



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

OPTIMALIZACE MATERIÁLOVÉHO TOKU V
HROMADNÉ VÝROBĚ SIMULAČNÍMI METODAMI
OPTIMIZATION OF MATERIAL FLOW IN MASS PRODUCTION BY MEANS OF SIMULATION
METHODS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. JIŘÍ HLOSKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MIROSLAV ŠKOPÁN, CSC.

BRNO 2015

Abstrakt

Předkládaná dizertační práce má za cíl navrhnout metodiku pro generování materiálového toku pomocí simulačního metamodelu velkosériového výrobního procesu, která bude principiálně založená na vzájemném vztahu vybraných charakteristik materiálového toku. Simulace výrobních a logistických procesů jsou stále častěji využívány ve fázích plánování, zprovoznění i následného operativního řízení a optimalizace příslušných technologických provozů, zejména velkosériového charakteru. První část práce shrnuje aktuální poznatky z oblasti problematiky diskrétních simulací materiálového toku, souvisejících statisticko-matematických disciplín, ale také informačních technologií umožňujících efektivní realizaci simulačních studií. Pozornost je věnována rovněž významným tuzemským i zahraničním konferencím, sympoziím, resp. zájmovým sdružením souvisejícím se simulacemi výrobních procesů.

Dále je v práci navržena metodika rekonstrukce a generování materiálového toku pomocí k tomuto účelu vytvořených simulačních metamodelů. Principy algoritmů, které tyto metamodely využívají, a možnost jejich využití je demonstrována provedenými simulačními experimenty, které jsou v práci popsány a jejich výsledky okomentovány. Zvláštní pozornost je přitom věnována výběru signifikantních charakteristik materiálového toku a jejich vzájemnému vztahu. Za účelem jeho posouzení byly realizovány série experimentů provedených s modelem simulujícím uzavřený systém hromadné obsluhy různých parametrů.

Nalezené závislosti mezi vybranými charakteristikami materiálového toku jsou experimentálně ověřeny pomocí detailního simulačního modelu zvoleného velkosériového výrobního systému. Závěr práce potom shrnuje poznatky, které v oblasti simulací materiálového toku práce přináší, a s ohledem na navrženou metodiku rekonstrukce a generování materiálového toku nastiňuje další postup možný v oblasti výzkumu i jejich praktického využití.

Klíčová slova

diskrétní simulace, materiálový tok, simulační metamodel

Abstract

The aim of the PhD thesis is to design a methodology for generating a material flow using a simulation meta-model of a mass production process. This methodology is in principle based on the relationship between selected material flow characteristics. Simulation of production and logistics processes has been increasingly used in planning, commissioning and subsequent operational management and optimization of the respective technological operations, in particular in mass production. The first part of the PhD thesis summarizes up-to-date findings in the field of discrete event simulation of material flow, related statistical and mathematical disciplines, but also information technology which enables effective realization of simulation studies. Attention is also paid to significant domestic and international conferences, symposia and interest associations related to simulation of manufacturing processes.

The next part of the PhD thesis presents the methodology of reconstruction and generation of material flow using simulation meta-models developed for this purpose. Principles of algorithms used by these meta-models and their possible range of use are demonstrated by simulation experiments carried out. Their description and results are also commented. Special focus is put on the selection of significant material flow characteristics and their mutual relationship. For its evaluation a series of simulation experiments was conducted using a simulation model of a closed queuing system with variable parameters.

Revealed interdependence between the selected material flow characteristics is experimentally verified using a detailed simulation model of particular selected mass production system. The conclusion of the PhD thesis summarizes provided findings and, with regard to the designed methodology of reconstruction and generating of material flow, it outlines possible further steps both in research and their practical application.

Key words

discrete event simulation, material flow, simulation meta-model

Bibliografická citace

HLOSKA, J. *Optimalizace materiálového toku v hromadné výrobě simulačními metodami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 144 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc..

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Škopánovi, CSc. za cenné rady, připomínky a doporučení při práci, ale také za významnou podporu a pomoc během celého studia. Chtěl bych dále poděkovat všem kolegům a pracovníkům Odboru transportních a stavebních strojů Ústavu automobilního a dopravního inženýrství VUT v Brně za přínosnou spolupráci v přátelském prostředí. Rovněž děkuji kolegům z oddělení Simulace v plánování výroby společnosti Škoda Auto, a.s. za jejich odbornou pomoc a konzultace při práci, stejně jako za vytvoření motivujícího a přátelského prostředí pro spolupráci. Zvláštní poděkování samozřejmě patří mé rodině a zejména mým rodičům, kteří mne po celou dobu studia trpělivě podporovali. Jejich pochopení a pomoc pro mne vždy byla nejen během studia velkou oporou. Za podporu rovněž děkuji své partnerce Jitce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracoval samostatně na základě doposud získaných znalostí, odborných konzultací a s využitím dostupné odborné literatury a dalších podkladů uvedených v této práci.

V Brně dne.....

