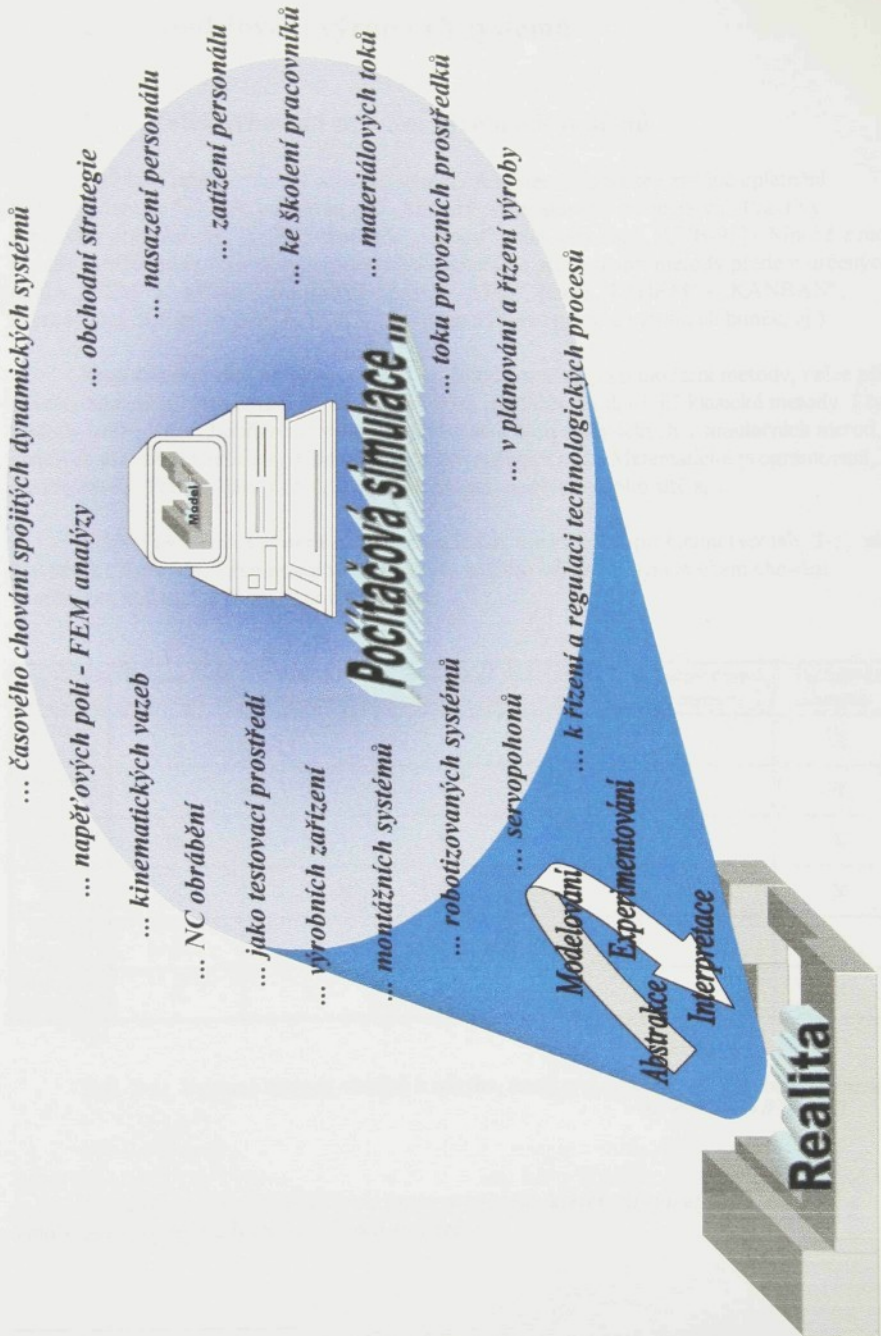
- spojitá simulace pro řešení spojitě popsaných procesů k analýze časového chování procesu,
- diskrétní simulace pro řešení diskrétních systémů - např. logistických systémů,
- speciální simulace:
 - 3D simulace pohybů - např. 3D simulace NC obrábění, 3D pohybová simulace obsluhy,
 - FEM simulace (využití metody konečných prvků) - např. napětěová a deformační analýza, analýza teplotních polí,
 - simulace kinematických vazeb mechanismů,
 - simulace servomechanismů, apod.

Vybrané realizované příklady jejího využití:

- Spojitá simulace při zjišťování dynamických chyb vznikajících při činnosti pohonů obráběcích strojů [SKA-98].
- FEM simulace teplotních polí při návrhu sklářských forem [MAT-98].
- FEM simulace tuhnutí odlitku motorového bloku [MIK-95].
- FEM simulace využitá při studiu teplotního pole obrobku při obrábění [ČÁP-97].
- 3D Simulace NC obrábění [CGT-97].
- Diskrétní simulace při rozvrhování výroby automobilových náprav [SIM-96].
- Diskrétní simulace při návrhu koncepce řízení simulátoru materiálového toku [KRI-97].

Další příklady lze najít v odborné literatuře (viz např. [KRU-96], [KUH-93], [REI-97], [ŠRA-98a]), na Internetových stránkách, popř. je lze získat z příslušných odborných pracovišť zabývajících se počítačovou simulací.

V dalších kapitolách bude věnována pozornost zejména počítačové simulaci diskrétních událostí (dále jen jako počítačová simulace) a její úloze při zefektivňování provozu výrobních systémů.



Obr. 1-4. Oblasti využití počítačové simulace

2. Modelování výrobních systémů

2.1 Zefektivňování provozu výrobních systémů

V oblasti zefektivňování provozu výrobních systémů nacházejí značné uplatnění metody, které se často shrnují do pojmů „Metody průmyslového inženýrství“, „Praktiky zvyšování produktivity“ či „Racionalizační metody“ apod. (viz např. [LUB-98]). Mnohé z nich si našly rychlé uplatnění v oblasti zlepšování organizace práce (např. metody předem určených časů - „MTM“ a „MOST“, zlepšování údržby - „TPM“, řízení „TAHEM“ - „KANBAN“, zabraňování chybám - „POKA-YOKE“, zavádění týmové práce a výrobních buněk, aj.).

Kromě těchto metod, které se dnes s oblibou označují jako moderní metody, nelze při návrhu, analýze a optimalizaci výrobních systémů přehlížet ani další, již klasické metody. I tyto metody totiž prošly „bouřlivým“ vývojem. Jedná se o řadu analytických a simulačních metod, známých převážně z teorie systémové a operační analýzy (např. Matematické programování, Teorie zásob, Teorie front a obslužných sítí, Síťová analýza, Petriho sítě aj.).

Použití těchto metod nezávisí pouze na řešení konkrétního problému (viz tab. 2-1), ale hlavně na vlastnostech zkoumaného systému, tj. na jeho velikosti, dynamickém chování, neurčitosti, nelinearitě či strukturní složitosti.

Metody Rozborů	Matematické programování	Metody Síťové analýzy	Teorie front/ obslužných sítí	Teorie zásob	Rozmíst'ovací metody	Počítačová simulace
Výrobní program	X					X
Průběžná doba		X	X			X
Stanovení kapacit	X	X	X			X
Využití prostředků	X		X			X
Velikost zásob	X		X	X		X
Dispoziční uspořádání	X	X	X		X	X

Tab. 2-1. Vybrané metody vhodné k návrhu, analýze a optimalizaci výrobních systémů
(upraveno podle [KEL-96c])

V následujících kapitolách bude proto provedeno krátké posouzení analytického¹ a simulačního přístupu k řešení výrobních systémů.

¹ Používání analytických metod se vzhledem k vytváření analytického modelu také často označuje pojmem analytické modelování.

2.2 Analytické modelování výrobních systémů

Nejznámější přístup k analytickému řešení výrobních systémů² vychází z teorie uzavřených obslužných sítí - CQN (Closed Queuing Network Model). Výrobní systém se modeluje jako síť vzájemně propojených obslužných kanálů. Vychází se přitom ze základního předpokladu, že počet požadavků v systému je neměnný, rozdělení vstupů a obsloužení požadavku mají exponenciální pravděpodobnostní rozdělení (jedná se tedy o síť jednotlivých M/M/c/FIFO/ ∞ / ∞ obslužných kanálů).

- M - exponenciální rozdělení příchodů požadavků a času jejich obsluhy
- c - počet paralelních obslužných kanálů
- FIFO - čekací fronta
- ∞ - kapacita fronty a obslužného kanálu
- ∞ - počet požadavků vstupujících do systému

Z uvedeného zápisu jsou na první pohled vidět zjednodušující předpoklady. Přestože se pro strojírenskou praxi jedná o značná zjednodušení (v praxi jsou složitá rozdělení, dochází k blokování obslouženého požadavku, pracuje se s omezenými kapacitami apod.), při splnění předpokladu ustáleného chování výrobního systému, může tato metoda poskytovat dostatečně přesné výstupní charakteristiky zkoumaného systému (např. průměrná délka fronty, doba čekání, očekávaná průběžná doba požadavku, využití pracovišť apod.), které lze použít pro prvotní návrh systému.

Zmíněný klasický model uzavřené obslužné sítě je rozpracován pro spoustu speciálních případů, které zpřesňují jeho výsledky (např. pro speciální palety, pro omezené kapacity zásobníků, pro blokování obslouženého požadavku a mnoho dalších, viz např. [TEM-92]).

Práci s analytickými modely výrazně zefektivňuje jejich počítačové zpracování. Nejznámější počítačovou aplikací je Stollbergův CAN-Q model (Computer Analysis of Networks of Queues, viz např. [GRE-92]).

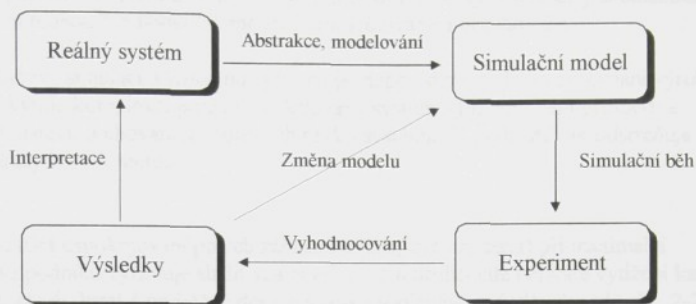
Na uvedený klasický model navazují i další modely a systémy jako např. MVAQ (Mean-Value Analysis of Queues), FFS-EVAL (Ein Programmsystem zur Leistungsanalyse flexibler Fertigungssysteme, viz [TEM-92]), popř. PSA (Production Systems Analyser, viz [REB-94]).

2.3 Princip počítačové simulace výrobních systémů

Principem počítačové simulace výrobních systémů je vytvoření počítačového modelu a experimentování s ním. Na tomto simulačním modelu, který je pokud možno přesným obrazem stochasticky se chovajícího výrobního systému, se simulují jednotlivé stavy systému (např. transport a obrábění určité součásti, porucha stroje atd.). Jejich změna je přitom závislá na čase a nastává diskrétně v okamžiku výskytu tzv. diskrétní události (např. začátek seřizování, začátek a konec obrábění, začátek poruchy apod.) [KEL-96c].

² Popsaný analytický přístup k analýze výrobních systémů se nazývá také jako stochastické modelování.

Cílem experimentování je nalezení takové varianty řešení, jejíž výstupní hodnoty vyhovují předem stanoveným požadavkům. Vstupní hodnoty této alternativy lze potom použít i pro reálný systém [KEL-96c] (viz obr. 2-1).



Obr. 2-1. Princip simulace

2.4 Analytické modelování versus počítačová simulace

Analytické metody vycházejí z široce rozpracovaného matematického aparátu. Analytický model je zpravidla tvořen účelovou (kriteriální) funkcí. Výsledky jsou tedy funkcí jednotlivých parametrů modelu. Cílem řešení je nalezení optimálních parametrů analytického modelu. Často se přitom jedná o matematické optimum 1. druhu, kdy hledáme maximum či minimum dané účelové (kriteriální) funkce.

Tyto metody se vyznačují relativní jednoduchostí a rychlostí výpočtu. Lze v nich často najít velmi jednoduché a účinné rozhodovací algoritmy i pro poměrně složité situace. V dnešní době přitom existuje na tisíce různých modifikací a vylepšení základních postupů a metod (viz např. [HAN-82], [LÍB-83], [NEU-88], [PET-86], [REB-94], [SIX-86], [TEM-92]).

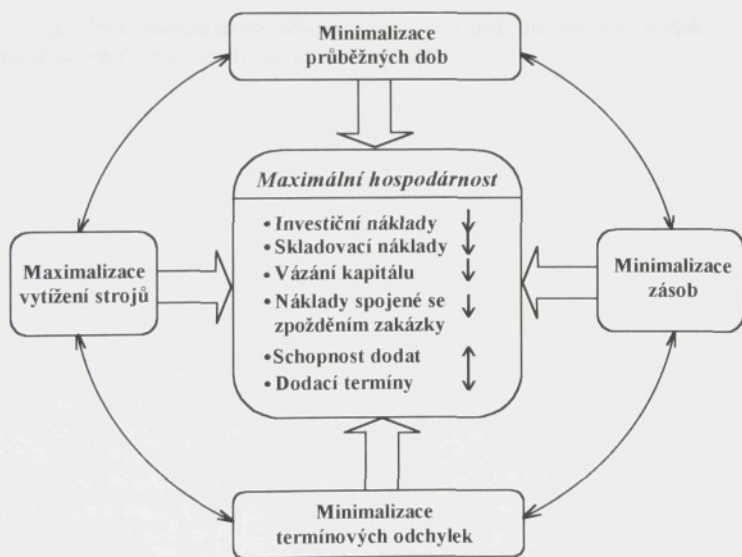
Analytické řešení však komplikuje složitá struktura výrobního systému (velké množství prvků a složité vztahy mezi nimi), konfliktní prostředí (vzájemně si odporující požadavky), jeho dynamika a stochastičnost (různé typy rozdělení náhodných proměnných).

Hlavní nevýhodou analytických metod tedy je, že s komplexností reálného systému strmě stoupá složitost analytického modelu až do té míry, kdy je vyřešení velice složité, mnohdy až nemožné [KEL-96c]. Jejich využití tedy často vyžaduje zavést mnohé zjednodušující předpoklady. I přes používání tzv. dynamických a stochastických modelů (např. dynamické programování, stochastické modely zásob, teorie front a obslužných sítí apod.) je omezením analytických metod i to, že většinou přistupují k řešení deterministicky a výsledky řešení jsou určované pro stacionární situace, kdy se pravděpodobnostní charakteristiky systému v čase nemění. Většina metod se rovněž omezuje na optimalizaci pouze jednoho parametru. Komplexní řešení systému pak vyžaduje kombinaci různých metod.

Počítačová simulace je numerická, experimentální metoda a je oproti analytickým metodám „matematicky poměrně nenáročná“ [PID-89]. Výrobní systém je znázorněn simulačním modelem, na kterém se sledují a zkoumají jeho dynamické a stochastické vlastnosti napodobováním skutečného chování reálného systému. Tak můžeme porovnávat přímý vliv jednotlivých parametrů systému na jeho výstupní charakteristiky. Parametry simulačního modelu přitom mohou být libovolně měněny, kombinované a doplňované.

Počítačová simulace výrobního systému je etapou dynamického zkoumání výrobního systému. Poskytuje komplexní pohled na sledovaný systém a tím mnohem přesnější a názornější představu o chování jednotlivých prvků systému. V podstatě tak odstraňuje uvedené nedostatky analytických metod.

Maximální uspokojování potřeb zákazníka (čas, kvalita, cena) při maximální hospodárnosti podniku vyžaduje sladit vzájemně si konkurující cíle (vysoké vytižení kapacit, nízká úroveň zásob, krátké průběžné doby a vysoká spolehlivost dodávek - viz obr. 2-2). To je možné pouze v případě, když se výrobní systém řeší komplexně. Právě zde však analytické metody často narážejí na hranice svých možností a je nutné využít počítačovou simulaci.



Tržní cíle

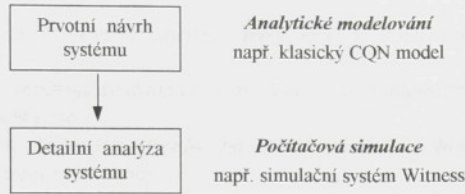
vysoká spolehlivost dodávek
krátké průběžné doby

Podnikové cíle

nízké zásoby
vysoké vytižení kapacit

Obr. 2-2. Vzájemně si konkurující podnikové a tržní cíle (pramen Wiendahl [NOCH-93a])

Na druhé straně vzhledem k větším časovým nárokům počítačové simulace se analytické metody díky jejich relativní jednoduchosti a rychlosti řešení (zvláště, jsou-li zpracovány na počítači) velmi dobře uplatňují v oblasti prvotního, jednoduchého návrhu systému (pro získání prvotní představy o systému, prvotní dimenzování systému) a pro ulehčení a urychlení tvorby simulačního modelu (tzv. Rough cut modelling - rychlé, přibližné modelování, popř. Rapid modelling technique - rychlá technika modelování, viz obr. 2-3).



Obr. 2-3. Rychlé modelování výrobních systémů

Pro detailní zkoumání navrženého či stávajícího výrobního systému se však jednoznačně doporučuje využívat počítačovou simulaci.

3. Počítačová simulace - klíčová technika průmyslového inženýrství

3.1 Proč využívat počítačovou simulaci

Důvody pro využívání počítačové simulace lze shrnout do následujících deseti bodů:

1. *Simulaci lze řešit i velmi složité systémy, které jsou neřešitelné analytickými metodami.*
2. *Simulace umožňuje studium chování systému v reálném, zrychleném nebo zpomaleném čase.*
3. *Již samotné zkušenosti z tvorby simulačního modelu mohou vést k návrhům na zlepšení řízení či struktury.*
4. *Simulace nabízí komplexnější pohled na studovaný problém.*
5. *Simulace vede k týmové práci.*
6. *Simulace poskytuje větší přehled o podnikových procesech.*
7. *Pozorování činnosti simulačního modelu vede k lepšímu pochopení reálného systému.*
8. *Pomocí simulace je možné důkladně prověřit různé varianty řešení.*
9. *Možnost využití již jednou vytvořeného simulačního modelu i v dalších činnostech podniku.*
10. *Simulace podporuje tvůrčí práci.*

V následující části budou jednotlivé body zdůvodněny podrobněji.

1. *Simulaci lze řešit i velmi složité systémy, které jsou neřešitelné analytickými metodami.*

Jak už bylo naznačeno v kap. 2.4, nasazení analytických metod komplikuje jednak konfliktní prostředí (vzájemně si konkurující cíle podniku), tak i složité vazby mezi jednotlivými prvky výrobního systému, jeho dynamika a stochastičnost.