Ing. Jiří Hloska

Obsah

1	ÚVOD	8
2	CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	11
3	STRUKTURA A ČLENĚNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE	13
3.1	Terminologie	13
4	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY	16
4.1	Materiálový tok, logistika, výrobní systémy a jejich simulace	16
4.1.1	<i>Základní charakteristiky materiálového toku</i>	<i>19</i>
4.1.2	<i>Materiálový tok v systému hromadné obsluhy</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Způsoby zjišťování hodnot signifikantních charakteristik materiálového toku</i>	<i>29</i>
4.1.4	<i>Simulace materiálového toku, výrobních a logistických systémů</i>	<i>31</i>
4.2	Aktuální poznatky v oblasti diskrétní simulace	33
4.3	Metody efektivního využívání simulačních modelů	34
4.4	Simulační metamodely	37
4.4.1	<i>Regresní simulační metamodely prvního řádu.....</i>	<i>39</i>
4.4.2	<i>Regresní simulační metamodely vyšších řádů</i>	<i>40</i>
4.4.3	<i>Využití regresních simulačních metamodelů.....</i>	<i>41</i>
4.5	Validace modelů a metamodelů, vyhodnocení simulačních experimentů	41
4.5.1	<i>Statistické techniky validace simulačních modelů a metamodelů.....</i>	<i>41</i>
4.5.2	<i>Provedení simulačních experimentů</i>	<i>45</i>
4.5.3	<i>Statistické techniky zpracování výstupů simulačních modelů.....</i>	<i>47</i>
4.6	Metodiky tvorby diskrétních simulačních modelů používané v praxi	49
5	NAVRHOVANÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ	51
5.1	Simulační metamodel jako generátor materiálového toku.....	55
5.1.1	<i>Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů.....</i>	<i>56</i>
5.1.2	<i>Generátor průchodů evidenčními body.....</i>	<i>65</i>
5.2	Další možný vývoj	89
6	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ.....	91
6.1	Vyhodnocení simulačních experimentů.....	101
7	OVĚŘENÍ NAVRHOVANÉHO PŘÍSTUPU ŘEŠENÍ V PRAXI.....	102
7.1	Systémová analýza zvoleného výrobního úseku.....	102
7.2	Simulační model zvoleného výrobního úseku	107
7.3	Simulační experimenty s modelem zvoleného výrobního úseku.....	116
7.4	Porovnání teoretických poznatků s výsledky experimentů.....	117
8	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU PRO TEORII A PRAXI.....	121
8.1	Přínosy pro teorii.....	121
8.2	Přínosy pro praxi	122
9	ZÁVĚR.....	123

10 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA SE VZTAHEM K PROBLEMATICE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	125
12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	126
13 SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	131
14 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	136
15 SEZNAM PŘÍLOH	138

1 ÚVOD

Celosvětový hospodářský vývoj v posledních dekáдах v rámci sektoru výrobního průmyslu lze charakterizovat stále rostoucím vlivem konkurence často probíhající v globálním měřítku na straně jedné a stupňujícími se požadavky zákazníků na straně druhé. Oba vlivy nutí podniky reagovat zkrácením životního cyklu svých výrobků a zvýšením flexibility a produktivity, stejně jako dalšími opatřeními, která zdaleka překračují oblast samotného výrobního procesu. Cíle těchto opatření, jež se dotýkají mimo jiné personální politiky podniku, marketingové strategie, aplikací informačních a databázových systémů a mnoha dalších oblastí, jsou téměř vždy konfliktní. Je tak možno spatřovat cyklický proces, kdy nové vědecké poznatky a koncepty umožňují implementaci inovativních přístupů a technologií, které s sebou opět přinášejí nové výzvy pro oblast teoretického výzkumu.

Významný koncept, který je založen na integraci nástrojů na podporu vývoje produktu, plánování výroby, uvádění do provozu a řízení příslušných podnikových procesů, je koncept digitální továrny. [1] Koncept digitální továrny se zaměřuje na včasný a integrovaný vývoj produktu a plánování výroby, uspořádání a zprovoznění výrobního systému (továrny nebo její části), který je sladěn se všemi podnikovými procesy. Digitální továrna tak představuje koncepty, digitální nástroje pro plánování, modelování a simulaci. Podle přesné definice je digitální továrna „*zastřešující pojem pro komplexní síť digitálních modelů, metod a nástrojů – mj. simulace a 3D vizualizace – které jsou integrovány pro kontinuální správu dat.*“¹

Jedním z nástrojů digitální továrny je plánování, modelování a simulace výrobních procesů. Jeho možnosti použití závisí na stanoveném cíli či záměru – od fáze plánování budoucí či restrukturalizované výroby přes její následnou optimalizaci až po vizualizaci výrobních procesů např. pro účely marketingových prezentací nebo ergonomických studií.