Obecně lze říci, že jednoduché systémy (tzn. „jednoduše“ a snadno popsatelné) se řeší analytickými metodami, složité počítačovou simulací. Analytické modelování se používá i pro získání prvotní představy o zkoumaném systému a pro ulehčení tvorby simulačního modelu.

2. *Simulace umožňuje studium chování systému v reálném, zrychleném nebo zpomaleném čase.*

Nastavením „simulačního“ času (tj. času simulace) lze chování procesů zkoumat jak reálně, tak i zpomaleně či zrychleně. To má značný význam např. v oblasti analýz a projektování výrobních systémů, kdy lze během několika minut „odsimulovat“ např. průběh výroby několika týdnů či měsíců. Tím je možné poměrně rychle získat představu o zkoumaném systému, vyzkoušet a připravit různé varianty řešení.

3. Již samotné zkušenosti z tvorby simulačního modelu mohou vést k návrhům na zlepšení řízení či struktury systému.

Tvorba simulačního modelu (tj. více či méně zjednodušený popis reálného systému), vyžaduje důkladnou analýzu reálného systému. Tím lze už před začátkem simulačních experimentů dojít i k podstatným zlepšením reálného systému.

4. Simulace nabízí komplexnější pohled na studovaný problém.

Každé úzké místo má svoji příčinu. Ta však může být „na míle“ vzdálena od vlastního místa výskytu (např. zpoždění dodávky a s tím spojená penalizace může být spojeno se snahou o co nejnižší vázání kapitálu ve skladech a tím chybějícími dily). „Optimum“ v jedné části systému (tzv. lokální „optimum“) tak může mít „nedozírné“ následky v jiné části systému.

Lokální optimalizaci se rovněž zvyšuje riziko vytvoření systému složeného sice z jednotlivých „optimalizovaných“ částí, které však spolu vzájemně velmi obtížně komunikují. Proto je nutné hledat „optimum“ celého řešeného systému (tzv. globální „optimum“).

Simulační model tedy musí odrážet komplexnost řešeného problému. Tím je přímo stanoven požadavek na tvůrce a uživatele modelu, aby se snažili o všestranný pohled na zkoumaný systém, a tím „přimo překročili hranice své odbornosti“ [ŠIK-91].

5. Simulace vede k týmové práci.

Jak bylo řečeno v předchozím bodě 4, simulační model musí odrážet komplexnost řešení problému. Tu však nemůže obsáhnout pouze odborník na simulaci. I během simulace se mohou vyskytnout problémy, které si vyžádají konzultaci (přítomnost) pracovníka i z jiné, dříve neuvažované oblasti.

Proto je většinou vhodné vytvořit tým pracovníků různých profesí, tedy i z těch, kterých se zdánlivě daný problém netýká (např. „simulant“³, projektant, mistr, pracovník nákupu či odbytu apod.). Tento „simulační“ tým nemusí být stálý, může se pružně měnit podle etapy řešení.

6. Simulace poskytuje větší přehled o podnikových procesech.

Do modelu lze začlenit nejrůznější součtové či grafické prvky pro lepší znázornění výsledků simulace. Větší přehled o aktuálním stavu zkoumaných procesů se získá i animací, tj. na obrazovce je možné sledovat pohybující se elementy, které mění barvu v závislosti na svém stavu.

³ Pod pojmem „simulant“ se zde rozumí pracovník pracující se simulačním SW, tzn. odborník na simulaci.

7. Pozorování činnosti simulačního modelu vede k lepšímu pochopení reálného systému.

Na simulačním modelu je možné změnou jednoho parametru systému sledovat jeho vliv nejen na vnitřní chování zkoumaného systému, nýbrž i na ostatní parametry. To společně s větším přehledem o aktuálním stavu zkoumaného procesu vede přímo i k lepšímu pochopení reálného systému.

8. Pomocí simulace je možné důkladně prověřit různé varianty řešení.

Největší přínos simulace tkví v možnosti „rychlého“ přezkoušení různých variant řešení a tak minimalizovat rizika chybných rozhodnutí a předcházet problémovým situacím. Rovněž si lze předem připravit různé varianty pro neočekávané události (např. výpadek stroje, pilná či neočekávaná zakázka, apod.).

9. Možnost využití již jednou vytvořeného simulačního modelu i v dalších činnostech podniku.

Jednou vytvořený simulační model lze využít nejen při projektování, rozběhu a zlepšování výrobních systémů, ale i v dalších činnostech podniku. S výhodou ho lze využít zejména v oblasti proškolení stávajících pracovníků při vysvětlování nové strategie řízení a zavádění změn, popř. při zaškolování nových pracovníků.

Simulační model tvoří v podstatě „Know-how“ zásobník podniku, protože v sobě uchovává jak metodiku simulační techniky, tak i všeobecné a uživatelské znalosti.

10. Simulace podporuje tvůrčí práci

Tento bod přímo vyplývá z podstaty simulace (simulace = napodobování chování reálného systému) a z výhod jejího použití. Možnost rychle získat výsledky jednotlivých variant řešení, ověření i netradičních řešení, větší přehled o stavech jednotlivých procesů - to vše podporuje proces hledání a rozhodování se mezi jednotlivými variantami a tím přímo příznivě ovlivňuje tvůrčí práci celého simulačního týmu.

3.2 Využití počítačové simulace

Počítačovou simulaci je možné nasadit při řešení celé řady projekčních, logistických, obchodních, popř. personálních úloh. To je vidět i z obr. 3-1, kde jsou uvedeny některé z typických oblastí jejího využití.

Při řešení těchto projektů lze pomocí počítačové simulace nalézt odpovědi na řadu důležitých otázek typu:

- „Dodržím termín zakázky?“
- „Co se stane po přijetí této zakázky?“
- „Jaká je velikost rozpracované výroby?“
- „Jaké jsou průběžné doby výroby?“
- „Jaké a kde jsou rezervy?“
- „Kde jsou úzká místa?“
- „Jsou nezbytné další investice?“
- „Jak ovlivní výpadek určité kapacity výrobu?“
- „Co se stane při poruše?“ apod.

Experimentování s počítačovým modelem tak umožňuje:

- minimalizovat rizika chybných rozhodnutí,
- predikovat využití kapitálových investic,
- zrychlit proces zavádění inovačních změn,
- připravovat alternativy,
- zefektivňovat provoz stávajících výrobních systémů,
- zaškolit nové pracovníky,
- získat simulací podložené argumenty pro diskusi.

Z časového hlediska lze využití simulace rozdělit na:

- krátkodobé,
- dlouhodobé.

Zatímco krátkodobé využití simulační techniky je hlavně ve zvyšování produktivity práce a posouzení investic, dlouhodobé spočívá zejména v uchování jednou provedených zkušeností, které se mohou používat pro řešení nových úloh.

„Optimalizace“ obchodních procesů

- stanovení „optimální“ výrobní strategie
- předpovídání „skutečných“ nákladů na zakázku

Plánování a řízení výroby

- plánování celopodnikových zdrojů
- přidělování zakázek jednotlivým výrobním celkům
- dílenské řízení výroby

Zlepšení logistických koncepcí

- eliminace skladů a zásob
- redukce rozpracované výroby a průběžných dob
- určování výrobních a transportních dávek
- sladění dodávek surovin a polotovarů s výrobou
- zabezpečení expedice

Projektování výrobních systémů

- projektování inovačních změn stávajících výrobních systémů
- zjištění požadavků na kapacity pro zajištění plynulosti výroby
- návrh dispozičního uspořádání
- „optimalizace“ uspořádání jednotlivých prvků celku
- zkušební provoz

Analýzy výrobních systémů

- identifikování a odstranění úzkých míst
- odhalování rezerv důkladným rozбором nejruznějších činností
- „co když“ analýzy

Školení pracovníků v oblasti

- stanovování výrobní strategie
- projektování a plánování výroby
- analýz a zlepšování výrobních systémů
- zaškolování nových pracovníků

Obr. 3-1. Oblasti využití počítačové simulace

Některé příklady využití:

Jak bude výrobní systém reagovat na změnu pořadí zakázek? Je výhodnější využít pořadí zakázek A-B-C, nebo B-A-C?

Jaká výrobní a transportní dávka je vzhledem k plnění cílů podniku (krátké průběžné doby, vysoká spolehlivost dodávek, nízké náklady) ta „optimální“? Je lepší použít vypočtenou výrobní dávku „Minimální“, „Optimální“, nebo „KANBAN“ dávku?

Jaký vliv na výstupní charakteristiky výrobního systému mají výrobní časy? Má smysl se nyní věnovat jejich zkracování zaváděním nových, „drahých“ technologií, popř. u které operace začít? Je opravdu úzkým místem to pracoviště, které se na první pohled zdá? Jaký vliv bude mít výměna stávající technologie za „novou“, výkonnější? Nevytvoří se pouze úzké místo někde jinde? Nebylo by lepší se vzhledem ke zvýšení průtoku nejprve zaměřit na seřizovací časy, popř. transportní dávky?

Příprava alternativ řešení v případě „pilné“ zakázky, výpadku stroje či onemocnění pracovníka.

Toto je pouze nepatrný zlomek možností, které nabízí počítačová simulace.

Moderní modulární, interaktivní systémy navíc umožňují uživateli zodpovědět tyto otázky ve velmi krátké době a tím výrazně zefektivnit jeho práci. Rovněž tím, že je možné si vyzkoušet i zdánlivě nelogické řešení se otevírá ještě další výrazné pole využití počítačové simulace.

3.3 Přínosy a náklady simulace

V zásadě by se měla simulace používat tehdy, když přínosy převýší náklady. Toto rozhodnutí je však mnohdy obtížné, neboť ne vždy jsou přínosy lehce vyčíslitelné.

Přínosy lze rozdělit do dvou oblastí:

- kvantitativní,
- kvalitativní.

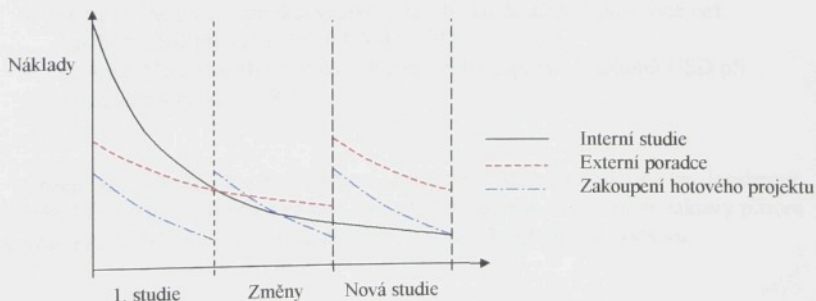
Zatímco kvantitativní přínosy (např. úspora pracovních sil, snížení zásob apod.) jsou lehce vyčíslitelné, kvalitativní (např. „odsimulování“ funkčnosti či spolehlivosti procesu, zabránění chybnému rozhodnutí, uchování jednou nabytých znalostí apod.) lze vyčíslit jen obtížně.

Náklady je možné rozdělit do následujících tří skupin:

- personální náklady,
- náklady na technické vybavení (HW, SW),
- náklady na údržbu a provoz (licenční poplatky, spotřeba energie, materiál, apod.).

Největší nákladovou položkou jsou mzdové náklady, které mohou dosáhnout hranice až 80-ti % celkových nákladů na simulační projekt [DEB-98]. Přitom se nejedná pouze o mzdu „simulanta“, nýbrž celého simulačního týmu. Další výraznou položku tvoří cena simulačního systému. Ten může stát v závislosti na počtu modulů přibližně 700 000,- Kč až 1 500 000,- Kč za jednu licenci. Nezanedbatelné nejsou ani udržovací poplatky.

Přínosy i náklady se velmi liší případ od případu a nedají se předem jednoznačně určit, protože jsou odvislé od konkrétního projektu. Náklady na simulaci záleží i na tom, zda se jedná o „první“, pilotní projekt, či o „opakovaný“ projekt (viz obr. 3-2).



Obr. 3-2. Náklady na opakovanou studii (pramen Dunn [HRD-98])

Pro orientaci a hrubý odhad přínosů a nákladů lze uvést některé příklady z odborné zahraniční literatury, které vycházejí ze zkušenosti a z porovnání různých simulačních studií:

[VDI-93]

- simulací ovlivnitelná suma investic - 20 %
- úspory: 2 - 4 % z ovlivnitelných investic - tj. 0,4 - 0,8 % z investic
- náklady: 0,5 % z ovlivnitelných investic - tj. 0,1 % z investic

pramen REFA [SCHM-93]

- při investičních nákladech 5 - 500 milionů DM
simulační náklady - < 0,5 - 1 % z investic

pramen Fraunhofer Institut [DEB-98]

- poměr přínosy/náklady větší než 6:1

Výhodnost použití počítačové simulace potvrzují i následující příklady výsledků případových studií:

[VDI-93]

- odstranění meziskladu - úspora několik milionů DM při nákladech 90.000,- DM
- redukce 2 bezobslužných vozíků - úspora 500.000 DM při nákladech 50.000,- DM

[KOŠ-93]

- firma AESOP uvádí při simulaci výroby klikových hřídelí úsporu 2 milionů DM při nákladech 40.000,- DM

[KOŠ-95]

- simulace kontrolního systému s náklady cca 60.000,- DM přinesla úsporu dvou pracovišť a tím cca 600.000,- DM

[DEB-98]

- ve firmě Peguform redukcí vozíků a zásobníků dosáhly úspory více než 1 milion USD při nákladech 60.000,- USD
- ve firmě Mercedes Benz dosáhly během tří let úspory 30 milionů USD při nákladech 4 milióny USD

Obecně lze tedy říci, že při včasné a „správné“ nasazení simulace lze dosáhnout přínosů několikanásobně vyšších, než jsou náklady s ní spojené. Kvalitativní faktory přitom mohou vést ještě k dalšímu výraznému zlepšení výsledků hospodaření podniku.

3.4 Simulační nástroje

„Uživatel simulačního nástroje nesmí být programátorem, nýbrž expertem v dané problematice.“

Už od svých začátků v 50. letech lze sledovat zřetelný vývoj simulačních nástrojů (SW vybavení) směrem k neustálému zjednodušování při tvorbě modelu (viz obr. 3-3). Je vidět zjevnou snahu dát uživateli do ruky takový nástroj, který ho oprostí od vlastního programování a umožní mu plně se koncentrovat na řešení vlastního problému.

Vývoj	Období	Charakteristika	Příklad SW
1. generace	50. léta	Obecné programovací jazyky	Fortran, ALGOL
2. generace	60. léta	Simulační jazyky	GPSS, SIMULA
3. generace	70. léta	Grafické zpracování výsledků, diskrétní, spojitá a kombinovaná simulace	GASP IV, ACSL
4. generace	1. polovina 80. let	Problémově orientované simulátory	SIMAN/CINEMA SIMFACTORY
5. generace	2. polovina 80. let	Využití umělé inteligence a expertních systémů	SIMKIT
6. generace	90. léta	Objektově orientované simulační systémy	ARENA WITNESS

Obr. 3-3. Vývoj simulačního SW (podle [DEB-98])

V dnešní době existuje mnoho podpůrných simulačních prostředků. Ty lze podle jejich univerzálnosti a možnosti použití rozdělit do 5-ti oblastí (viz obr. 3-4).

Druh	Charakteristika	Příklad SW	UK, RP, NTM
Obecné programovací jazyky Vyšší úroveň	Všeobecné použití	Fortran, Pascal	NTM RP
Simulační jazyky	Všeobecné použití	GPSS, SIMULA	
Objektově orientované simulátory pro všeobecné použití	Široké spektrum využití (výroba, logistika, ...)	ARENA, WITNESS	
Uživatelsky orientované simulátory	Využití pro danou oblast (např. řízení výroby)	SIMPROCES, FACTOR	
Simulační systémy speciální	Speciální použití (např. PLC, řídicí systémy)	CASTOMAT	UK

UK uživatelský komfort
RP rozsah použití
NTM náklady na tvorbu modelu

Obr. 3-4. Druhy simulačního SW

Z obrázku 3-4 je patrné, že obecnost použití je vykoupena vysokými programátorskými náklady a tím i náklady na tvorbu modelu. S rostoucí specializací naopak roste uživatelský komfort, a tím klesají náklady na tvorbu modelu. Nízké náklady jsou však vykoupěny užší možností použití.

V poslední době je vidět zřetelný trend k tzv. vizuálně interaktivním simulačním systémům. Ty umožňují bezprostředně zasahovat do tvorby a chodu modelu v kterémkoli čase a za jakéhokoli stavu (interaktivní systémy). Na displeji lze přitom pozorovat pohybující se elementy, které mění barvu v závislosti na svém stavu (vizuální systémy). Výhodou těchto systémů je jednodušší validace modelu, větší přehled o zkoumaném procesu a tím i snazší experimentování.

Další vývoj simulační techniky je zaměřen na tvorbu inteligentních rozhraní mezi řešitelem a počítačovým systémem a na neustálé zrychlování procesu experimentování rozsáhlou automatizovanou podporou řešitele při tvorbě modelu, plánování a vyhodnocování simulačních experimentů (tvorba referenčních modelů a submodelů, využívání umělé inteligence či Fuzzy logiky, vývoj moderních heuristických „optimalizačních“ postupů, atd.). Cílem je, aby řešitel vykonával pouze vlastní kreativní činnost a rutinní činnosti za něho prováděl počítač.

Protože se v dalších letech očekává razantní průlom simulace do všech oblastí podniku, směřují vývojové tendence i na vytvoření univerzálního, ale přitom uživatelsky příjemného simulačního systému, který bude integrovat jednotlivé činnosti v podniku. Integrovanou složkou všech činností bude simulační model, který by se měl stát jakousi „sběrnou nádobou“ znalostí podniku a komunikačním prostředkem všech pracovníků podniku.

Nejznámější simulační systémy, které se využívají v oblasti plánování, projektování a analýz výrobních systémů jsou uvedeny v příloze A1.

4. Metodologie zpracování simulační studie

Simulace není pouhé „generování výsledků“, nýbrž spíše „poradenská služba“ [NOCH-93b].

4.1 Simulační projekt

Cílem simulačního projektu je pro dané nebo plánované výrobní spektrum určit nejlépe vhodnou kombinaci výrobního programu, pořadí zakázek, či strukturu výrobních, transportních a informačních systémů, tzn. najít „optimální“ kompromis mezi různými vyhodnocovacími kritérii (technické, dispoziční, organizační a ekonomické kritérium). Přitom je třeba hledat nejen lokální, nýbrž hlavně globální „optimum“ zkoumaného systému.