Zcela zásadní technologií využívanou napříč nástroji konceptu digitální továrny je modelování a simulace. Je tomu tak proto, že většina podnikových procesů je natolik komplexní, že je nelze popsat pomocí klasického matematického aparátu (analytickými metodami jako je např. multikriteriální analýza, metoda SHA – *systematic handling analysis*, lineární programování, aj.). Místo analytického přístupu je využito výpočetní techniky a pomocí ní je vytvořen digitální model sledovaného reálného systému. „*Model je zjednodušené zobrazení plánovaného nebo reálně existujícího systému s jeho procesy v jiném systému.*“ [2] Digitální (počítačový) model pak může sloužit pro provádění experimentů s cílem zjištění informací o chování modelovaného systému, které lze dále využít s ohledem na zamýšlené zásahy v reálném systému. Protože samotný model napodobuje (simuluje) skutečný systém, bývá označován jako simulační model a testy, které jsou s ním prováděny, se rovněž označují jako simulační experimenty. Pokud jde o simulace, možnosti využití a nasazení jsou zde značně široké, čemuž odpovídá i obecné pojetí definice pojmu simulace: „*Simulace je zobrazování systému s jeho dynamickými procesy pomocí modelu, na kterém lze provádět experimenty za účelem získání poznatků, které je možné uplatnit ve skutečnosti.*“ [3]

¹ „*Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und 3D-Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*“ [73]

Jak bylo uvedeno, digitální model využívá možností výpočetní techniky. Pomocí počítače je model vytvářen a s jeho využitím jsou rovněž prováděny simulační experimenty s modelem. Jedním z nejdůležitějších prvků simulačních nástrojů je tedy software, který bývá založen na kombinaci následujících konceptů: teorie automatů, Petriho sítě, teorie hromadné obsluhy, řečový koncept, koncept stavebních prvků, databázový koncept a umělá inteligence. [4]

Na trhu existuje řada produktů (softwarů) vhodných pro simulaci logistických procesů (zejména pak materiálových toků). Za všechny jmenujme simulační nástroje Arena, FlexSim, Simul8, AutoMod, Dosimis3, MicroSaint, ProModel, Plant Simulation, Simio, SimPro či Witness.

Simulační modely však lze využít kromě provádění simulačních experimentů v rámci realizace simulačních studií i pro další účely. Příkladem může být virtuální zprovoznění výrobních linek, manipulačních zařízení, robotických pracovišť či dopravníkové techniky. [5]

Trendem posledních let je využití společné informační databáze pro veškeré nástroje digitální továrny. Cílem je propojení všech modelů statických (jako např. kusovníky, výkresová dokumentace) a dynamických (modely diskrétní simulace, kinematické a mechanické modely apod.) za účelem dosažení synergického efektu. To se samozřejmě týká také nástrojů pro simulaci výrobních procesů a materiálových toků, u kterých vzniká požadavek na zajištění komunikace s tabulkovými procesory, databázemi, datovými soubory aj. Kromě toho řada simulačních nástrojů umožňuje znázornit studovaný systém trojrozměrně (ve 3D), což lze využít například v rámci výše vzpomenutého virtuálního zprovoznění, pro prezentační účely apod.

Z výše uvedeného je tedy patrné, že dnešní nároky na simulační modely překračují základní požadavky na spolehlivost výsledků (simulačních experimentů), které jejich pomocí lze získat, a rychlost. V různých aplikačních případech vznikají požadavky na komunikaci simulačních modelů (vytvořených v software vhodném pro řešení dané úlohy) a např. PLC (programovatelných logických automatů), zpracování výsledků v požadované kvalitě a formátu (např. HTML report), atd.

S tím, jak na jedné straně takto roste rozsah funkcionality diskrétních simulačních modelů, vyskytuje se na druhé straně požadavek na vytváření jednoduchých univerzálních modelů, které umožní snadnou parametrizaci, rychlé provedení simulačních experimentů a jejich vyhodnocení na základě statistické analýzy za použití vhodného softwarového nástroje. Tímto směrem míří tvorba metamodelů, které vycházejí z původních simulačních modelů, avšak transformují jejich vstupy na výstupy s využitím různých statistických nebo heuristických přístupů.

Na simulační modely je přitom stále nutné nahlížet jako na „pouhé“ prostředky (nástroje), kterými je dosažen určitý cíl. Tím je například posouzení vlivu nastavení vybraných parametrů simulovaného systému na sledované výstupní veličiny, nalezení optimální konfigurace sledovaného systému, atp. Samotná tvorba simulačního modelu je z pohledu výsledného přínosu simulačního projektu klíčová a z hlediska potenciální opakované využitelnosti modelu užitečná (v řeči teorie mapování toku hodnot „value-added“ aktivita). Zcela obecně řečeno spočívá přínos simulací pro praxi ve zvýšení stupně poznání zkoumaného (simulovaného) výrobního (logistického) systému, včetně odhalení netriviálních souvislostí a interakcí jednotlivých objektů tohoto systému. Lepší znalosti zkoumaného systému lze pak využít při návrhu jeho úprav tak, aby bylo dosaženo hodnot sledovaných parametrů (cílových funkcí) simulovaného systému, které jsou blízké jeho plánovanému/cílovému stavu. To s sebou samozřejmě přináší ekonomické přínosy, které jsou hlavní motivací pro návrh a provádění příslušných úprav. Přesto je dnes snahou

dosáhnout toho, že tuto odbornou činnost bude možné v určitých případech standardizovat a tím také do jisté míry automatizovat a urychlit.