Každý projekt musí začínat důkladnou analýzou problému a **zvolením vhodné metody a postupu řešení**, tzn. je nutné se zamyslet nad tím, zda a v jaké fázi použít simulaci, či zda k vyřešení „postačí“ jiná, jednodušší metoda. Už toto rozhodnutí značnou měrou ovlivňuje finanční a časové náklady na řešení problému. Nevhodně zvolená metoda řešení může mít za následek zbytečné prodloužení a prodražení celého projektu.

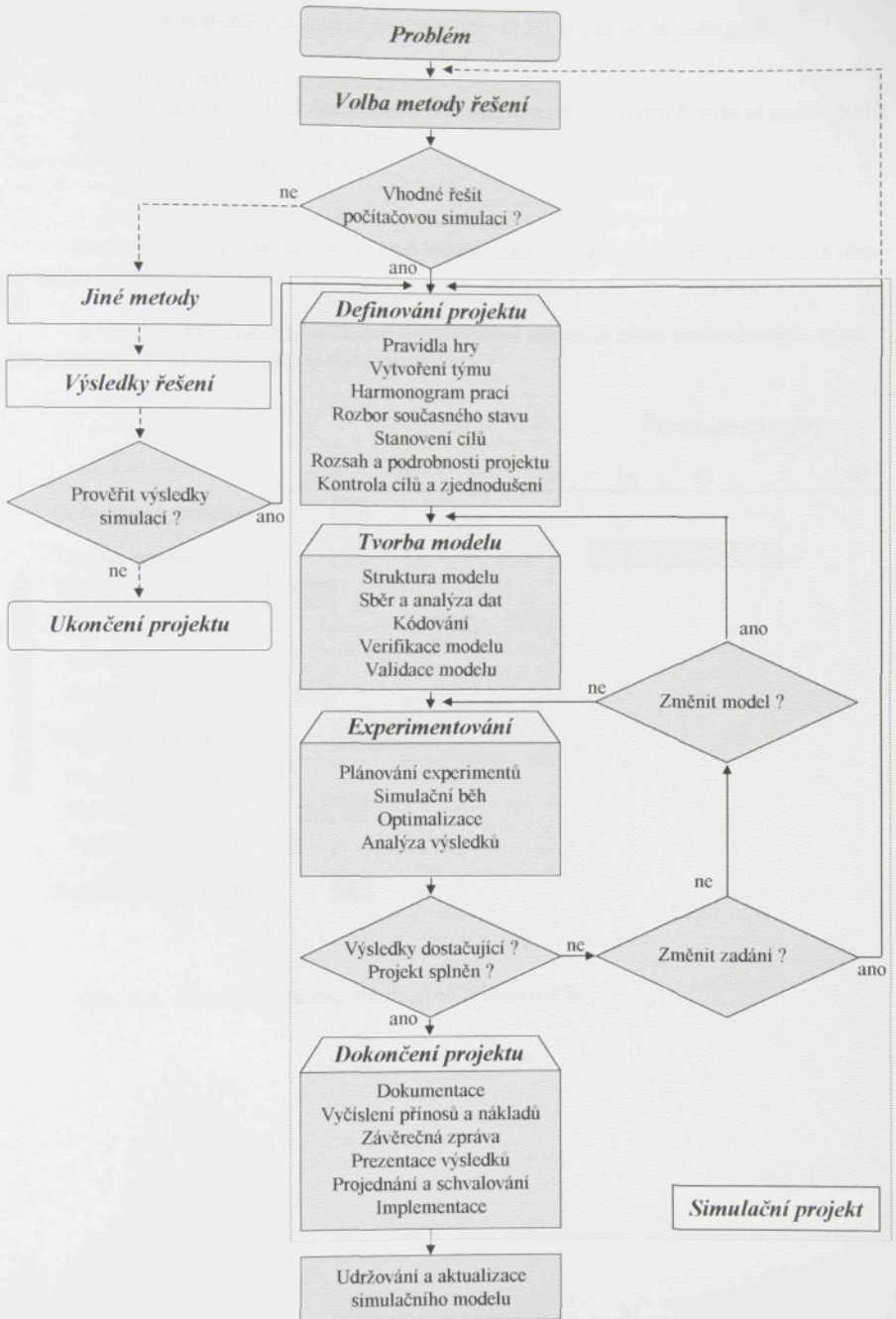
Po rozhodnutí o zpracování simulačního projektu, lze další postup rozdělit do následujících čtyř etap:

- definování simulačního projektu,
- tvorba modelu,
- experimentování,
- dokončení simulačního projektu.

V počáteční fázi dochází k nadefinování simulačního projektu (určení realizačního týmu, stanovení cílů a rozsahu projektu). Následuje etapa získávání vstupních údajů (definování prvků systému včetně jejich vazeb, sběr dat a analýza pravděpodobnostních rozdělení náhodných veličin) a vlastní tvorby modelu (programování modelu včetně jeho verifikace a validace). Další částí simulační studie je experimentování, které spočívá v cílené změně hodnot parametrů modelu tak, aby se dosáhlo požadovaných cílů projektu. Ten je zakončen kompletací dokumentace, zhodnocením výsledků a realizací „optimální“ varianty řešení.

Při zpracování projektu je nezbytné **důsledně dodržovat zásady týmové práce a projektového řízení** včetně kontroly plnění stanovených cílů projektu po každé jeho dílčí etapě.

Struktura simulačního projektu je znázorněna na následujícím obrázku 4-1. Podle druhu a účelu studie, použitého simulačního prostředku či zkušeností „simulačního“ týmu se přitom mohou některé činnosti jednotlivých etap řešení prolínat.



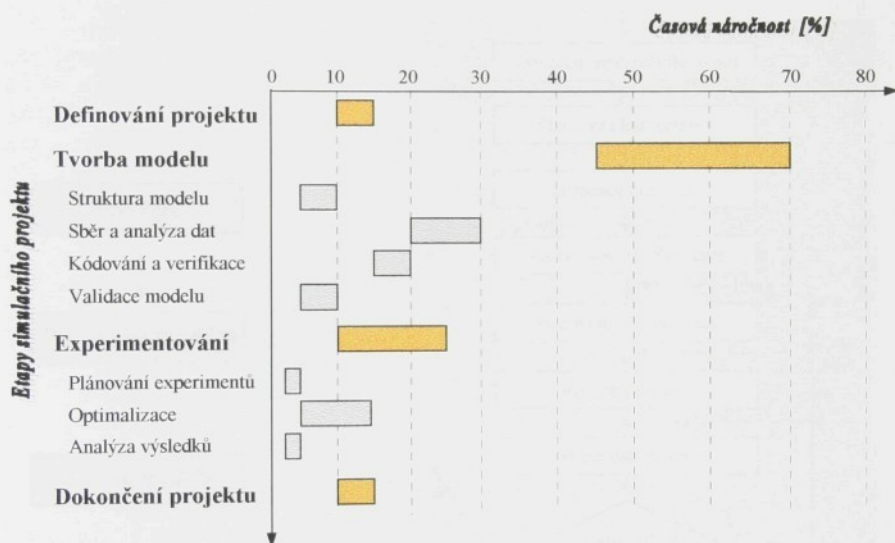
Obr. 4-1 Struktura simulačního projektu

Náročnost jednotlivých etap simulační studie se liší případ od případu podle:

- druhu a účelu použití simulace (zda se jedná o předběžnou nebo podrobnou studii, o interní či externí studii apod.),
- použitého simulačního nástroje,
- definovaných cílů projektu.

To dokumentuje obr. 4-2, na kterém je znázorněn procentuální podíl jednotlivých etap na celém simulačním projektu.

Z obr. je rovněž patrné, že časově nejnáročnější etapou je etapa tvorby modelu, která obvykle tvoří 45 až 70 % celkové doby projektu.



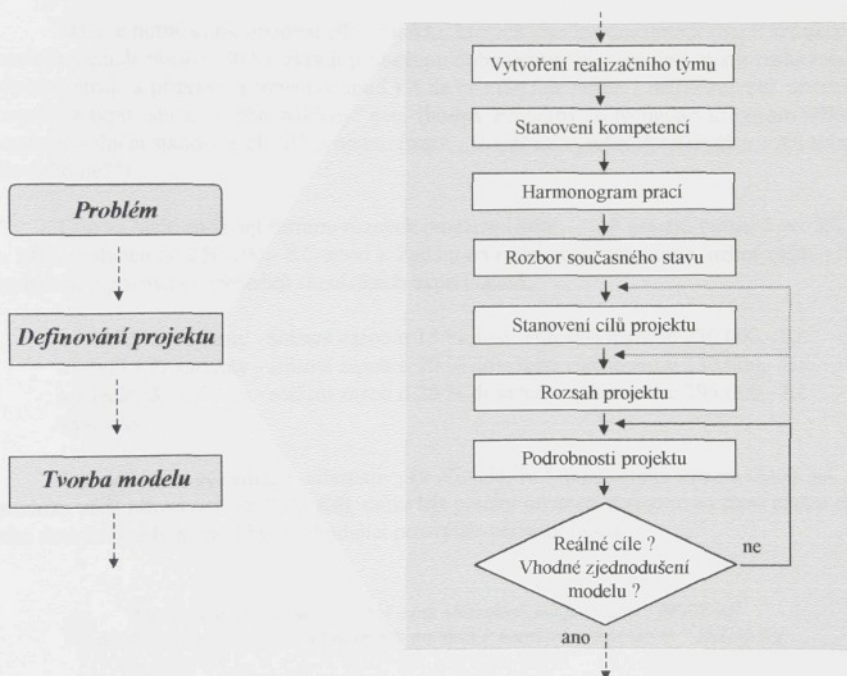
Obr. 4-2 Časová náročnost simulačního projektu v %

4.2 Definování simulačního projektu

Již v této etapě se rozhoduje o úspěchu či neúspěchu celého projektu.

Tato etapa se často neprávem podceňuje a vynechává se. Je však nezbytná pro vyjasnění si pozic mezi zadavatelem a řešitelem. Předěje se tak pozdějším nedorozuměním a časovým prodáváním při vynucených změnách v projektu. Kromě toho, vhodné zvolenou strategií zpracování projektu lze výrazně zkrátit následné etapy (etapy tvorby modelu a vlastního experimentování) a tím i celou dobu projektu.

V rámci definování simulačního projektu je třeba vytvořit realizační tým, stanovit kompetence, určit cíle a rozsah projektu apod. (viz obr. 4-3).



Obr. 4-3 Etapa definování projektu

Už v této fázi začíná velmi úzká spolupráce „simulačního“ týmu.

Pro řešení komplexních problémů mnohdy nestačí vytvoření realizačního týmu pouze z odborníka na simulaci a na danou problematiku (např. „simulant“ a projektant). Většinou je vhodné vytvořit tým pracovníků různých profesí, tedy i z těch, kterých se zdánlivě daný problém netýká (např. simulant, projektant, mistr, pracovník nákupu či odbytu apod.).

Tento „simulační“ tým nemusí být stálý, ale může se pružně měnit podle etapy řešení. Je však výhodné mít předem určeného pracovníka, na kterého je možné se v případě potřeby obrátit. Tento pracovník musí být obeznán s problémem a tak být „stále v obraze“.

Neopomenout kontrolní body po každé etapě simulačního projektu.

Harmonogram prací by měl obsahovat i tzv. „kontrolní body“, kdy by se měly dosažené výsledky či další postup řešení důkladně prodiskutovat s povolanými osobami (to je včetně zadavatele projektu). Tyto „kontroly“ by měly být přinejmenším po každé etapě simulačního projektu.

Definované cíle simulačního projektu musí být konkrétní a reálné.

Dále je nutné konkretizovat cíle projektu, kterých chceme dosáhnout (např. redukce mezioperačních zásob o 20 %, zkrátit průběžnou dobu výroby na polovinu, zjistit reakce na výpadek stroje a připravit alternativy apod.). Cíle by měly být reálné a měřitelné, tzn. obecná formulace typu „snížit výrobní náklady“ není vhodná. Při takovéto formulaci se potom těžko posuzuje splnění stanovených cílů projektu (např. „Je snížení výrobních nákladů o 1 Kč splnění cíle nebo ne?“).

Cíle se často zadávají formou různých omezení (např. ... při použití pouze 2 vozíků, ... při investicích do 250.000,- Kč, apod.). Zadání omezení není vždy nutné, neboť může přímo vyplynout z porovnání výsledků simulačních experimentů:

výsledky 1. varianty - snížení zásob o 15 % dosaženo výší investic 230.000,- Kč
 výsledky 2. varianty - snížení zásob o 20 % dosaženo výší investic 250.000,- Kč
 výsledky 3. varianty - snížení zásob o 25 % dosaženo výší investic 295.000,- Kč
 výsledky ... atd.

Jak vyplývá z výsledků 3. alternativy (v případě, že 5-ti procentní snížení zásob má mnohem větší přínos než 45.000,- Kč), může být použití omezení dokonce na úkor plnění cílů. Jeho dodržení tedy nemusí být rozhodující pro výběr varianty řešení.

*Model „tak přesný, jak je nutné a tak abstraktní, jak je možné.“ [WEN-93]
 „Modelovat minimální počet elementů nutných k dosažení cílů projektu.“ [HUM-97]*

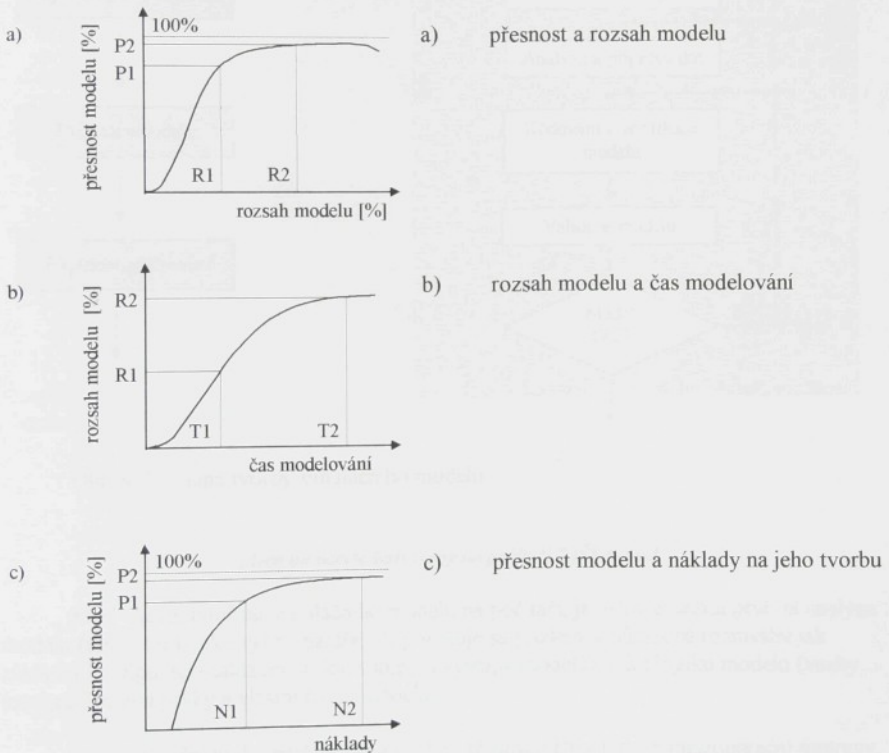
Neméně důležitým bodem je stanovení podrobnosti a zjednodušení modelu (např. počet elementů, zjednodušení v logice modelu, rozsah vstupních i výstupních dat apod.). Použitá zjednodušení musí vycházet z nadefinovaných cílů projektu a nesmí ovlivnit validitu (tzn. věcnou správnost - platnost) modelu.

Příklady možného zjednodušení modelu (podle [ŠRA-98a]):

- nahrazení většího počtu elementů jedním elementem,
- rozdělení modelu na několik submodelů,
- nahrazení pracovní síly přírůstkem k času operace,

- použít pevný cyklus stroje místo proměnlivého (když mezi jednotlivými cykly nejsou podstatné rozdíly),
- používání předpokladu, že pracovní síla je stále k dispozici,
- vyloučení směn (tam, kde je to možné),
- vyloučení sporadických jevů (např. poruch, které se vyskytují zřídka),
- plánovat dodávky bez modelování dopravy, apod.

Jak ukazuje obrázek 4-4, už samotnou volbou vhodné strategie tvorby modelu lze dosáhnout výrazného snížení času a nákladů na jeho vytvoření. Příliš veliký rozsah modelu může vést dokonce až ke snížení přesnosti modelu vzhledem k obtížnějšímu popisu vnitřních logických vazeb a možné ztrátě přehlednosti.



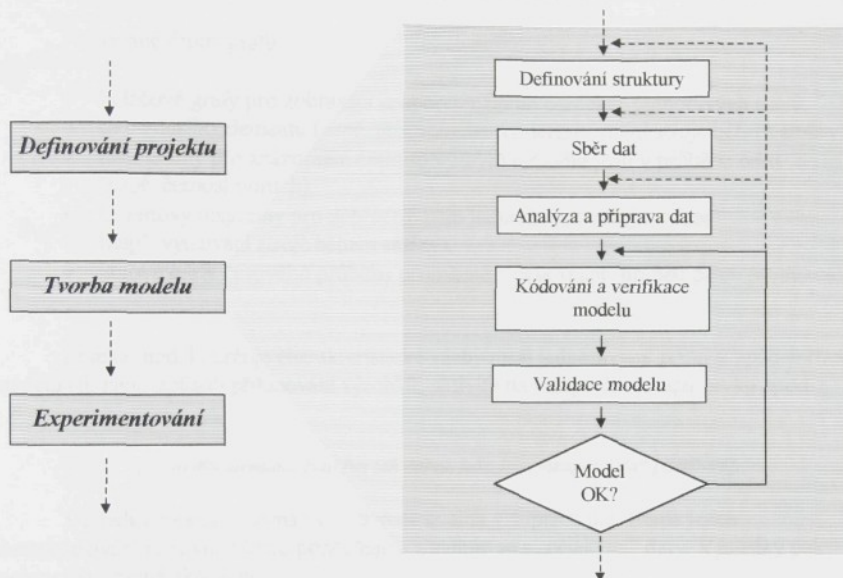
Obr. 4-4. Porovnání parametrů tvorby modelu

Často se proto používá strategie 20/80, tzn. při 20-ti procentním rozsahu modelu (počet elementů, vstupních i výstupních dat a hlavně logiky modelu) můžeme dosáhnout až 80-ti procentní přesnosti modelu (body R1 a P1 na obr. 4-4a), což se odrazí i v čase modelování a s tím souvisejících nákladech na projekt (body R1, P1, T1 a N1 na obr. 4-4b, c).

4.3 Tvorba simulačního modelu

„Model je zjednodušené zobrazení reality nebo záměru, na kterém se dají studovat vlastnosti, které se považovaly za problematické.“ [HAN-82]

Etapa tvorby simulačního modelu (obr. 4-5) je poměrně náročná. Je však nutné ji věnovat patřičné úsilí a nesmí se podcenit, neboť na ní záleží výsledek celého projektu.



Obr. 4-5 Etapa tvorby simulačního modelu

„Den na papíře šetří týdny na počítači.“ [ŠRA-98a]

Před vlastní tvorbou simulačního modelu na počítači, je velmi důležitá prvotní analýza modelu (tzn. jeho struktury) na papíře. Doporučuje se předem si důkladně rozmyslet jak základní konfiguraci (základní prvky, vstupy a výstupy modelu), tak i logiku modelu (vazby mezi základními prvky a vlastní řízení modelu).

Mezi základní prvky patří počet a druh potřebných strojů, druh mezioperační dopravy, počet pracovníků apod.

Vstupy modelu tvoří celá řada vstupních dat, která jsou potřebná pro „oživení“ modelu (např. interval příchodu součástí, časy obrábění, seřizovací časy atd.). Data lze zadávat přímo zapsáním konkrétní hodnoty nebo náhodným výběrem generováním z pravděpodobnostních, popř. uživatelských rozdělení. Využit lze i načítání ze souboru (tzv. proudy dat).

Výstupy modelu jsou zpravidla základní charakteristiky výrobního systému, jako je využití strojů, celková produktivita systému, průběžná doba výroby, rozpracovanost výroby, popř. naplnění jednotlivých meziskladů. Pro jejich znázornění je možné využít řadu číselných či grafických elementů.

Číselně se obvykle zobrazuje aktuální stav sledovaného parametru, jeho průměrná, minimální a maximální hodnota, směrodatná odchylka, popř. i modus a medián. Graficky se často znázorňuje časový průběh sledované proměnné a využití sledovaného elementu.

Používané druhy grafů:

- koláčové grafy pro zobrazení proporcionálního rozdělení jednotlivých stavů sledovaného elementu (např. procentuální rozdělení využití stroje během směny),
- histogramy pro znázornění četnosti výskytu určitého jevu v průběhu času (např. četnost poruch),
- Ganttovy diagramy pro zobrazení užití jednotlivých zdrojů v čase (např. využívání stroje během směny),
- liniové grafy časového průběhu proměnné v čase (např. průběh denní produkce).

Logika modelu určuje charakteristické vazby mezi jednotlivými prvky a způsob řízení modelu (tj. např. způsob přiřazování výrobků, aktivity na vstupu či výstupu prvku apod.).

„Výsledky simulace jsou jen tak dobré, jako jsou vstupní data“ [HRD-98].

Výsledky simulace primárně ovlivňuje kvalita vstupních dat. Etapa jejich shromažďování se rovněž často podceňuje a simuluje se s „nějakými“ daty. Výsledky pak mohou být značně zkreslené.

Vstupní data můžeme získat v zásadě trojím způsobem:

- z reálu,
- z expertních posudků,
- ze srovnání s podobným systémem.

Sebraná data je nutné podrobit analýze, tzn. provést kontrolu úplnosti a správnosti dat (kontrola extrémů, zda nedošlo k subjektivnímu ovlivnění dat, určení nahodilých či systematických vlivů, apod.). Analýza se většinou provádí za pomoci statistických prostředků (např. krabicový diagram, histogram, korelační diagram, statistické testy pro určení typu pravděpodobnostního rozdělení).

Mnohdy však nejsou k dispozici podrobná data, která by se dala vyhodnotit pomocí statistických testů. V takovém případě se o typu rozdělení musí rozhodnout na základě zkušeností, znalostí možnosti jejich použití, popř. druhu získaných informací (viz tab. 4-1).

Druh informace	Typ rozdělení	Příklad použití
Přibližná informace (min. a max.).	Rovnoměrné rozdělení.	Příchod zakázek v rozmezí 10 - 15 min.
Přibližná informace (min., max., modus).	Trojúhelníkové rozdělení.	Příchod zakázek v rozmezí 10 - 15 min.
Pravděpodobnost výskytu jevu, počet pokusů.	Binomické rozdělení.	Počet zmetků v dodávce.
Průměrný počet událostí za časový interval.	Poissonovo rozdělení.	Počet poruch za směnu. Počet zakázek za 1 hod.
Průměrný časový interval mezi událostmi.	Negativně exponenciální rozdělení. Logonormální rozdělení. Erlangovo rozdělení.	Čas mezi poruchami. Čas mezi zakázkami. (např. $\varnothing$ každé 2 hodiny)
Symetrické odchylky od střední hodnoty.	Normální rozdělení. Oříznuté normální rozdělení.	Chyby měření.
Histogram.	Pravděpodobnostní rozdělení na základě statistických testů. Uživatelské rozdělení ve formě histogramu.	Modelování poruch ⁴ . Příchod zakázek. Zmetkovitost výroby.

Tab. 4-1 Příklady zadávání vstupních dat pomocí statistických rozdělení

Často používaná pravděpodobnostní rozdělení (podle [ŠRA-98a], [HUM-97]):

- Trojúhelníkové rozdělení - používá se tam, kde máme pouze *přibližné informace* (např. příchod zakázek v rozmezí 10 - 15 min), zadává se minimum, maximum a modus (nejpravděpodobnější) hodnota,
- Rovnoměrné rozdělení - podobně jako trojúhelníkové se používá v případě *přibližných informací*, zadává se minimální a maximální hodnota,
- Binomické rozdělení - používá se tam, kde známe *pravděpodobnost výskytu určitého jevu* (např. počet zmetků v dodávce),
- Poissonovo rozdělení - používá se tam, kde známe *průměrný výskyt událostí v určitém časovém intervalu* (např. průměrný počet zakázek za den),
- Normální rozdělení - používá se tam, kde *dochází k symetrickým odchylkám od střední hodnoty* (např. chyby měření, kvalita dodávek, tloušťka materiálu),
- Oříznuté normální rozdělení - *podobně jako u normálního rozdělení*, když veličina nepřesáhne určité meze,
- Negativně exponenciální rozdělení - používá se tam, kde je znám *průměrný časový interval mezi jednotlivými událostmi* (např. průměrná doba mezi poruchami),
- Weibullovo rozdělení - používá se při modelování *výskytu poruch*,
- Erlangovo rozdělení - *podobně jako Negativně exponenciální rozdělení*,
- Logonormální rozdělení - *podobně jako Negativně exponenciální rozdělení*.

4

Pro modelování poruch se často používá Weibullovo rozdělení, popř. lze použít strategii nastiněnou v [MAN-94].

Verifikace a validace jsou nedílnou součástí tvorby modelu.

Přesnost a správnost výsledků simulace závisí na jedné straně na kvalitě dostupných údajů, na druhé straně jich není možné dosáhnout bez důsledné kontroly funkčnosti a správnosti modelu⁵. Průběh a výsledky kontroly mohou mít za důsledek opětovné přezkoumání dat, jejich doplnění, popř. nové nadefinování struktury modelu.

V praxi se osvědčily následující postupy kódování (programování modelu) a kontroly (verifikace a validace) modelu:

- postupné zvyšování složitosti (od jednodušších modelů ke složitějším),
- využití řady číselných a grafických prvků (znázornění aktuálního stavu jednotlivých parametrů a elementů, a tak zlepšit orientaci v modelu),
- ověřování po částech (vyhodnocení trendů jednotlivých dynamických veličin, jejich závislost na počátečních podmínkách, apod.),
- srovnání výstupů modelu s reálem (historická data, odhady expertů, skutečná data z provozu aj.),
- srovnání s podobným systémem.

Náklady na vlastní vytvoření modelu včetně jeho validace je možné výrazně ovlivnit výběrem vhodného simulačního nástroje (viz kap. 3.4, obr. 3-4).

Sebelepší simulační program však nestačí, když „náklady přímo explodují příliš velkou přesností modelu nebo se generují chybné výsledky neúplnými vstupními daty.“ [NOCH-93b]

5

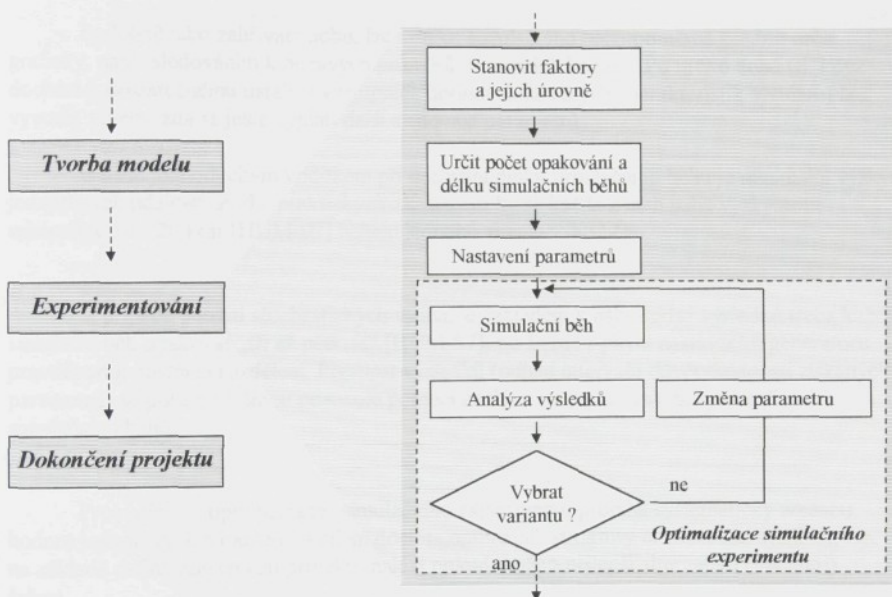
Pro částečné ověřování funkčnosti modelu (správnosti naprogramování, mikrokontrola výstupů) se používá pojem verifikace. Ověření platnosti konečného modelu se nazývá validace.

4.4 Experimentování

Experimentováním se rozumí „cílené empirické zkoumání chování modelu opakováním simulačních běhů se systematickou změnou parametrů“ [VDI-93].

Tato etapa (viz obr. 4-6) slouží k vyhledání takových parametrů či vlastností modelu, které by byly přenositelné na reálný systém. Lze ji rozdělit na dvě části:

- plánování simulačního experimentu,
- provádění a „optimalizace“⁶ simulačního experimentu.



Obr. 4-6 Etapa experimentování

Experimentování není zkoušení.

Před vlastním experimentováním je třeba v rámci plánování (navrhování) simulačního experimentu stanovit jednotlivé parametry, které se budou měnit (faktory) a hodnoty, jakých může daný parametr nabývat (úrovně faktorů).

⁶

Pod pojmem „optimalizace“ se zde rozumí nalezení tzv. „vyhovujícího“ řešení problému, tzn. „nejlepší“ („přijatelné“) varianty z daných alternativ. Nejedná se tedy o nalezení matematického minima či maxima předem dané účelové funkce ($y' = 0$), od kterého se toto „vyhovující“ řešení může více či méně odlišovat.

Dále je nutné určit délku simulačních běhů a počet jejich opakování.

Přitom se musí zohlednit tzv. zahřívací doba (warm - up period), která slouží k počátečnímu naplnění zásob ve skladech a zásobnících výrobního systému. Tento neustálený stav po startu simulace totiž ovlivňuje výstupní hodnoty sledovaných charakteristik. Jeho vliv se proto většinou eliminuje buď prodloužením simulačních běhů nebo vynulováním statistik po uplynutí zahřívací periody. Někdy se zahřívací doba nahrazuje vhodným nastavením počátečních podmínek (např. naplněním mezikladů). To je však možné pouze tehdy, když je k dispozici dostatek informací.

Zahřívací periodu je možné určit matematicky (např. Welchovou metodou, viz např. [ROB-94]), odhadem nebo sledováním grafických výstupů.

Podobně jako zahřívací dobu, lze i délku simulačního běhu poměrně snadno určit graficky, např. sledováním klouzavých průměrů výstupních hodnot. Po určité době (tj. když dochází k dostatečnému ustálení výstupních hodnot sledovaných charakteristik systému) lze vyvodit závěry, zda se ještě vyplatí další sledování parametrů.

Dalším jednoduchým vodítkem při určování délky simulačního běhu je minimální výskyt jednotlivých událostí. Podle praktických zkušeností by se každá z nich měla vyskytnout minimálně 10 - 20 krát [HUM-97] během jednoho simulačního běhu.

V případě použití stochastických veličin je vzhledem k náhodnosti výsledků třeba každý simulační běh opakovat „tři až pětkrát“ [HUM-97], po každé s jiným nastavením generátoru pravděpodobnostních rozdělení. Přesnost výsledků (odhad intervalu důvěryhodnosti získaných parametrů) se potom většinou posuzuje pomocí analýzy rozptylu výsledků jednotlivých simulačních běhů.

Provádění a „optimalizace“ simulačního experimentu probíhá systematicky změnou hodnot jednotlivých parametrů s cílem docílit „optimální“ struktury či vlastností systému, tzn. na základě definovaných cílů projektu nalézt pokud možno nejlepší alternativu (variantu) řešení.

Vlastnosti „optimalizace“ simulačního experimentu (podle [BAR-93]):

- komplexní strukturu často není možné optimalizovat jednoduchou změnou parametrů,
- změna simulačního modelu je možná jen v rámci zadaných parametrů,
- změna jednoho parametru může mít různý vliv na více cílových veličin,
- význam vyhodnocovacích (cílových) kritérií závisí na cílech projektu,
- lze těžko podat důkaz o „optimální“ variantě,
- exaktní výpočet vlivu změny parametrů na jednotlivá cílová kritéria nebo na celý systém není analyticky možné, tím není možné analyticky popsat hodnotu výrobního systému.

Často používané „optimalizační“ postupy:

- enumeration,
- cílené hledání:
 - gradientní postupy,
 - genetické algoritmy,
 - znalostní hledání.

Enumeration představuje postupné vyzkoušení všech kombinací parametrů v rámci oblasti řešení (úplné faktoriální experimenty). Výhodou tohoto postupu je vyhodnocení skutečně nejlepší varianty ze všech daných alternativ. Při větším počtu sledovaných parametrů je však jeho nevýhodou značné množství kombinací a tak čas potřebný pro jejich provedení a vyhodnocení.

Tuto nevýhodu odstraňují postupy cíleného hledání, které na základě svých vnitřních algoritmů snižují počet zkoumaných variant na „únosnou“ míru.

Princip gradientních postupů spočívá v postupném zvyšování jednotlivých úrovní parametrů vždy o jeden krok a vyhledání varianty s největším přírůstkem cílového kritéria. Takto nalezená varianta se stává výchozí pro další zvyšování úrovní. Tyto metody jsou rovněž spojeny s poměrně velkým počtem kombinací. Nejznámější z nich je metoda Hill-Climb. V poslední době se prosazuje i metoda Simulated Annealing (simulované žihání). Tato metoda je podobná metodě Hill Climbing, umožňuje však akceptovat i „horší“ řešení než je „aktuální“ řešení. Je zde proto větší šance pro nalezení globálního „optima“.

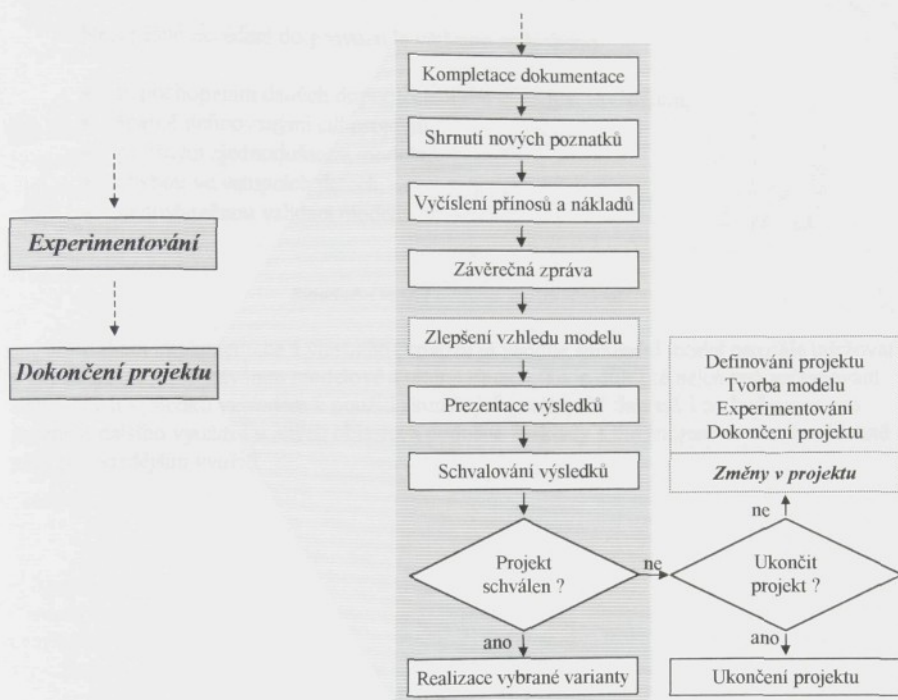
Genetické algoritmy vycházejí z evoluční teorie. Využívají se vzhledem k jejich nezávislosti na řešeném problému.

Znalostní (expertní) systémy pomocí uložených znalostí formou podmínek a pravidel pomáhají uživateli vyhledat „optimální“ variantu. Při používání těchto postupů se však naráží na problém, že ne vždy lze pravidly popsat všechny kombinace parametrů zkoumaného procesu.

V posledních letech se prosazuje tzv. interaktivní simulace a „optimalizace“, která kombinuje automatické generování variant (na základě zvoleného „optimalizačního“ postupu) a ruční rozhodování. Automaticky nalezené „nejlepší“ varianty se většinou podrobují ještě dalšímu zkoumání. Výsledná varianta tedy nemusí být ta, která byla automaticky vygenerována jako „optimální“.

4.5 Dokončení simulačního projektu

K závěrečným pracím simulačního projektu patří především kompletace dokumentace, tvorba závěrečné zprávy, prezentace výsledků, rozhodování o úspěšnosti projektu a zavádění zvolené varianty (viz obr. 4-7).



Obr. 4-7 Etapa dokončení simulačního projektu

Z uvedeného obr. 4-7 je na první pohled zřejmý význam úzké spolupráce celého realizačního týmu a kontrolních bodů po každé etapě simulačního projektu (tj. *důsledného dodržování zásad týmové práce a projektového řízení*), protože případné neschválení výsledků simulačního projektu v této etapě může mít za následek opětovné nastartování celého cyklu:

Definování projektu → Tvorba modelu → Experimentování → Dokončení projektu

Důkladné zaškolení „zaváděcího týmu“.

Pro úspěšné zavádění výsledků simulačního projektu do provozu je důležité dbát na důkladné zaškolení „zaváděcího týmu“, tj. vysvětlení smyslu projektu a navrhovaných opatření. Ideální je, když členové „simulačního týmu“ jsou přímo členy „zaváděcího týmu“, popř. jsou s nimi konzultovány jednotlivé kroky zavádění výsledků projektu.