V současné době je hlavním limitujícím faktorem tvorby simulačních modelů logistických (či obecně podnikových) procesů časová a z toho vyplývající i finanční náročnost všech souvisejících aktivit. V praxi je nutné řešit problém rozporu mezi omezenými disponibilními časovými či personálními prostředky na straně jedné a mezi požadavkem na vytvoření validního a plně funkčního simulačního modelu včetně kompletní realizace simulační studie (včetně související dokumentace) v co nejkratší lhůtě na straně druhé. Možným řešením tohoto problému je právě přechod k tvorbě simulačních metamodelů, které mohou být vzhledem ke své omezené komplexnosti generovány také zčásti automaticky příslušnými algoritmy pouze na základě stanovených vstupních podmínek a parametrů. Pro mnohé aplikace a účely simulačních studií tak mohou být tyto metamodely zcela postačující a jejich případná omezení týkající se rozsahu použitelnosti či přesnosti získaných výsledků mohou být, zejména ve fázích koncepčního plánování podnikových procesů, přijatelná.

Existuje tedy řada metod a přístupů k problematice tvorby simulačních modelů výrobních (logistických) systémů a provádění simulačních studií obecně. Dnes je možné na simulační metody pohlížet jako na vědní obor, kterému jsou vyhrazeny specializované konference či sympózia a o kterém pojednávají vědecké práce i jiná odborná literatura.

2 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Problematika simulací výrobních (či obecněji logistických) systémů je interdisciplinární, neboť v sobě integruje přístupy technické i ekonomické. Z tohoto důvodu je vhodné rozdělit cíl dizertační práce do několika parciálních cílů, které těsněji souvisí s jednotlivými vědními disciplínami. Toto rozdělení je vhodné rovněž z důvodu dosažení hlavního cíle práce, ke kterému lze poté dospět v následujících na sebe navazujících krocích.

Cíl dizertační práce je zpracování návrhu metodiky pro generování materiálového toku v systému hromadné výroby pomocí simulačního metamodelu, který umožní simulovat materiálový tok probíhající v tomto systému s využitím znalostí o vzájemných závislostech kvantitativních a kvalitativních charakteristik tohoto materiálového toku a parametrů těchto charakteristik se zohledněním zadaných okrajových podmínek. Jak bylo uvedeno výše, je třeba tento komplexní cíl rozdělit do následujících parciálních cílů, které při jejich postupném splnění povedou k úspěšnému návrhu výše popsané metodiky včetně jejího experimentálního ověření.

Prvním dílčím cílem dizertační práce, který je výchozím pro dosažení hlavního cíle, je tedy vytvoření uceleného přehledu charakteristik materiálového toku, které popisují výrobní (logistický) systém, v němž tok materiálu probíhá.

Kromě taxativního vyjmenování různých charakteristik materiálového toku bude uvedena vhodnost jejich využití pro popis studovaného výrobního (logistického) systému dle povahy tohoto systému a budou uvedeny závěry, které lze na základě hodnot parametrů těchto charakteristik (ukazatelů) činit.

Na tento první dílčí cíl těsně navazuje dílčí cíl druhý, který spočívá v uvedení přehledu více alternativních metod, kterými lze jednotlivé charakteristiky materiálového toku určovat.

O těchto metodách bude pojednáno v souvislosti s jejich vhodností vzhledem k nutnému technickému vybavení, přesnosti a spolehlivosti takto získaných dat a zejména s ohledem na využití takto určených charakteristik materiálového toku pro účely simulačních modelů příslušného výrobního (logistického) systému.

Následujícím třetím dílčím cílem práce je výběr těch charakteristik materiálového toku, které lze považovat s ohledem na možnost zpětného určení parametrů materiálového toku (potažmo výrobního systému, ve kterém tento tok probíhá) za signifikantní.

Budou vybrány ty charakteristiky materiálového toku, ze kterých lze vyvozovat jeho parametry, jež jsou podstatné při procesu vytváření simulačního modelu zkoumaného výrobního (logistického) systému. V kontextu této dizertační práce se bude jednat o parametry materiálového toku, které budou dále použity jako parametry algoritmů realizujících generování metamodelu výrobního (logistického) systému, ve kterém zkoumaný materiálový tok probíhá.

Paralelně ke třetímu dílčímu cíli je sledován i **čtvrtý dílčí cíl práce**, kterým je vytyčení případných okrajových podmínek. Tyto okrajové podmínky je nutné určit v případě jednotlivých metod analýzy charakteristik materiálového toku a vyhodnocení jeho parametrů.

Konkrétně půjde o zjištění omezení či naopak vzájemné nahraditelnosti, kterou je nutné či vhodné uplatnit při použití vstupních parametrů generovaného metamodelu příslušného výrobního (logistického) systému.

Z těchto dílčích cílů rezultuje jako **hlavní cíl práce** návrh metody generování simulačního metamodelu splňujícího stanovené požadavky na přesnost napodobení chování zkoumaného

materiálového toku a požadavky na efektivitu práce s tímto metamodelem, zejména s ohledem na provádění simulačních experimentů.

Tento hlavní cíl bude realizován na základě vhodně zvoleného detailního simulačního modelu nebo přímo reálného výrobního (logistického) systému, který má být modelován.

Součástí hlavního cíle práce je proto provedení simulačních experimentů ověřujících shodu série charakteristik materiálového toku v reálném výrobním (logistickém) systému a charakteristik materiálového toku realizovaného v prostředí simulačního metamodelu.