Neúspěšné zavedení do provozu je většinou způsobeno:

- nepochopením daných doporučení a tím chybným zaváděním,
- špatně definovanými cíli projektu,
- přílišným zjednodušením modelu,
- chybou ve vstupních datech,
- nedostatečnou validací modelu.

Simulační model udržovat a aktualizovat.

Během implementace a vlastního provozu je vhodné simulační model neustále udržovat a aktualizovat porovnáváním modelové a reálné situace. To je důležité nejen pro zpřesňování simulačních výsledků vzhledem k použití skutečných „reálných“ dat, tak i do budoucna pro možnost dalšího využití i v jiných oblastech podniku. Náklady s tím spojené se mnohonásobně vrátí při pozdějším využití.

4.6 Zavádění počítačové simulace

Simulaci lze v principu zavádět následujícími způsoby:

- simulací ve vlastní režii,
- nakoupením hotového simulačního projektu od konzultační firmy,
- kombinací obou předchozích variant.

Zpracování simulačního projektu ve vlastní režii (tj. zakoupení simulačního programu a simulace vlastními silami) se většinou používá tam, kde se řeší více projektů ročně a simulace se využívá takřka po celý rok. Proto je vhodná zejména pro velké firmy, popř. tam, kde lze očekávat značné přínosy ze simulace. Její výhodou je, že ve firmě zůstává simulační Know-How a možnost využití simulačního modelu i pro další činnosti v podniku. Nevýhodou jsou vysoké náklady spojené s pořízením simulačního programu (cena SW, vyškolení pracovníků, licenční poplatky) a nutnost vyčlenit pracovníka na simulaci.

Nakoupení pilotního projektu od konzultační firmy je vhodné tam, kde je využití simulace sporadické (cca 1 - 2 projekty ročně), v případě časově kritických projektů nebo vysoké nejistotě při formulaci vlastních požadavků či tam, kde jsou nízké investice (podle [NOCH-93b] menší než 30 tisíc DM). Mezi výhody tohoto řešení patří relativně levné řešení (nemusí se kupovat drahý SW), nakoupení celého projektu najednou a psychologický moment (řešení externí firmy se mnohdy snadněji prosazuje). Značnou nevýhodou je to, že logika řešení zůstává u externí firmy.

Jako zajímavé řešení se jeví poslední varianta vzniklá kombinací obou předchozích způsobů, tzn. provádění simulačních projektů vlastními silami v úzké spolupráci s konzultační firmou, která se zabývá počítačovou simulací. Toto řešení může být sice v konečném součtu dražší než druhá varianta (viz obr. 3-2, str. 25) a pro vyloučení duplicity prací vyžaduje koordinaci jednotlivých činností, přináší však další dodatečné výhody:

- nezátížený pohled na firmu,
- externí simulační Know-How,
- možnost souběžné práce a tím zkrácení času projektu,
- konzultace vlastních záměrů na pracovišti konzultační firmy znalé problematiky počítačové simulace,
- logika řešení zůstává u zadavatele,
- možnost dalšího využití již vytvořeného simulačního modelu,
- zainteresování vlastních pracovníků na řešení projektu,
- úzká spolupráce přináší často netradiční řešení.

Při zavádění počítačové simulace je třeba si uvědomit i následující okolnosti:

Zvolit vhodnou metodu a postup řešení.

Ne vždy je pro řešení daného problému nutné použít počítačovou simulaci. Pro jednoduché projekty, popř. pro získání prvotní představy o systému, může být hospodárnější jiná, např. analytická metoda. To však vyžaduje velmi dobré znalosti jak o zkoumaném systému, tak i o metodách, které lze využít.

Simulaci je třeba nasadit včas.

Největšího efektu a tím i úspor lze dosáhnout v počátečních fázích projektu, tj. už v oblasti počáteční studie systému.

Simulace nenahrazuje plánování.

I nejlepší simulační systém je pouze podpůrným nástrojem, vlastní rozhodování (důkladná analýza systému, výběr vhodné strategie tvorby modelu, validace modelu, plánování experimentů, apod.) zůstává stále na uživateli.

Simulační projekt ovlivňuje už úvodní etapa.

Na délku trvání simulačního projektu má výrazný vliv nejen použitý simulační nástroj, nýbrž hlavně stanovené cíle projektu a zjednodušení modelu. Přitom hraje důležitou roli odbornost a zkušenost simulačního týmu.

Vysoké nároky na tvorbu simulačního modelu.

Tvorba simulačního modelu vykazuje značné nároky na čas a získávání vstupních údajů. Při tvorbě modelu se snažíme o jednoduchý model, ale přitom s vysokou vypovídací hodnotou (viz kap. 4.2). Příliš velké zjednodušení modelu však může vést ke zkreslení reálného systému, příliš podrobný model je spojen s vysokými náklady, které nejsou vykoupeny přesnějším modelem (viz obr. 4-4).

Poměrně značné vstupní investice do simulačního systému.

Zatímco odpovídající HW vybavení je možné pořídit řádově v desítek tisících, vlastní simulační program stojí v závislosti od počtu nadstavbových modulů přibližně 700.000,- Kč až 1.500.000,- Kč za jednu licenci. Přesto se při jeho výběru nevyplatí „šetřit za každou cenu“ a pořídit si „nejlevnější“ systém, neboť největší nákladovou položkou simulačního projektu tvoří mzdové náklady (viz kap. 3.3), které je možné vhodným simulačním nástrojem výrazně ovlivnit.

Při nedostatečné kvalifikaci možnost chybné interpretace výsledků.

Je třeba si uvědomit, že se jedná o statistické výsledky s určitou statistickou chybou. Rovněž fakt, že se jedná o zkoumání na zjednodušeném modelu reálného systému, může vést ke zkreslením. Výsledky proto nelze „pouze generovat“, musí se také správně interpretovat.

5. Příklady využití

Tato kapitola slouží ke znázornění možností využití počítačové simulace a popsané metodologie zpracování simulační studie při řešení konkrétních projektů.

Všechny uvedené demonstrační příklady byly vypracovány na Katedře výrobních systémů a slouží pro prezentační účely a výuku studentů v oboru „Výrobní systémy“. Při jejich řešení byl využit simulační systém WitnessTM firmy Lanner Group Limited.

5.1 Stručná charakteristika simulačního systému WitnessTM

Simulační systém WitnessTM je moderní vizuální a interaktivní systém pro simulaci obchodních, logistických a výrobních procesů.

Systém se vyznačuje poměrně snadnou tvorbou simulačního modelu. Ta je ulehčena jak grafickým uživatelským prostředím, tak i nadefinovanou knihovnou standardních prvků (elementů). Parametry jednotlivých prvků se zadávají tabulkovou formou do příslušných kolonek vstupní obrazovky (formuláře). Zde lze zapsat všechny relevantní informace o příslušném prvku, tzn. nejen pracovní cyklus, ale i vstupní a výstupní pravidla, informace o obsluze, seřizování, směnnosti, poruchách apod.

Pro definování složitých pravidel a akcí na začátku, popř. ukončení jednotlivých činností lze využít programovací jazyk WCL (Witness Command Language).

Pro sledování modelovaného systému lze kromě standardních statistik (např. využití strojů a pracovníků, průměrné průběžné doby, průměrná rozpracovanost výroby, apod.) použít i procesního zobrazení toku materiálu, popř. jeho znázornění pomocí tzv. meteorových stop.

Práci ulehčuje i interaktivní práce s modelem. Simulaci lze v libovolném čase zastavit, změnit parametry modelu a dále v simulaci pokračovat. Možný je i návrat „zpět“ k některému z předcházejících stavů systému.

Základní funkce simulačního systému je možné rozšířit o nadstavbové (plug - in) moduly. Pro ulehčení experimentování je určen modul Optimizer a pro znázornění modelu v jeho reálných 3D rozměrech modul Virtual Reality. Pro urychlení tvorby simulačního modelu, popř. pro jeho hrubý návrh lze využít i rozhraní k programu MatFlow, který slouží k optimalizaci materiálových toků.

5.2 Projektování výroby

Následující demonstrační příklad znázorňuje využití počítačové simulace při návrhu výrobního systému na obrábění pistů.

5.2.1 Definování projektu

Výchozí stav

Výroba byla reprezentována klasickým technologickým uspořádáním výroby, které tvořily oddělené provozy automatární a obroben. Toto dispoziční řešení se vyznačovalo dlouhými průběžnými dobami výroby, vysokou rozpracovaností výroby a vysokými výrobními náklady.

Vzhledem k těmto skutečnostem a rozšiřování výroby bylo nutné provést zásadní reorganizaci stávajícího výrobního systému.

Po důkladné analýze byly proto navrženy základní varianty struktury výrobního systému, které byly založeny na principech předmětného, buňkového uspořádání a skupinové technologie.

Cíle simulačního projektu

Cílem počítačové simulace je ověřit navrženou strukturu výrobního systému vzhledem k jeho dynamickým vlastnostem a určit „optimální“ variantu výroby pistů, kterou lze dosáhnout krátkých průběžných dob a nízké rozpracovanosti výroby při současně dostatečném využití jednotlivých pracovišť. Vybraná alternativa výrobního systému by měla být rovněž robustní ke změnám ve výrobním sortimentu.

Pro zvolenou variantu je třeba v další části simulace najít „optimální“ výrobní a transportní dávky.

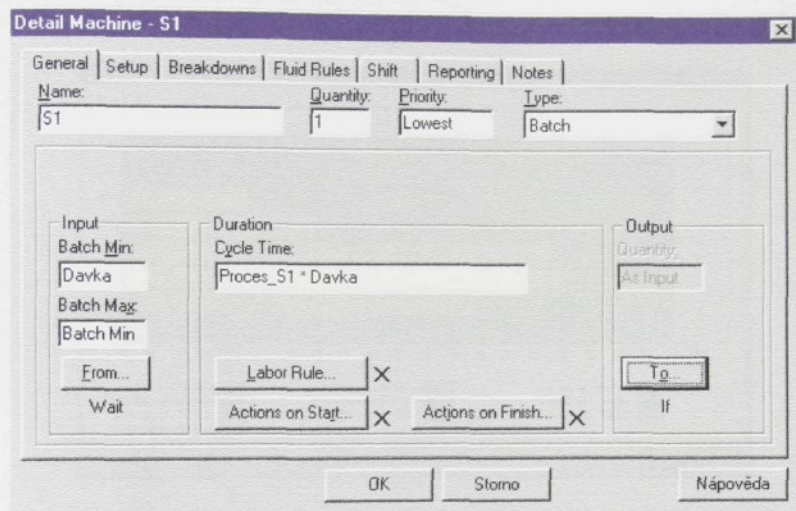
Rozsah a zjednodušení modelu

Hranice modelu tvoří přísun polotovarů na jedné straně a vstup do montážní linky na straně druhé.

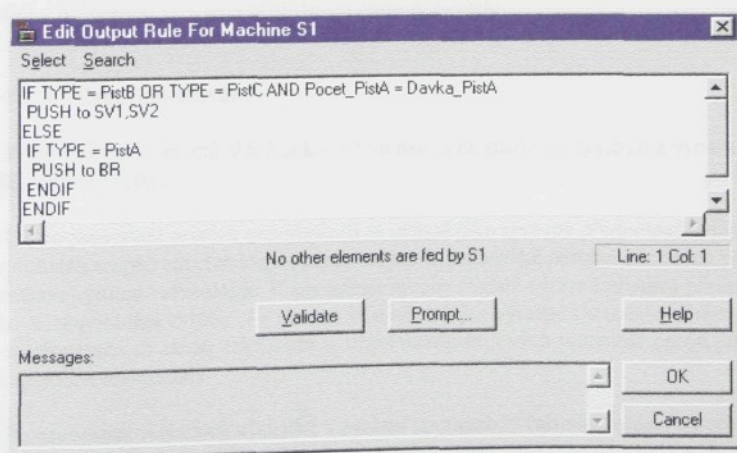
Pro usnadnění tvorby simulačního modelu a urychlení vlastní simulace se uvažuje s následujícími zjednodušujícími předpoklady. Vzhledem ke krátkým vzdálenostem mezi jednotlivými pracovišti se nepřihlíží k transportním časům a vzdálenostem. Třisměnný provoz umožňuje zanedbat směnové časy. Rovněž se předpokládá bezporuchový provoz jednotlivých pracovišť.

5.2.2 Tvorba modelu

Protože se jedná o výrobu pístů v několika variantách, bylo pro modelování využito tzv. dávkových strojů („Batch machine“ - viz obr. 5-1), které jsou vzájemně propojeny pomocí vstupních a výstupních pravidel typu IF - THEN (viz obr. 5-2). Tato pravidla tvoří vlastní logiku modelu.



Obr. 5-1. Příklad vstupní obrazovky v simulačním systému Witness™



Obr. 5-2. Příklad výstupního pravidla v simulačním systému Witness™

Vstupní data tvoří jednak vstupní sekvence výrobních dávek jednotlivých variant výrobků, tak i parametry použitých elementů modelu (hlavní a vedlejší časy, velikost transportní dávky apod.).

Výstupy modelu jsou hlavní charakteristiky výrobního systému (produktivita, rozpracovanost a průběžná doba výroby, využití jednotlivých pracovišť). Pro jejich sledování se využily standardní statistiky simulačního systému Witness™. Příklad statistiky vytižení jednotlivých strojů je uveden na následujícím obr. 5-3.



Obr. 5-3. Příklad statistiky vytižení pracovišť

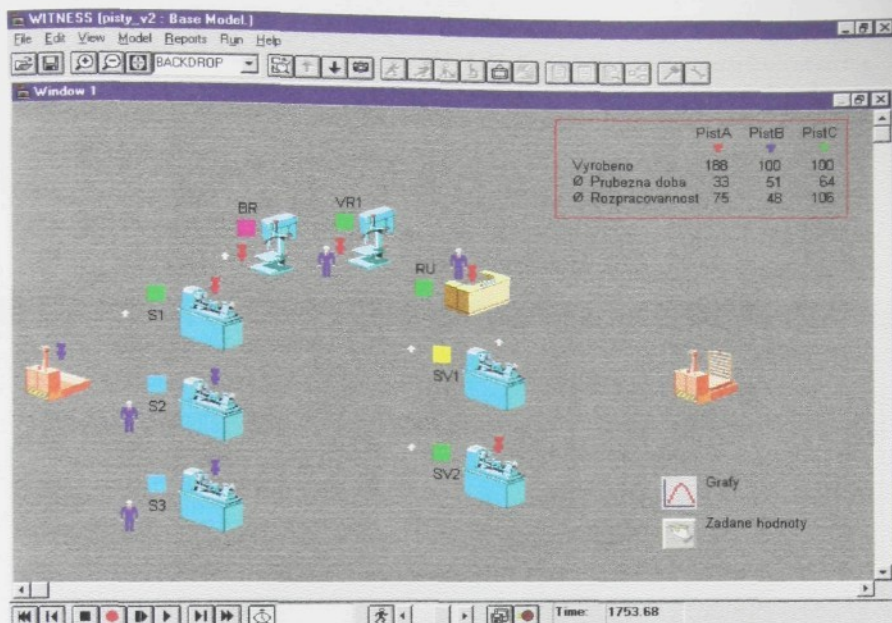
Celý model je vytvořen jako parametrický model, tzn. změny vstupních parametrů se automaticky promítnou ve všech příslušných částech modelu.

5.2.3 Experimentování

První část experimentů sloužila k ověření navržené struktury systému a výběru „nejlepší“ varianty řešení.

Už po provedení prvních experimentů se ukázal jako správný předpoklad snižování počtu výrobních stupňů sdružováním operací na jedno pracoviště pomocí vhodných přípravků, popř. změnou výrobní technologie. K plynulosti výroby rovněž výrazně přispívá předmětné (výrobkové) uspořádání výroby. To vše má za důsledek jak výrazné zkrácení průběžných dob a snížení mezioperačních zásob, tak i vyšší vytižení úzkoprofilových pracovišť oproti původnímu technologickému uspořádání.

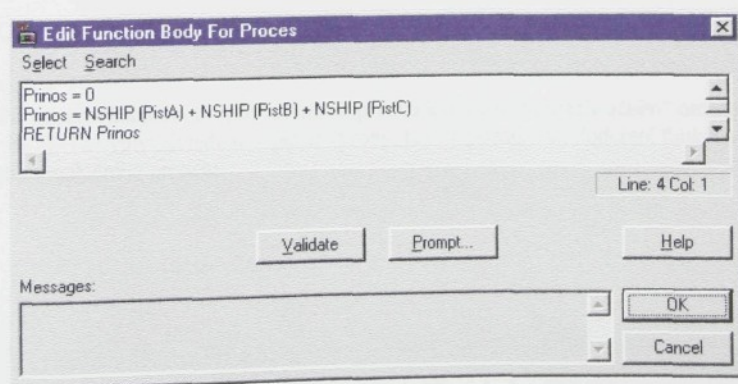
Po porovnání získaných výsledků a zvolení „optimální“ varianty řešení (viz obr. 5-4), se přistoupilo k „optimalizaci“ výrobních a transportních dávek. Pro tuto část byl využit nadstavbový modul Witness™ „Optimizer“.



Obr. 5-4. Struktura výrobního systému v simulačním systému Witness™

Při používání „optimalizačního“ modulu je kromě nastavení parametrů „optimalizace“ a „optimalizačních omezení“ zapotřebí nadefinovat tzv. „účelovou“ funkci, která slouží k porovnání výsledků jednotlivých vygenerovaných variant.

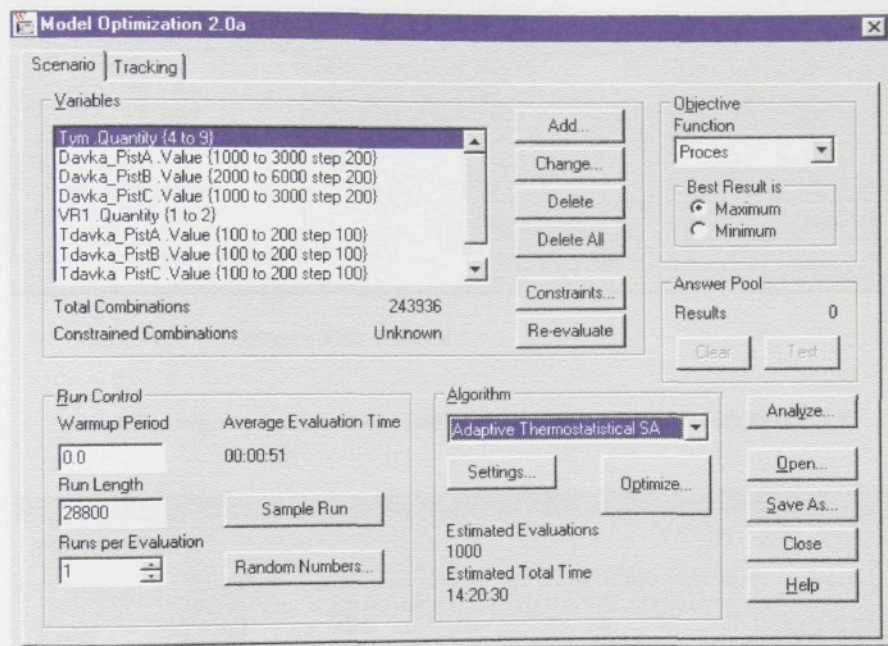
Na základě daných cílů simulačního projektu je „účelová“ funkce stanovena tak, aby vracela hodnotu, která sleduje průtok výrobků (viz obr. 5-5).