Pro splnění tohoto úkolu bude zvolen vhodný reprezentativní reálný výrobní systém. V první řadě bude vytvořen jeho detailní simulační model (včetně provedení všech činností, které jsou v rámci tvorby simulačního modelu nezbytné). Tento model bude zachycovat všechny podstatné aspekty materiálového toku. Následně provedené simulační experimenty povedou k vyhodnocení charakteristik materiálového toku a jeho parametrů. Tyto údaje budou vstupními daty pro vytvořený algoritmus, pomocí kterého bude vygenerován zjednodušený metamodel zvoleného reálného výrobního systému. Konečně budou navrženy a realizovány další simulační experimenty, které umožní porovnání sérií charakteristik materiálového toku probíhajícího v reálném výrobním systému, v jeho detailním simulačním modelu a zjednodušeném metamodelu.

Navržená metodika tvorby simulačních metamodelů bude přínosná zejména pro tvůrce simulačních modelů, resp. pracovní skupiny a firmy se zaměřením na provádění simulačních studií materiálového toku či výrobních a logistických systémů. Přínos je možné spatřovat již v uceleném přehledu poznatků, které se těsně týkají problematiky tvorby simulačních modelů a vstupních parametrů materiálového toku v závislosti na očekávaném chování simulačního modelu a zejména jeho výstupů, resp. výsledků simulačních experimentů prováděných s takovým modelem. Samotná metoda tvorby simulačních metamodelů pak umožní využít přístup, kterým lze získat rychle na základě disponibilních dat o materiálovém toku jeho zjednodušený model, resp. metamodel detailního simulačního modelu příslušného výrobního (logistického) systému. Za podmínky zohlednění poznatků týkajících se právě možných omezení platnosti vztahů mezi vstupními parametry a přesností výstupů simulačních modelů tak v praxi mohou simulační studie probíhat ve zkráceném čase. Výstupy dizertační práce tak budou mít přínos jak v teoretické, tak i praktické rovině.

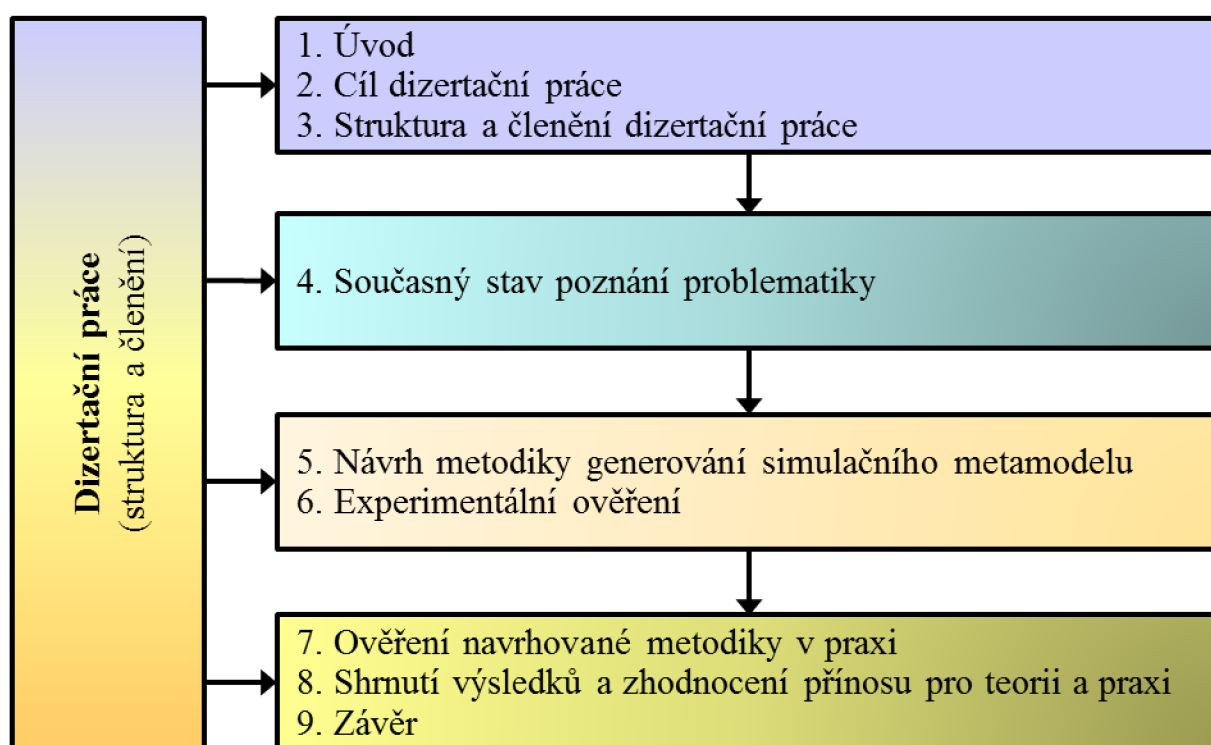
3 STRUKTURA A ČLENĚNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Předkládaná práce je rozdělena do devíti kapitol (viz Obr. 1), které je možné začlenit do čtyř tematicky sjednocených částí. První část je vyhrazena úvodu, ve kterém jsou vymezeny (dílčí) cíle dizertační práce, nastíněny postupy, kterými má být těchto cílů dosaženo a shrnuty očekávané přínosy práce. Do první části jsou zařazeny kapitoly 1, 2 a 3.

Navazující část dizertační práce, kterou tvoří samostatná kapitola 4, se zaměřuje na teoretické základy problematiky výrobních systémů, logistiky a materiálového toku. Kromě toho je v této části prostor věnován také problematice simulací výrobních a logistických systémů a simulačním technikám s důrazem na diskrétní simulace materiálového toku.

Ve třetí části práce je prezentována navržená metodika tvorby simulačních metamodelů. Tuto část tvoří kapitola 5, kde je návrh metodiky podrobně popsán, a dále kapitola 6, ve které jsou uvedeny simulační experimenty a prezentovány jejich výsledky ověřující správnost navržené metodiky s ohledem na stanovené požadavky, které má metamodel splňovat.

Předmětem čtvrté části dizertační práce je ověření možného využití navržené metodiky v praxi, tedy její aplikace s ohledem na očekávané ekonomicko-provozní přínosy. Do této části je tedy zařazena kapitola 7 a také kapitola 8, která shrnuje přínosy navržené metody v obou rovinách – teoretické i praktické.



Obr. 1 Struktura dizertační práce (zdroj: autor)

3.1 TERMINOLOGIE

V této části práce jsou shrnuty pojmy, termíny a zkratky, které jsou používány v dalším textu. U některých z těchto pojmů existuje rozdíl mezi jejich významem, pod kterým jsou obecně chápány, a významem, který je těmto pojmům přiřazován v rámci oborové terminologie jednotlivých vědních či inženýrských disciplín, jako je počítačová simulace, teorie hromadné obsluhy,

matematické modelování atd. Vynechány jsou jen ty pojmy, které jsou obecně zažitě a neexistuje u nich rozdíl mezi jejich významem v obecném a odborném kontextu, a také pojmy či zkratky, které jsou blíže vysvětleny přímo v textu práce (zejména odborné termíny, které jsou vysvětleny v rámci kapitoly 4).

- **Systém** – systém je intuitivně definován jako *množina věcí a vztahů mezi nimi*, resp. jako *množina věcí (přirozených či umělých), které jsou propojeny v komplexní celek*. Systém pak může být zapsán (popsán) několika způsoby – přirozeným jazykem, tabulkou (tabulkami), pomocí schémat či výkresů, logických schémat či matematickým zápisem. Pomocí matematického zápisu lze systém definovat jako ohodnocenou množinu prvků (a dvojic prvků z téže množiny) následovně [2]:

$$\text{Systém} = (Q/F, R/P) \quad (1)$$

kde:

Q je množina prvků systému a F je množina funkcí,

Q/F je množina funkcí jednotlivých prvků systému,

R je množina relací a P množina prvků systému,

R/P je množina relací mezi prvky systému.

Od okolí je pak systém oddělen rozhraním, přičemž lze zpravidla rozlišit jeden či několik vstupů a výstupů do a ze systému.

- **Proces** – proces je definován jako posloupnost stavů, které mohou nastat v systému při daném stavu okolí. [2] Podobně lze definovat (jistou) množinu procesů jako **chování**. Existují pak systémy s cílovým chováním (typickými zástupci jsou biologické systémy).
- **Model** – pojem model implicitně předpokládá existenci určitého reálného (fyzického) objektu – originálu. Model je pak jiný objekt, který má s originálem některé vlastnosti do té míry podobné, že na něm lze některé aspekty originálu studovat, analyzovat, případně predikovat. [2]

Pro účely modelování technologických procesů je vhodnější následující definice modelu:

*Model je zjednodušené zobrazení plánovaného nebo reálně existujícího systému s jeho procesy v jiném systému. Podle vlastností systému podstatných pro prováděnou analýzu rozlišujeme dále v závislosti na účelu této analýzy toleranci, s jakou je přípustná odchylka modelu od originálu.*² [6]

- **Rozlišovací úroveň** – vyjadřuje stupeň podrobnosti či naopak generalizace, s níž (obecnou) úlohu řešíme. [2] V případě nízké rozlišovací úrovně se pozorovaný systém jeví jako „černá skříňka“ (*black-box*), u které lze pozorovat pouze vstupy a výstupy, tedy určit chování systému. Není však možné toto chování pochopit (vysvětlit), protože procesy probíhající uvnitř systému na zvolené rozlišovací úrovni nelze postihnout. Naopak v případě příliš vysoké rozlišovací úrovně bývá obtížné postihnout pro jednotlivé detaily logiku a funkcionalitu celku.