Obr. 5-5. Účelová funkce

Při „optimalizaci“ se automaticky mění hlavní parametry modelu (výrobní a transportní dávky, počet pracovníků a počet strojů, viz obr. 5-6). Rozsah hodnot parametrů výrobních a transportních dávek se nastavil na základě počtu kusů v transportní paletě a orientačního analytického výpočtu minimální výrobní dávky⁷.

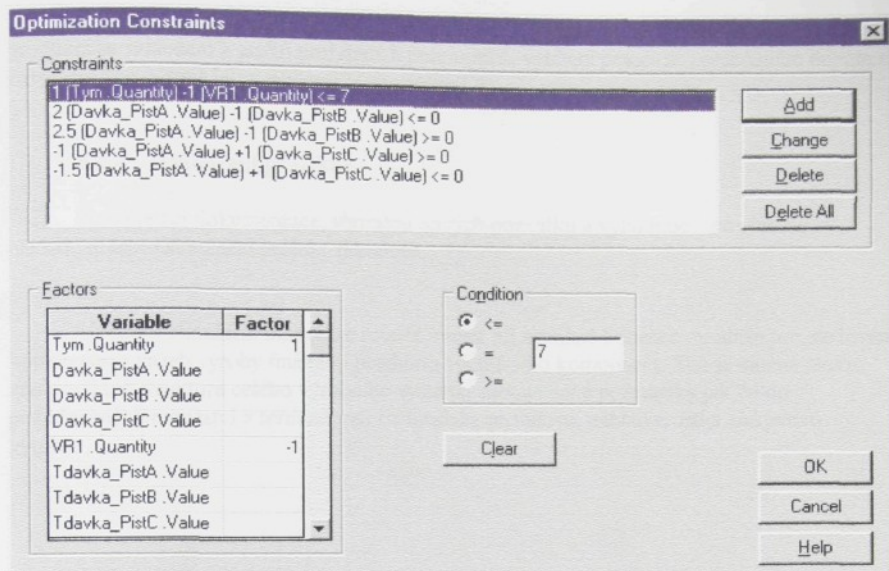
Vzhledem ke značnému počtu možných kombinací (viz obr. 5-6) byla pro „optimalizaci“ použita moderní heuristická metoda „Adaptive Thermostatical Simulated Annealing“ (simulované žhání, viz str. 41).



Obr. 5-6. Vstupní obrazovka modulu „Witness™ Optimizer“

Při generování jednotlivých variant se přihlíží k daným „optimalizačním“ omezením (viz obr. 5-7). Ta vyplývají jednak z plánu výroby, tak i z požadavku dodržení funkčnosti (platnosti) simulačního modelu.

⁷ Výpočet minimální výrobní dávky viz např. [NĚM-86], popř. [ZEL-93b].



Obr. 5-7. „Optimalizační“ omezení

Výsledky vygenerovaných variant (seříděné sestupně) jsou znázorněny na obr. 5-8.

Results - Best 50

Results | Results Chart

	Evaluation	Proces	Tym_Quantity	Davka_PistA	Davka_PistB	Davka_PistC	VR1_Quantity	Tdavka_PistA	Tdavka_PistB	Tdavka_PistC
1	30	27365	5	1400	3200	1400	2	200	200	200
2	39	27352	5	1600	3400	1600	2	200	200	200
3	81	27352	4	1400	2800	1400	2	100	100	200
4	33	27168	4	1400	3200	1400	2	200	200	200
5	46	27162	5	1400	3200	1400	2	100	200	200
6	31	27154	5	1400	3200	1600	2	200	200	200
7	43	27153	5	1600	3200	1600	2	200	200	200
8	48	27069	5	1400	2800	1400	2	100	200	200
9	68	27053	6	1200	3000	1400	2	100	200	200
10	76	26965	4	1400	2800	1400	2	100	200	200

Sort Ascending

Sort Descending

Set Model

Set Suggested

Print

Close

Help

Obr. 5-8. Výsledky „optimalizace“

Protože se výsledky „nejlepších“ variant liší jen nepatrně, je třeba provést dodatečnou analýzu nastavení jejich parametrů.

Z posouzení těchto parametrů a ověřovacích experimentů vyplývá, že při srovnatelné produkci se vzhledem k počtu potřebných pracovníků, vytížení pracovišť, průběžným dobám i rozpracované výrobě jako „nejlepší“ jeví varianta 81.

5.2.4 Dokončení projektu

Kompletací dokumentace, shrnutím nových poznatků a vyhodnocením přínosů i nákladů je tento simulační projekt zakončen.

Uvedený simulační model lze rovněž využít při simulaci konečné montáže pro sledování komplexních vazeb výroby finálního produktu včetně jeho komponent. Tak je možné ověřit, zda navržená struktura celého výrobního systému splňuje dané požadavky jak co do požadovaných množství a termínů, tak i z hlediska plynulosti, nákladovosti a ziskovosti výroby.

5.3 Analýza a zlepšování stávajícího výrobního systému

Na tomto demonstračním příkladu je ukázáno využití počítačové simulace při analýze uspořádání pracoviště dokončovacích prací na lakovaných dílech.

5.3.1 Definování projektu

Výchozí stav

Výchozí stav byl tvořen odděleními pracovišti odebírání lakovaných dílů, kontroly, pulírování a přebroušení před přelakem. Rozhodující pro následný logistický tok je počáteční kontrola po svěšení z dopravníku, na základě které se díly převezou na příslušná pracoviště.

Vzhledem ke značným přepravním vzdálenostem a nutnosti řešit rozšiřování výroby byla provedena analýza logistického toku a navrženy dvě základní varianty uspořádání pracovišť dokončovacích prací. Jednotlivé varianty se od sebe lišily jak vlastní dispozicí, tak i posloupností vykonávaných dokončovacích činností.

Cíle simulačního projektu

Cílem simulace je prověřit navržené varianty logistického uspořádání pracoviště a zjistit, zda analyticky stanovený počet pracovišť odpovídá dynamickému, stochastickému chování systému.

Rozsah a zjednodušení modelu

Hranice modelu tvoří výstup z lakovací linky na jedné straně a odvoz hotových dílů do skladu na straně druhé.

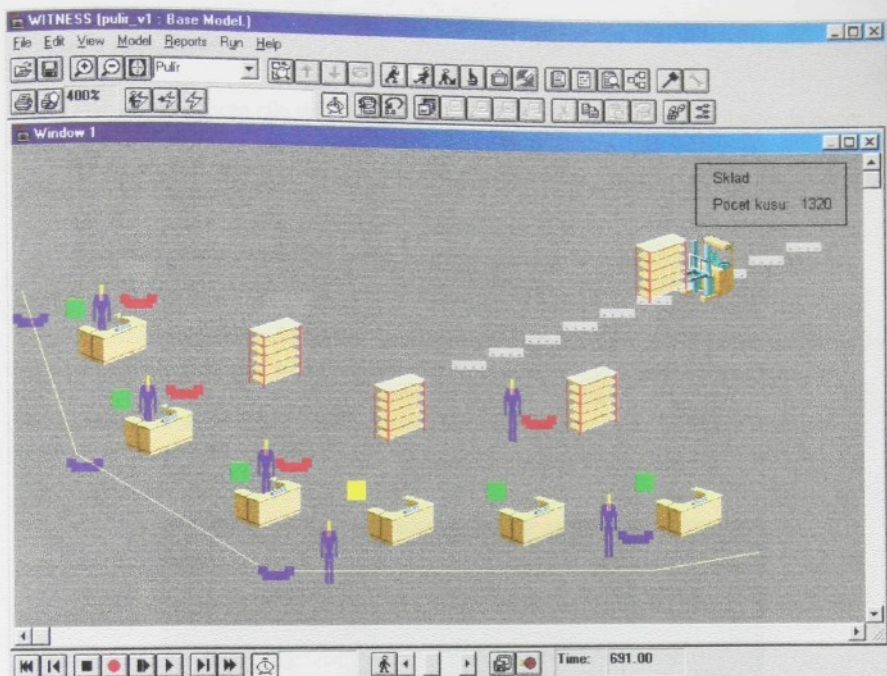
Vzhledem k poměrně jednoduchému popisu problému není třeba provádět zvláštní zjednodušení ve struktuře simulačního modelu.

5.3.2 Tvorba modelu

Struktura modelu je tvořena jednotlivými ručními pracovišti.

Vstupní data jsou reprezentována jak vstupní sekvencí lakovaných dílů, která je dána pracovním cyklem lakovny, počtem navěšených dílů a procentem dobrých kusů, tak i pracovními cykly jednotlivých dokončovacích činností. Ty jsou vzhledem k jejich značnému rozptýlu zadány ve formě uživatelsky nadefinovaného histogramu.

V modelu (viz obr. 5-9) se sleduje plynulost výroby (graf průběžných dob) a počet zaskladněných kusů.



Obr. 5-9 Struktura modelu v simulačním systému Witness™

5.3.3 Experimentování

První část experimentů sloužila k ověření dynamického a stochastického chování jednotlivých variant.

Protože se jedná o jednoduchý výrobní systém s krátkými průběžnými dobami výroby, byla délka simulačního běhu nastavena na 720 min, což reprezentuje jednu směnu v nepřetržitém provozu. Tato doba zcela postačuje k minimalizaci vlivu tzv. „zahřívací doby“ a k vyslovení relevantních závěrů o průchodnosti systému.

Vzhledem k náhodnému charakteru vstupů (generování vstupní sekvence pomocí procentuálního rozdělení a hodnot pracovních cyklů z uživatelsky definovaného histogramu) se pro každou variantu provedlo pět simulačních běhů, vždy s jiným nastavením generátoru náhodných čísel.

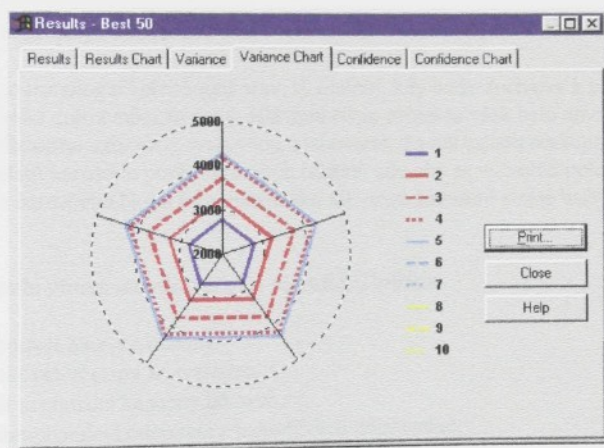
Výsledky prvních simulačních experimentů ukázaly, že pro vyrovnání vlivu rozptylu délky pracovního cyklu je u druhé varianty tzv. „týmového uspořádání“ zapotřebí většího počtu pracovišť než u první varianty. Toto uspořádání se tedy oproti první alternativě jeví jako méně vhodné.

Pro určení počtu pracovišť zvolené varianty lze opět využít nadstavbový modul „Witness™ Optimizer“.

Pro splnění tohoto cíle simulace se „účelová“ funkce nastaví tak, aby sledovala počet zaskladněných kusů. Hodnoty „optimalizačního“ parametru (počet potřebných pracovišť) byly stanoveny na základě orientačního analytického výpočtu, který vychází z průměrné pracovní doby dokončovacích činností.

Protože je počet kombinací nízký, byla pro „optimalizaci“ použita metoda „All Combinations“ (všechny kombinace), tj. byl proveden úplný faktoriální experiment.

Z výsledků (průměrná hodnota a směrodatná odchylka jednotlivých běhů) je zřejmé, že od určitého počtu pracovišť už takřka nedochází ke zvyšování produkce. Protože podle analýzy rozptylu výsledky jednotlivých simulačních běhů nevykazují významné odchylky (viz grafické znázornění rozptylu výsledných hodnot účelové funkce, obr. 5-10), lze tento počet pracovišť považovat za „optimální“.



Obr. 5-10. Grafické znázornění rozptylu jednotlivých simulačních běhů

Tento předpoklad byl ověřen dodatečným experimentem. Z něho rovněž vyplývá, že při zřízení malých vyrovnávacích zásobníků lze oproti analytickému řešení ušetřit jedno pracoviště.

5.3.4 Dokončení projektu

Simulační projekt je dokončen porovnáním jeho nákladů a přínosů (viz kap. 5.6) a kompletní dokumentace.

5.4 Řízení výroby

V této kapitole je stručně popsán příklad využití počítačové simulace při navrhování řídicí logiky ovládacího uzlu mezi svařovnou a lakovnou. Úkol se řešil formou diplomové práce (viz [ŠRA-98a]*).

5.4.1 Definování projektu

Výchozí stav

Výchozí stav byl reprezentován dvěma dopravníky ze svařovny a jedním do lakovny. V místě zvaném „převěšovák“ (v modelu nazýván „uzel“) dochází k odběru karosérii z dopravníků ze svařovny a přemístění na dopravník do lakovny za neustálé kontroly řídicího dispečera. Z hlediska seskupování barevných odstínů se jedná o neřízený stav.

Cíle simulačního projektu

Simulační projekt sledoval dva cíle.

Jednak „odsimulovat“ přechodný stav, tj. období, kdy bude docházet k postupnému nahrazování starého dopravníku za nový. Hlavním cílem projektu však bylo navrhnout novou logiku řízení ovládacího uzlu mezi svařovnou a lakovnou. Ta má zajistit seskupování jednotlivých skeletů karosérie podle barevných odstínů tak, aby se vytvořila pokud možno maximální délka barevného bloku (tzn. maximální sekvence karosérií stejné barvy) vstupujícího do lakovny.

Logika uzlu přitom musela splňovat následující kritéria:

- seskupovat barevné odstíny,
- neblokovat výstupy ze svařoven,
- využít maximální kapacity lakoven,
- dodržet plynulost odebrání z jednotlivých dopravníků,
- splnit plánovanou denní produkci.

Rozsah a zjednodušení modelu

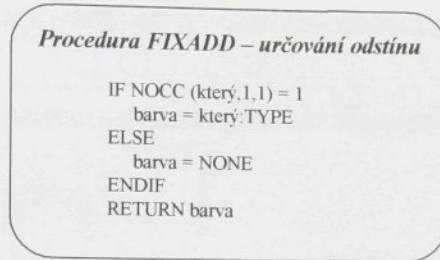
Hranice modelu tvoří výstupy ze svařovny a vstup do lakovny.

Pro zjednodušení lze výstupy ze svařovny, vstup do lakovny a cykly převěšováků nahradit pseudo-pracovními cykly jednooperačních strojů („Single machine“), kontinuální řetězové dopravníky je možné modelovat pomocí válečkových dopravníků. Rovněž se uvažuje zidealizovaný bezporuchový stav všech elementů modelu kromě výstupů ze svařovny a vstupu do lakovny.

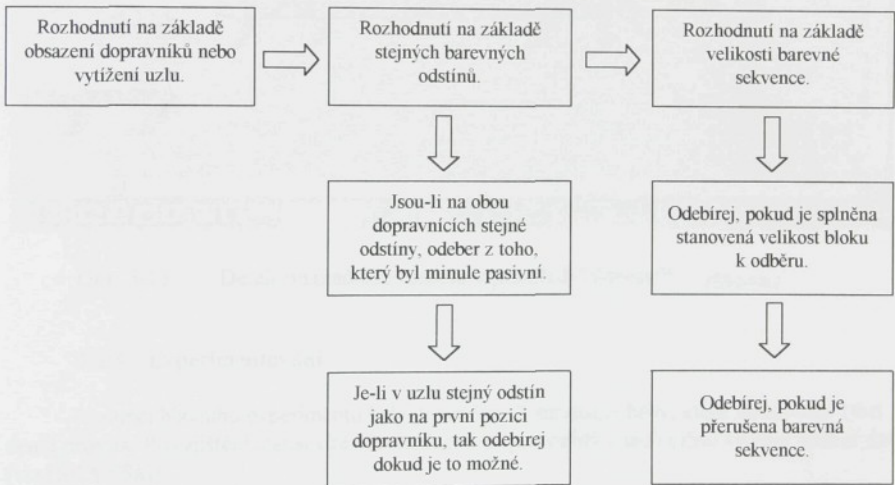
* Autor habilitační práce byl vedoucím uvedeně diplomové práce

5.4.2 Tvorba modelu

Struktura modelu odráží daná zjednodušení. Jednotlivé prvky jsou propojeny pravidly, které společně s uživatelsky nadefinovanými procedurami (viz obr. 5-11) tvoří vlastní logiku modelu (viz obr. 5-12).



Obr. 5-11. Ukázka procedury v jazyce „Witness Command Language“ [ŠRA-98a]

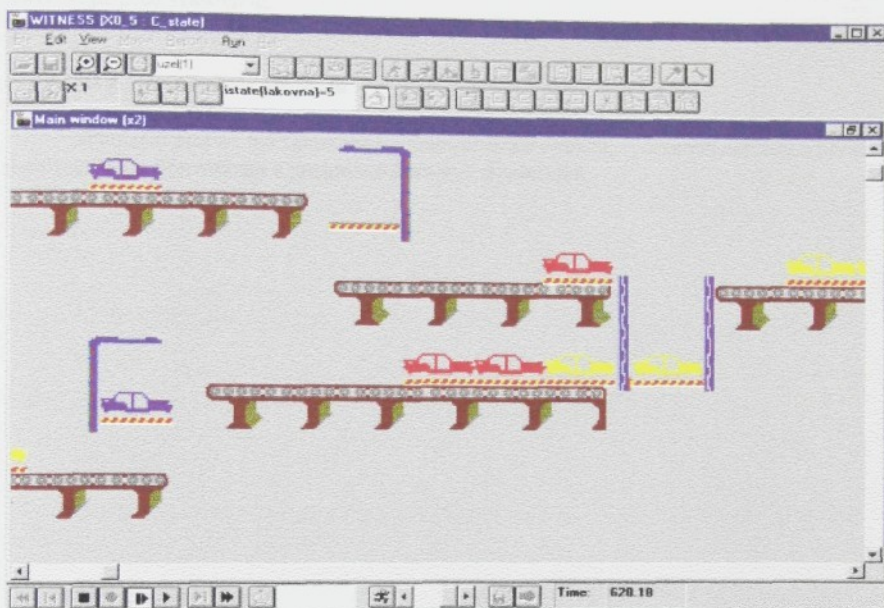


Obr. 5-12. Nástin problematiky ovládání uzlu [ŠRA-98a]

Mezi vstupy modelu patří nejen vstupní sekvence karosérii ze svařovny, která byla reprezentovaná proudem dat načítaným ze souboru, a základní data jednotlivých elementů (délka a takt jednotlivých dopravníků, pracovní cykly převěšováků, apod.). Pro ověření stochastického chování systému jsou důležité i informace o poruchách výstupů ze svařovny a vstupů do lakovny. Tato data se zadávala formou pravděpodobnostních rozdělení.