² Ein Model ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Ziel abhängigen Toleranzrahmens vom Original. [6]

- **Metamodel** – aproximace funkce převádějící vstupy na výstupy, která je definována (určena) simulačním modelem. [7] Metamodelem je tedy funkce, často jde o polynom (určitého řádu).
- **Metoda** – metoda je algoritmizovatelná činnost, která vede k dosažení předsevzatého cíle. [8]
- **Metodika** – způsob výkladu určitého oboru či předmětu; [8] výraz metodika je v této práci použit ve významu souboru postupů, kroků a metod, pravidel, technik a nástrojů.
- **IT** – informační technologie, výpočetní technika sloužící ke sběru, zpracování, uchování a přenosu dat.
- **IS** – informační systém, který lze definovat jako soubor lidí, technických prostředků a metod, které zabezpečují sběr, zpracování, uchování a přenos dat za účelem vytvoření a prezentace informací pro potřeby uživatelů činných v systémech řízení.
- **Skid** – přepravní prostředek rámové konstrukce sloužící k manipulaci výrobku či polotovaru (v kontextu této práce půjde o karoserii osobního automobilu); tato přepravní jednotka je využívána ve výrobním systému v rámci dopravníkové techniky.
- **Materiálový tok** – pohyb materiálu ve výrobním procesu nebo v oběhu prováděný pomocí aktivních prvků (logistického řetězce – nejčastěji pomocí manipulačních, dopravních či přepravních nebo pomocných prostředků) cílevědomě tak, aby materiál byl k dispozici na daném místě a v potřebném množství, nepoškozený v požadovaném okamžiku, a to s předem určenou spolehlivostí. [9] Materiálový tok lze charakterizovat směrem, rychlostí a intenzitou. [10]
- **Takt** – doba mezi průchodem dvou po sobě následujících výrobků či polotovarů (v kontextu této práce půjde o karoserie osobního automobilu) jedním kontrolním místem (tzv. evidenčním bodem); takt určitého manipulačního či výrobního zařízení lze rovněž chápat jako čas, který uplyne do okamžiku, kdy se toto manipulační či výrobní zařízení dostane do své výchozí pozice (ve které započalo měření taktu) a je schopno opakovat pracovní cyklus.
- **Evidenční bod** – v cizí terminologii označován také jako *Collection Point*, resp. *Erfassungspunkt*; „Evidenční bod může být v užším smyslu chápán jako bod, kde jsou v daném čase načítány informace pomocí automatického či ručního zařízení (nejčastěji čtečky, skeneru, apod.). V širším slova smyslu je však možné data z evidenčních bodů nahradit jinými daty s patřičnou strukturou a pak stejně a za použití stejných nástrojů analyzovat data ze simulačního softwaru, logistická data či data o kvalitě výroby.“ [11]
- **Průchodnost** – počet záznamů na daném evidenčním bodu vztažený na jednotku času, podává tedy informaci o počtu průchodů polotovarů/výrobků (karoserií) daným evidenčním bodem za určitou dobu.
- **Prostoj** – je jev představující ukončení schopnosti (výrobního, manipulačního, ...) zařízení plnit požadovanou funkci. [10], [8]
- **Simulární čas** – vnitřní čas měřený v rámci běhu simulačního experimentu prováděného s modelem vytvořeným pomocí určitého simulačního softwaru, vnitřní čas (relevantní pro simulovaný systém) měřený tímto simulačním softwarem.

4 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY

V této části práce jsou nejprve vymezeny pojmy, které souvisí s problematikou materiálového toku, logistiky, výrobních systémů, simulace materiálového toku, příp. simulačních technik, které se simulacemi souvisí. To je náplní oddílu 4.1.

V části 4.2 je dále uveden přehled aktuálních poznatků v oblasti diskretních simulací, které jsou prezentovány na sympóziích a konferencích zaměřujících se na tuto disciplínu.

V navazující části 4.3 je pojednáno o metodách, které jsou často aplikovány s cílem zvýšení efektivity využití simulačních modelů. Jedná se zejména o možnosti zrychlení cyklu simulací, které dává informační a výpočetní technika.

S efektivitou využití simulačních modelů a provádění simulačních experimentů souvisí problematika tzv. simulačních metamodelů. Té se věnuje kapitola 4.4.

Konečně kapitola 4.5 se zaměřuje na návrh a provedení simulačních experimentů a také na statistické techniky, které jsou aplikovány v rámci vyhodnocení výsledků těchto experimentů, ale také v rámci ověření správnosti použitých simulačních modelů či metamodelů. V této kapitole jsou rovněž zmíněny ty metodiky tvorby simulačních modelů, které jsou v praxi často využívány, nebo jsou z jistého pohledu v praktické aplikaci inovativní či jedinečné.