Výstupy modelu jsou prezentovány klasickou formou pomocí histogramů, koláčových a liniových grafů.

Na následujícím obr. 5-13 je znázorněn detail simulačního modelu, který přibližuje ovládací uzel mezi svařovnou a lakovnou.



Obr. 5-13. Detail simulačního modelu v prostředí Witness™ [ŠRA-98c]

5.4.3 Experimentování

V rámci hlavního experimentu byly provedeny 3 simulační běhy, které simulovaly 14-ti denní provoz. Pro zjištění statistické věrohodnosti se pro každý z nich měnil vstupní soubor dat (viz [ŠRA-98a]).

Při experimentování se sledovaly následující výstupní veličiny:

- denní produkce,
- vyřízení jednotlivých elementů,
- blokování dopravníků,
- velikost barevného bloku na výstupu z ovládacího uzlu,
- průměrná velikost barevného bloku v hodinových intervalech.

Z výsledků simulace (viz [ŠRA-98a]) je vidět zřetelný pozitivní efekt řízeného uzlu oproti uzlu neřízenému, tj. dochází takřka ke zdvojnásobení průměrné délky barevného bloku na vstupu do lakovny. To má bezprostřední vliv na snížení průměrného počtu čištění trubek, které se odrazí jak v nižších nákladech na čištění, tak i v možnosti navýšení celkové produkce výroby, protože se razantně sníží neproduktivní časy spojené s čekáním na vyčištění trubek. Během simulace se rovněž potvrdil názor o výhodnosti předběžného rovnání barevných sekvencí již před svařovnou.

5.4.4 Dokončení projektu

Simulační projekt byl zakončen kompletací dokumentace, vyčíslením nákladů a přínosů simulace, jejich porovnáním a prezentací dosažených výsledků.

5.5 Školení pracovníků

Uvedený příklad demonstruje možnosti využití počítačové simulace v oblasti zaškolování pracovníků při zavádění racionalizačních opatření.

Simulační studie navazuje na projekt reorganizace výrobního systému na obrábění pistu, který je popsán v kap. 5.2.

5.5.1 Definování projektu

Výchozí stav

Vzhledem ke značným změnám ve struktuře dosavadního výrobního systému je třeba zaškolit pracovníky na novou výrobní strategii a vysvětlit jim smysl reorganizace i navrhovaných změn.

Cíle simulačního projektu

Cílem simulačního projektu je ukázat, jak velikost transportní dávky ovlivňuje výstupní charakteristiky výrobního systému.

Rozsah a zjednodušení modelu

Protože se jedná o navazující projekt, je použit již jednou vytvořený a vyzkoušený simulační model (viz kap. 5.2).

5.5.2 Tvorba modelu

Pro znázornění závislosti změny výstupních charakteristik na vstupních parametrech lze s výhodou využít modul „Optimizer“. Proto se stávající simulační model doplní pouze o „účelové“ funkce, které vrací hodnotu jednotlivých výstupních charakteristik systému (velikost produkce, rozpracovanost a průběžnou dobu výroby).

5.5.3 Experimentování

V tomto případě není nutné provádět mnoho experimentů, proto byla pro získání požadovaných závislostí opět využita metoda „All Combinations“ (všechny kombinace). „Optimalizačním“ parametrem je transportní dávka.

Délka simulace je nastavena stejně jako u předchozího projektu na 28800 min., což reprezentuje cca. měsíční provoz v třisměnném provozu.

Z výsledků experimentování (viz obr. 5-14) je na první pohled vidět negativní dopad zvyšování velikosti transportní dávky na sledované výstupní charakteristiky výrobního systému. Z tohoto pohledu je vhodné udržovat transportní dávky na „minimální“ výši.

	Expedováno	Třídavka PistA .Value	Prub_dobaA	Prub_dobaB	Prub_dobaC	Rozpracováno
1	23000	100	722	600	1173	619
2	22700	200	1542	635	1175	785
3	20200	300	2280	713	1178	930
4	19000	400	3048	807	1203	988

Obr. 5-14. Znáznornění výsledků simulace

5.5.4 Dokončení projektu

Prezentací získaných závislostí výstupních charakteristik na změně velikosti transportní dávky a kompletací dokumentace je tento simulační projekt dokončen.

Podobným způsobem lze postupovat při vysvětlování dalších navrhovaných změn struktury výrobního systému (např. vlivu velikosti výrobních dávek a zkracování seřizovacích časů, popř. snižování počtu výrobních stupňů, apod.).

5.6 Porovnání přínosů a nákladů simulačních projektů

V této kapitole je provedeno stručné porovnání přínosů a nákladů jednotlivých simulačních projektů, které jsou popsány v kap. 5.2 až 5.5.

Projekt	Časová náročnost	Technické vybavení	Hlavní přínosy		Přínosy/náklady
1 - kap. 5.2	cca 14 dní ⁸	Stávající	Odsimulování funkčnosti navrženého výrobního systému.	Kvalit.	Porovnání se neprovádělo. ⁹
2 - kap. 5.3	cca 3 dny ⁸	Stávající	Odsimulování funkčnosti navrženého výrobního systému.	Kvalit.	cca 2 : 1 ¹⁰
			Oproti analyticky vypočtenému počtu pracovišť úspora 1 pracoviště.	Kvantit.	
3 - kap. 5.4	cca 2 měsíce ¹¹	Dokoupení potřebného technického vybavení.	Odsimulování funkčnosti nové koncepce řízení.	Kvalit.	cca 12 : 1 ¹⁰
			Úspory související s zdvojnásobením délky barevného bloku (např. nižší náklady na čištění).	Kvantit.	
4 - kap. 5.5	cca 1 den ¹²	Stávající	Vyšší kvalifikace pracovníků. Vyšší motivace pracovníků. Snazší zavádění změn.	Kvalit.	Nelze jednoznačně vyčíslit.

Legenda:

Kvalit. Kvalitativní přínos
Kvantit. Kvantitativní přínos

⁸ Využití předchozí podrobné analýzy stávajícího stavu.

⁹ Vzhledem k povaze projektu (ověření navržené struktury výrobního systému po zásadní reorganizaci stávajícího systému) a tím možnému výraznému zkreslení přínosů simulační studie (vychází se z již provedené analýzy) se neprovádělo porovnání přínosů a nákladů simulačního projektu.

¹⁰ Při zakoupení simulačního systému (jednorázový projekt).

¹¹ Včetně analýzy a sběru dat.

¹² Využití již vytvořeného simulačního modelu.

6. Závěr

Počítačová simulace diskretních událostí se stává nezbytným podpůrným nástrojem v oblasti zefektivňování provozu výrobních systémů. To je způsobeno nejen její schopností napodobovat a sledovat stochastické i dynamické vlastnosti jednotlivých procesů a tak předpovídat jejich chování.

Důležitou roli hraje i fakt, že dnešní, tzv. „turbulentní“ prostředí vyžaduje změnit dosavadní přístup k řešení výrobního systému. Jeho efektivního provozu již totiž nelze dosáhnout pouze „lokální“ optimalizací jednotlivých parametrů či subsystémů, nýbrž je třeba na celý systém nahlížet komplexně (globálně) a hledat „optimum“ systému jako celku. Při řešení komplexních, dynamických úloh však analytické metody často narážejí na hranice svých možností a je nutné využít počítačovou simulaci.

Přes mohutný nástup počítačových aplikací a vývoj moderních simulačních systémů, je však počítačová simulace tuzemskou praxí stále ještě nedoceněna. Jejím většímu rozšíření brání nejen poměrně vysoká cena software, ale hlavně „nízká“ úroveň znalostí, které jsou vyžadovány pro její „správné“ zavádění.

Počítačová simulace se totiž nesmí omezovat pouze na „vlastní programování počítačového modelu“ a „hraní si s ním“, k čemuž svádí „komfort“ při práci s počítačovými prostředky. Efektivní využití „drahých“ moderních simulačních systémů a zvláště tvůrčího potenciálu pracovníků není možné bez zodpovědného přístupu k celému simulačnímu projektu, tj. důsledného provádění všech kroků, které s ním souvisí.

Vzhledem k naznačeným skutečnostem se práce zaměřila na ucelené, aktuální a názorné zpracování problematiky počítačové simulace výrobních systémů. Autor se přitom snaží jak o rozebrání a vysvětlení důvodů pro zavádění počítačové simulace, tak i o metodické rozpracování jednotlivých fází simulačního projektu, které by přihlíželo k dnešním specifikám řízení moderního podniku. Nedílnou součástí práce je i prezentace postupu řešení konkrétních simulačních projektů.

Předkládaná publikace má přispět jednak k prolomení bariéry, která v současné době brání většímu rozšíření počítačové simulace diskretních událostí do tuzemské průmyslové praxe, tak i k odstranění obvyklých chyb při vykonávání simulační studie a tím i k zefektivnění provádění simulačních projektů. To by se mělo přímo odrazit v hospodárnějším využití výrobních systémů i ve zvyšování konkurenceschopnosti podniku.

Konkrétně práce:

- zdůrazňuje důležitost využívání počítačové simulace při inovaci podnikových procesů (viz kap. 1),
- uvádí základy modelování výrobních systémů a poukazuje na hlavní rozdíly mezi analytickým modelováním a počítačovou simulací diskrétních událostí (viz kap. 2),
- zodpovídá otázku „Proč využívat diskrétní počítačovou simulaci“ (viz kap. 3.1) a popisuje jednotlivé oblasti jejího využití (viz kap. 3.2),
- pojednává o přínosech i nákladech počítačové simulace (viz kap. 3.3),
- poukazuje na moderní simulační nástroje a další trendy v oboru počítačové simulace (viz kap. 3.4),
- rozpracovává jednotlivé fáze simulační studie a zdůrazňuje přitom kroky nezbytné pro efektivní a „správné“ využití moderních simulačních systémů (viz kap. 4),
- na vybraných praktických příkladech z oblasti projektování výroby, analýz a zlepšování výrobních systémů, řízení výroby a školení pracovníků prezentuje rozsáhlé aplikační možnosti moderních simulačních systémů (kap. 5).

Závěrem krátké shrnutí nejdůležitějších poznatků a zkušeností s prováděním simulačních studií:

Zvolit vhodnou metodu a postup řešení.

Simulaci je třeba nasadit „včas“.

Simulace nenahrazuje plánování.

Důsledně dodržovat zásady projektového řízení.

Úspěch je zaručen pouze náležitou týmovou prací.

Již v úvodní etapě se rozhoduje o úspěchu či neúspěchu celého projektu.

Simulační model tak přesný, jak je nutné a tak abstraktní, jak je možné.

Den práce na papíře šetří týdny na počítači.

Výsledky simulace jsou jenom tak dobré, jak kvalitní jsou vstupní data.

Neoddělitelnou součástí tvorby modelu je jeho verifikace a validace.

Experimentování není zkoušení.

Simulace není videohra.

Při nedostatečné kvalifikaci možnost chybné interpretace výsledků.

Nezapomenout na dokumentaci celého projektu.

Seznam literatury

- [ABE-90] Abeln, O.:
Die CA...- Techniken in der industriellen Praxis.
Handbuch der computergestützten Ingenieur-Methoden.
Carl Hanser Verlag, München - Wien, 1990
- [ALP-97] AlphaCAM Fertigungssoftware GmbH:
„Lean;“ ... okay! - Aber wo bleiben die Innovationen?
Der Favorit alphaCAM. Magazin für die fertigungstechnische
Informationsverarbeitung 1997, Ausgabe 2.
Schorndorf, 1997
- [BAR-93] Barfels, L. u. a.:
Kopplung der Simulation mit Interpretations- und Optimierungsverfahren.
In: [KUH-93], S. 369 .. 398
- [BEZ-97]* Bezdíček, P.:
Využití analytického modelování a simulace v projektování výrobních systémů.
[Diplomová práce], Liberec 1997, TU v Liberci - KVS
- [BOB-98] Bobovský, V. - Jerz, V.:
Aktuálny stav a perspektívy simulácie v podmienkach strojárskych podnikov.
Web Electronic Journal - Počítačom podporované systémy v strojárstve.
Žilina 1998, <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/31/31.htm>
- [CGT-97] CGTech GmbH:
Verbessern Sie die Produktivität in ihrer Fertigung.
Köln, 1997
- [ČÁP-97] Čáp, D. - Matuský, J.:
Studium teplotního pole obrobku při rovinném broušení.
In: XI. Mezinárodní vědecké symposium TU Liberec - TU Dresden.
Liberec, 1997
- [DAN-97] Daněk, J.:
Witness - simulace systémů diskretních událostí.
Automatizace 1997, č. 5, s. 256..260
- [DEB-98] Debnár, R. - Košturiak, J. - Kuric, I.:
Simulácia jako nástroj pre zvyšovanie produktivity a zisku v podniku.
Web Electronic Journal - Počítačom podporované systémy v strojárstve.
Žilina 1998, <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/024/024.htm>
- [DOM-98] Domschke, W. - Drexl, A.:
Einführung in Operations Research. Vierte, verbesserte Auflage.
Springer Verlag, Berlin u. a. 1998
- [DÖP-97] Döpfer, W. a kol.:
Komprimierte Prozeßketten - Voraussetzungen und Potentiale.
Recenze Sova, F.
In: Strojírenská výrobní technika a technologie pro 21. století.
Aachenskés Werkzeugmaschinen Kolloqium 1996 našima očima.
Sborník recenzi - I. díl, Praha, SpOS/FS ČVUT, 1997
- [GRE-92] Gregor, M. a kol.:
Simulácia systémov. (Skriptum)
VŠDS v Žiline, Fakulta strojncka a elektrotechnická, 1992

* Autor habilitační práce byl vedoucím uvedené diplomové práce

- [GRE-95] Gregor, M. - Košturiak, J. - Kruse, CH.:
Analýza činnosti pružného výrobného systému.
Strojírenská výroba 43 (1995), č. 1-2, s. 31..37
- [HAN-82] Hanuš, F. a kol.:
Operační a systémová analýza. (Skriptum)
ČVUT Praha, 1982
- [HRD-98] Hrdliczka, V. - Jakobi, H. A. - Schumacher, R. - Wenzel, S.:
Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik.
ASIM - Mitteilungen aus den Fachgruppen.
Fachgruppe 4.5.6 Simulation in Produktion und Logistik. 1998
www.asim-pl.uni-kassel.de/SchwarzesBrett/Publikationen/Leitfaden/Leithaupt.html
- [HRO-99] Hromada, J. - Gregor, M. - Krajčovič, M.:
Ako vybrať najvhodnejší simulačný softvér.
Web Electronic Journal - Počítačom podporované systémy v strojárstve.
Žilina 1999, <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/50/50.htm>
- [HUM-97] Humusoft s.r.o.:
WITNESS 307 v. 7. Úvod do použitia.
Praha, 1997
- [HUM-98] Humusoft s.r.o.:
Witness - vizuální a interaktivní simulace procesů.
Praha, 1998
- [JAR-97] Jarošová, E.:
Navrhování experimentů - základ inovací a neustálého zlepšování.
Česká společnost pro jakost, Praha 1997
- [KEL-96a]* Keller, P.:
Využití počítačů v projektování výrobních systémů.
[Diplomová práce], Liberec 1996, TU v Liberci - KVS
- [KEL-96b] Keller, P. - Manlig, F. - Šikola, M.:
Počítačom podporované projektování výrobních systémů.
In: Výrobní stroje, automatizace a robotizace ve strojírenství.
Kongres MATAR Praha '96, Praha 25.-27.06.1996,
Sborník přednášek - Společná problematika všech sekcí, s. 56..62
- [KEL-96c] Keller, P. - Manlig, F. - Šikola, M.:
Analytické modelování a simulace v projektování výrobních systémů.
Strojírenská technologie, 1 (1996), č. 1, s. 12..15
- [KIN-96] Kindler, E. - Tanguy, A.:
Nové přístupy v simulaci výrobních systémů.
Automatizace 39 (1996), č. 7, s. 296..299
- [KIS-96] Kiss, C.:
Einsatz prozeßorientierter, grafischer, diskreter Simulatoren für
Verkehrssimulation: Anwendung und Leistungsbewertung anhand des Wr.
Neustädter Verkehrsnetzes.
[Diplomarbeit], Wien 1996, TU Wien
<http://ws3.atv.tuwien.ac.at/~jeanluc/diplom/diplom.html>

* Autor habilitační práce byl vedoucím uvedeně diplomové práce

- [KLI-98] Klingel, H. a kol.:
Inovace v oblasti obráběcích strojů. Recenze Houša, J.
In: Perspektivní inovace obráběcích strojů. Fertigungstechnisches Kolloquium
Stuttgart 1997 našima očima. Sborník recenzí, Praha, SpOS/FS ČVUT, 1998
- [KOL-87] Kol.:
Kurz - Simulácia systémov.
Bratislava, Dům techniky ČSVTS, 1987
- [KOŠ-89] Košturiak, J.:
Diskrétna simulácia s využitím princípov riadenia.
[Dizertační práce] VŠDS v Žiline, Fakulta strojnícká a elektrotechnická,
Žilina 1989
- [KOŠ-92] Košturiak, J.:
Analýza výrobných systémov ako súčasť systémov CIM.
[Habilitační práce] VŠDS v Žiline, Fakulta strojnícká a elektrotechnická,
Žilina 1992
- [KOŠ-93] Košturiak, J. - Gregor, M.:
Podnik v roce 2001 - revoluce v podnikové kultuře.
GRADA, Praha 1993.
- [KOŠ-94a] Košturiak, J. - Gregor, M.:
Nové trendy v projektování výrobných systémov.
Strojírenská výroba 42 (1994), č. 7-8, s. 15..22
- [KOŠ-94b] Košturiak, J. - Gregor, M.:
Medzníky na ceste k prosperite.
Megabyte 1994, č. 3-4, s. 35..40
- [KOŠ-94c] Košturiak, J. - Gregor, M.:
Čo pride po CIM?
Strojírenská výroba 42 (1994), č. 11-12, s. 16..23
- [KOŠ-95] Košturiak, J. - Gregor, M.:
Simulation von Produktionssystemen.
Springer Verlag, Wien, New York 1995
- [KOŠ-98] Košturiak, J. - Debnár, R. - Kuric, I.:
SIMPLE++ - simulační systém budúceho tisícročia.
Web Electronic Journal - Počítačom podporované systémy v strojárstve.
Žilina 1998, <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/025/025.htm>
- [KRI-93] Krieg, M.:
Nutzung von Simulationstechniken bei der Projektierung von
Fertigungssystemen.
In: IX. Mezinárodní vědecké symposium VŠST Liberec - TU Dresden.
Sborník přednášek, Liberec, 1993
- [KRI-97] Krieg, M.:
Gestaltung eines modularen Steuerungskonzeptes für die Materialflußsimulation
unter Verwendung der Fertigungstechnik.
[Dissertation], Dresden 1997, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen
- [KRU-96] Krug, W. (Bd.-Hrsg.):
Simulationstechnik. 10. Symposium in Dresden, September 1996.
Reihe Fortschritte in der Simulationstechnik, G. Kampe, D. Möller (Hrsg.).
Braunschweig - Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH 1996

- [KŘÍ-94] Křížová, E. - Gregor, M. - Rakyta, M.:
Podniková logistika. (Skriptum)
VŠDS v Žilině, Strojnická fakulta 1994
- [KUH-93] Kuhn, A. - Reinhardt, A. - Wiendahl, H.-P. (Bd.-Hrsg.):
Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik.
Reihe Fortschritte in der Simulationstechnik, W. Ameling (Hrsg.), Band 7.
Braunschweig - Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH 1993
- [KUH-97] Kuhn, A. - Wenzel, S. (Bd.-Hrsg.):
Simulationstechnik. 11. Symposium in Dortmund, November 1997.
Reihe Fortschritte in der Simulationstechnik, G. Kampe, D. Möller (Hrsg.).
Braunschweig - Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH 1997
- [KUH-98] Kuhn, A. - Rabe, M. (Hrsg.):
Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung
Springer Verlag, Berlin u. a. 1998
- [KUN-98] Kunerth, W. a kol.:
Přizpůsobivá výroba. Recenze Bach, P.
In: Perspektivní inovace obráběcích strojů. Fertigungstechnisches Kolloquium
Stuttgart 1997 našima očima. Sborník recenzí, Praha, SpOS/FS ČVUT, 1998
- [KUR-97] Kuric, I. a kol.:
Integrácia počítačových systémov v podniku?
Strojírenská výroba 45 (1997), č. 7-8, s. 4..12
- [KUR-98] Kuric, I. - Debnár, R.:
Počítačom podporované systémy - CA systémy.
Web Electronic Journal - Počítačom podporované systémy v strojárstve.
Žilina 1998, <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/001/001.htm>
- [LAN-97] Lanner Group Ltd.:
WITNESS Optimizer.
Redditch, 1997
- [LÍB-83] Líbal, V. a kol.:
Organizace a řízení výroby.
SNTL/ALFA, Praha 1983
- [LUB-98] Lubina, J.:
Řízení výrobních procesů s modifikovanými a variantními výstupy finálních
výrobků ve stojirenství.
[Dizertační práce], Liberec 1998, TU v Liberci, Fakulta strojní
- [MAN-94] Manlig, F.:
Erfahrungsgestützte Planung, Steuerung und Sicherung von Fertigungsprozessen.
[Dissertation], Dresden 1994, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen
- [MAN-97] Manlig, F. - Pelantová, V.:
CIM - Computer Integrated Manufacturing.
In: Obráběcí stroje na 12. EMO v Hannoveru.
Sborník referátů semináře SpOS - K235 FS ČVUT v Praze dne 27.11.1997
- [MAN-98a] Manlig, F. - Pelantová, V. - Keller, P.:
CAx - technika v integraci.
Strojírenská technologie 1998, č. 1, s. 11..15
- [MAN-98b] Manlig, F. - Keller, P.:
Využití počítačové simulace v oblasti zlepšování výrobních procesů.
Přednáška na semináři „Možnosti využití počítačové simulace“, TU v Liberci,
KVS-Humusoft, Liberec 21.05.1998

- [MAN-98c] Manlíg, F.:
CIM na přelomu tisíciletí.
Přednáška na semináři „Komplexní počítačová podpora řízení výroby“,
TU v Liberci, KVS-Melzer, Liberec 04.06.1998
- [MAT-98] Matoušek, I.:
Numerical simulation of glass forming cycle.
In: Modelling of glass forming processes,
Valenciennes 1998
- [MIK-95] Mikula, J. - Exner, J. - Dvořák, J. - Weiss, K.:
Optimalizace konstrukce, technologie liti a tepelného zpracování u odlitku
motorového bloku.
Slévárnictví 1995, č. 3, s. 142
- [MOJ-88] Mojka, A. - Tomek, P. - Weinberger, J.:
Použití simulace při navrhování pružných výrobních systémů.
10. svazek ediční řady A + R. Praha, ČSVTS 1988
- [MOL-96] Molnár, Z.:
Počítačem integrovaná výroba - CIM. (Skriptum)
ČVUT Praha, 1996
- [NĚM-86] Němejc, J. - Cibulka, V.:
Projektování a výstavba strojírenských podniků. (Skriptum)
VŠSE v Plzni, 1986
- [NĚM-93] Němejc, J. - Cibulka, V. - Duchek, V.:
Kreslení dispozičních řešení výrobních systémů osobním počítačem.
Strojírenská výroba 41 (1993), č. 5-6, s. 37. 40
- [NEN-98] Nenadál, J. - Noskievičová, D. - Petříková, R. - Plura, J. - Tošenovský, J.:
Moderní systémy řízení jakosti.
Management Press, Praha 1998
- [NEU-88] Neuschl, Š.:
Modelovanie a simulácia.
SNTL/ALFA, Praha 1988
- [NOCH-93a] Noche, B. - Scholtissek, P.:
Anwendungen der Simulation in der Unternehmensplanung.
In. [KUH-93], S. 7..42
- [NOCH-93b] Noche, B. - Bernhard, W. - Krauth, J. - Meyer, R. - Wenzel, S.:
Simulationsinstrumente im Überblick.
In. [KUH-93], S. 267..308
- [ORT-91] Ortmann, L. - Pritsker, A.-B. - Schmidt-Weinmar, G.:
Management der Liegezeiten durch zeitdynamische Simulation.
CIM-Management 7 (1991) H. 6, S. 15...22
- [PEL-99] Pelantová, V.:
Problémy zákaznického řízení dílen.
In: XII. Gemeinsames Wissenschaftliches Kolloquium
TU Dresden - TU Liberec, Dresden 20.-22.09.1999, Vortragsband, s. 129..134
- [PET-86] Petr, J.:
Vybrané statě ze systémové analýzy. (Skriptum)
ČVUT Praha, 1986

- [PID-89] Pidany, J. - Badida, M.:
Operačná a systémová analýza.
Zošit 1 - úvod do operačnej a systémovej analýzy. (Skriptum)
TU v Košiciach, strojnica fakulta 1989
- [PID-90] Pidany, J.:
Systémová a operačná analýza.
Zošit 2 - modely hromadnej obsluhy. (Skriptum)
TU v Košiciach, strojnica fakulta 1990
- [POK-98] Pokorný, P.:
Moderní metody výroby modelů, jaderníků a forem s uplatněním výpočetní techniky.
Slévárnství 1998, č. 1-2, s. 4..9
- [POK-99] Pokorný, P.:
Systémy zvyšování efektivity malých podniků.
Strojnická technologie 1999, č. 1, s. 18..25
- [PRE-96] Preclik, V.:
Metody MOST pro racionalizace práce.
Technik 1996, č. 7, s. 31..32
- [REB-94] Rebeňák, J.:
Využitie modelovania a simulácie v projektovaní a prevádzke výrobných systémov.
[Dizertační práce], Žilina 1994, VŠDS v Žiline,
Fakulta strojnica a elektrotechnická
- [REI-97] Reinhart, G. - Hirschberg, A. - Decker, F.:
Mit Simulation die Komplexität beherrschen.
Newsletter iwb 1997, Nr. 2/3, S. 1..2
- [ROB-94] Robinson, S.:
Succesfull Simulation. A Practical Approach to Simulation Projects.
McGraw - Hill Book Company, London 1994
- [SCHA-91] Schaller, J. - Manlig, F. - Männel, L.:
Von der Produktionsplanung und -steuerung zur Fertigungsleittechnik.
In: CIM-Technologietransfer - eine Investition in die Zukunft.
Veröffentlichung des CIMTT-Dresden 1991. S. 3.1 - 3.12
- [SCHM-93] Schmidt, U. - Triemer, S.:
Anwendungen der Simulation in der Materialflußplanung.
In: [KUH-93], S. 75..92
- [SCHM-98] Schmid, R.:
Diskrete Simulation in der Produktion.
[Diplomarbeit], Rosenheim 1998, FH Rosenheim
<http://www.fh-rosenheim.de/intern/fachbereich/produktion/labor/maier/dipl/>
- [SCHU-94] Schulte, Ch.:
Logistika.
Victoria publishing, Praha 1994
- [SCHU-97] Schulz, M. - Fichtner, D.:
Simulation und heuristische Suche für Fertigungssteuerung.
In: XI. Mezinárodní vědecké symposium TU Liberec - TU Dresden.
Liberec, 1997

- [SIM-94] Simeonov, S.:
Logistika a simulace.
Technika a trh 1994, č. 5, s. 42..47
- [SIM-95] Simeonov, S. - Simeonovová, J.:
Simulační technologie.
Technika a trh 1995, č. 5, s. 34..37
- [SIM-96] Simeonov, S. - Simeonovová, J.:
SIMPLAN - SIMulační PLÁNovací systém.
In: Výrobní stroje, automatizace a robotizace ve strojírenství.
Kongres MATAR Praha '96, Praha 25.-27.06.1996,
Sborník přednášek - Společná problematika všech sekcí, s. 63..69
- [SIX-86] Sixta, J. - Žuková, H.:
Systémové inženýrství a operační analýza, (Sbírka příkladů 1). (Skriptum)
VŠST v Liberci, 1986
- [SKA-98] Skalla, J. - Balcar, P. - Církľ, D.:
Dynamické chyby tvaru vznikající při činnosti polohových servopohonů na NC
obráběcích strojích.
In: Elektrické pohony a výkonová elektronika.
Celostátní konference EPVE '98, VUT Brno 1998
- [SLA-92] Slamková, E.:
Optimalizační metody v technickej príprave výroby.
In: Automatizácia TPV. IPV ZVL/Sapecon Žilina 1992 s. 57..78
- [ŠIK-90] Šikola, M.:
Simulační model pružné výrobní buňky.
[Diplomová práce] Liberec 1991, VŠST v Liberci - KVS
- [ŠPE-98] Šperlink, K. - Švejška, P.:
Inovuj nebo nepřezijíš.
Inovační podnikání & transfer technologií VI (1998), č. 1, s. 2
- [ŠPL-85] Šplíchal, J. - Mojka, A. - Weinberger, J.:
Simulační experimenty a jejich vyhodnocování.
Sešity INORGA 1985, č. 113
- [ŠRA-98a]* Šrajfer, F.:
Optimalizace barevných bloků.
[Diplomová práce] Liberec 1998, TU v Liberci - KVS
- [ŠRA-98b] Šrajfer, F.:
Prezentace případové studie v systému Witness.
Přednáška na semináři „Možnosti využití počítačové simulace“ na TU v Liberci,
KVS-Humusoft, Liberec 21.05.1998
- [ŠRA-98c] Šrajfer, F. - Manlig, F. - Keller, P.:
Zefektivňovanie provozu výrobných systémů pomocí počítačové simulace.
In: TRANSFER '98, celostátní konference technických univerzit a průmyslu.
ČVUT, Praha 08.-10.června1998, Sborník příspěvků, 2.část, s. 275..276
- [ŠTE-90] Štefánik, J. - Košturiak, J.:
Projektovanie výrobných systémov s počítačovou podporou.
VŠDS Žilina, 1990

* Autor habilitační práce byl vedoucím uvedené diplomové práce

- [ŠTE-91] Štefánek, J. - Rebeťák, J.:
CAN-Q, nástroj pre modelovanie výrobných systémov.
Strojirenská výroba 39, (1991), č. 6-7, s. 67..74
- [ŠTE-92] Štefan, J. (editor):
Vybrané problémy simulačních modelů.
XIV. podzimní moravskoslezské kolokvium Ostrava 14.-16.9.1992,
Sborník přednášek,
Katedra informatiky FEI VŠB Ostrava - Spolek pro simulaci systémů MARQ
- [TEM-92] Tempelmaier, H. - Kuhn, H.: Flexible Fertigungssysteme.
Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb.
Springer Verlag, Berlin u. a. 1992
- [TIK-97] Tikart, J. a kol.:
Total Quality Management - durch Kooperation fit für die Zukunft?
Recenze Zelenka, A.
In: Strojirenská výrobní technika a technologie pro 21. století.
Aachenská Werkzeugmaschinen Kolloquium 1996 našima očima.
Sborník recenzí - I. díl, Praha, SpOS/FS ČVUT, 1997
- [THO-95] Thomson, W. B.:
Introduction to Witness and linking to process mapping tools.
In: Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference.
(ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, D. Goldsman)
New York, Association for Computing Machinery 1995
- [TOH-98] Toh, K.:
An Information Systems Architecture for Small Metal-working Companies.
In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,
Journal of Engineering Manufacture, 1998 Vol. 212, No. 132
- [TRÓ-99]* Tröschel, D.:
Využití simulačního systému ARENA při simulaci výrobních systémů
[Diplomová práce] Liberec 1999, TU v Liberci - KVS
- [TŮM-96] Tůma, L.:
Počítačová simulace.
Přednáška v předmětu „Projektování výrobních systémů“ na TU v Liberci, 1996
- [VAL-98] Valenta, F.:
Vývoj inovací pro příští století.
Inovační podnikání & transfer technologií VI (1998), č. 1, s. 4..5
- [VDI-91] VDI-Gemeinschaftsausschuß CIM (Hrsg.):
Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion.
Produktionslogistik. Band 5.
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1991
- [VDI-93] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik (Hrsg.):
Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen.
Grundlagen.
VDI-Richtlinien 3633, Blatt 1.
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993

* Autor habilitační práce byl vedoucím uvedené diplomové práce

- [VDI-97] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik (Hrsg.):
Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen.
Experimentplanung und -auswertung.
VDI-Richtlinien 3633, Blatt 3.
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1997
- [VĚCH-82] Věchet, V.:
Technologické projekty. (Skriptum)
VŠST v Liberci, 1982
- [VOD-97] Vodáček, L. - Rosický, A.:
Informační management. Pojetí, posláni a aplikace.
Management Press, Praha 1997
- [VOŘ-97] Voříšek, J.:
Strategické řízení informačního systému a systémová integrace.
Management Press, Praha 1997
- [WAR-91] Warnecke, H.-J.: Innovative Produktionsstruktur.
In: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart FTK 1991.
Springer Verlag, Berlin u. a. 1991, S. 13..19
- [WAR-93] Warnecke, H.-J.:
Revolution der Unternehmenskultur. Das fraktale Unternehmen.
Springer Verlag, Berlin u. a. 1993
- [WEN-93] Wenzel, S. - Ahrens, V. - Schürholz, A. - Witte, H.-H.:
Einleitung.
In. [KUH-93], S. 1..6
- [WES-92] Westkämper, E.:
CIM und Lean Produktion.
VDI-Z 1992 H. 10, S. 14..21
- [WIE-97] Wiendahl, H.-P. a kol.:
Uskutečňovat úspěšně změny v podniku - klíčový proces při zajišťování
budoucnosti. Recenze Bach, P.
In: Strojírenská výrobní technika a technologie pro 21. století.
Aachenské Werkzeugmaschinen Kolloquium 1996 našima očima.
Sborník recenzí - I. díl, Praha, SpOS/FS ČVUT, 1997
- [ZEL-93a] Zelenka, A. - Saak, V. - Leeder, E. - Basl, J.:
Počítačově integrovaná výroba jako přirozená etapa integrace strojírenských
výrobních procesů.
Strojírenská výroba 41 (1993), č. 3-4, s. 14..18.
- [ZEL-93b] Zelenka, A. - Preclík, V. - Haninger, M.:
Projektování výrobních systémů. Návod na cvičení. (Skriptum)
ČVUT Praha, 1993
- [ZEL-95] Zelenka, A. - Král, M.:
Projektování výrobních systémů.
Praha, ČVUT, 1995
- [ZEL-96] Zelenka, A.:
Vliv strategie „Štíhlé výroby“ na rozvoj výroby.
Technik 1996, č. 7, s. 17..18
- [ZÍT-96] Zítek, P. - Petrová, R.:
Matematické a simulační modely. (Skriptum)
ČVUT Praha, 1996

Seznam příloh

Tabule 1

PŘÍLOHY

Seznam příloh

Příloha A1: Nejznámější simulační systémy

Příloha A1. Nejznámější simulační systémy

Simulační systém	Výrobce	Oblast použití
Arena™	Systems Modelling Corporation, USA http://www.sm.com/	Výrobní systémy
AutoMod	AutoSimulations Inc., USA http://www.autosim.com/	Výrobní systémy
AweSim!	Pritsker Corporation, USA http://www.pritsker.com/	Obecné použití
Extend	Imagine That Inc. http://www.imagethatinc.com/	Výrobní systémy
GRASP/DE3	BYG Systems Ltd., US http://www.bygsys.co.uk/	Výrobní systémy
Micro Saint	Rapid Data Ltd. http://www.radata.demon.co.uk	Obecné použití
Modsim	CACI Products http://www.caciasl.com	Obecné použití
Powersim	Powersim Corporation, Norway http://www.powersim.no/	Obchodní procesy
ProModel®	PROMODEL Corporation, USA http://www.promodel.com/	Výrobní systémy
QUEST®	Deneb Robotics Inc., USA http://www.deneb.com/	Výrobní systémy
SIMPLE++™	Tecnomatix Technologies Ltd., Israel/ AESOP GbH, BRD http://www.aesop.de/	Obecné použití
SIMPLEX II	Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie der Universität Passau, BRD http://www.or.uni-passau.de/3/simplex.php3	Obecné použití
SIMPRO	SDZ GmbH, BRD http://www.sdz.de/	Obecné použití
Simul8	Visual Thinking International Inc http://www.visualt.com/	Výrobní systémy
Taylor	F&H Simulations, Inc. http://www.taylorii.com/	Výrobní systémy
Witness™	Lanner Group Ltd., UK http://www.lanner.com/	Výrobní systémy