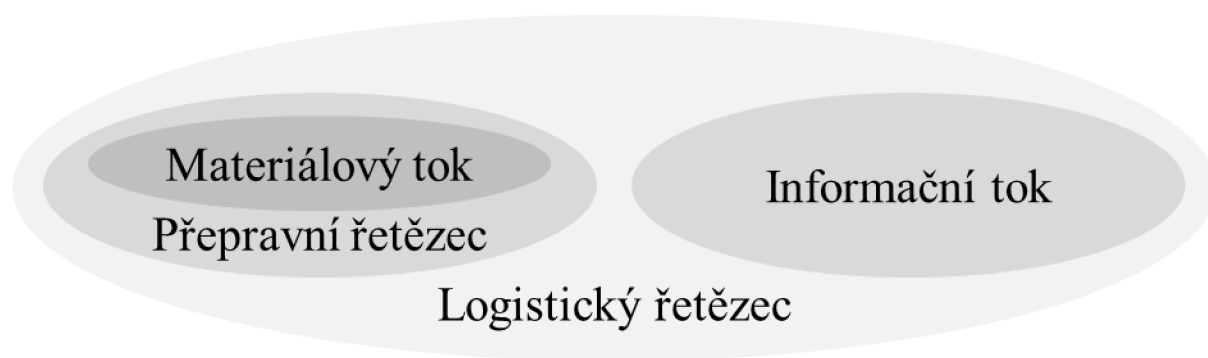
4.1 MATERIÁLOVÝ TOK, LOGISTIKA, VÝROBNÍ SYSTÉMY A JEJICH SIMULACE

Pojem materiálový tok byl již vysvětlen v konkrétním významu, ve kterém bude v této práci používán, již v části 3.1. Materiálový tok lze obecně chápat jako pohyb hmot (surovin, komponent, chemických látek). Obecně lze definovat materiálový tok jako *pohyb materiálu od těžby suroviny po dokončení finálního výrobku a směnu, přes jednotlivé fáze úpravy a opracování*. [12] Zde směnou je míněna (obchodní) výměna (transakce). Kromě samotného fyzického pohybu hmot materiálový tok zahrnuje a je doprovázen souborem dalších činností (identifikace lokalit, mezi nimiž se pohyb hmot uskutečňuje, skladování, manipulace s materiálem, balení a dále informační tok, který může materiálový tok předcházet, doprovázet, následovat, nebo může směřovat i proti toku materiálu – např. objednávka). Soubor těchto činností bývá označován jako logistický řetězec [12]:

Logistický řetězec je přepravní řetězec doplněný tokem informací, které mohou vlastní hmotný tok předcházet, mohou postupovat současně s hmotným tokem nebo jej mohou následovat, přičemž mohou postupovat ve stejném směru jako hmotný tok nebo proti směru postupu hmotného toku.

Přítom přepravní řetězec zmíněný ve výše uvedené definici je chápán jako *soubor činností nutných k pohybu materiálů a hmotných produktů od těžby surovin do realizace směny*. [12]

Uvedené definice je tedy možné shrnout následujícím schématem na Obr. 2.



Obr. 2 Materiálový a informační tok, přepravní a logistický řetězec (zdroj: autor)

Jinou definici logistického řetězce, vycházející ze systémového pojetí logistiky jako celku, uvádí [13]:

Logistický řetězec je podsystém logistického systému skládající se z řady článků, jehož struktura a chování jsou odvozeny od požadavku pružně a hospodárně uspokojit určitou potřebu finálního zákazníka.

V rámci souvisejících vědních disciplín je často samotný výrobní proces sledován separátně od všech ostatních procesů a aktivit, které s materiálovým tokem a celkově logistických řetězcem souvisejí. Z toho důvodu bývají definovány tzv. oběhové procesy, jakožto *všechny činnosti, které probíhají od těžby surovin po přechod finálních výrobků do spotřeby, mimo vlastní výrobní procesy.* [12]. V souladu s tím lze pak definovat samotný pojem logistika a dále její cíle [12]:

Logistika je souhrn činností systematicky zaměřených na získání materiálů z primárních zdrojů a všechny mezipostupy před dodáním konečnému uživateli, s výjimkou vlastních výrobních procesů. V tomto smyslu logistika zahrnuje dopravu, manipulaci, skladování a balení a všechny s tím spojené informační a řídicí procesy.

Věcným obsahem logistiky je realizace a řízení všech činností na přepravních řetězcích s cílem optimalizovat jejich sled a rozsah, aby náklady na jejich realizaci byly minimální.

Výše uvedené definice tedy vylučují výrobní systém coby předmět zájmu logistiky jakožto vědní disciplíny, potažmo sektoru hospodářství (služeb). Na druhé straně však v rámci dělení logistiky (dle oblasti zájmu) zavádí podnikovou logistiku. V tomto pojetí pak definice logistiky zahrnuje mimo jiné i výrobní činnosti [14]:

Logistika představuje organizaci, plánování, řízení a realizaci toků zboží vývojem a nákupem počínaje, výrobou a distribucí podle objednávky finálního zákazníka konče tak, aby byly splněny všechny požadavky trhu při minimálních nákladech a minimálních kapitálových výdajích.

Je tedy zřejmé, že neexistuje pouze jediná univerzálně platná definice logistiky. Často jsou uváděny jako okamžiky historicky původního využití logistiky období různých válečných tažení, kdy bylo nutné zásobovat vojska materiálem. Z pohledu managementu je možné definovat logistiku s důrazem na její obchodní využití takto [15]:

Logistika je proces strategického řízení získávání, přemístění a skladování materiálu, dílů a hotových produktů (včetně souvisejícího informačního toku) prostřednictvím organizace a jejich marketingových kanálů takovým způsobem, který maximalizuje současnou a budoucí výnosnost díky rentabilnímu plnění objednávek.³

³ Logistics is the proces of strategically managing the procurement, movement and storage of materials, parts and finished inventory (and the related inforamtion flows) through the organisation and its marketing channels in such a way that curent and future profitability are maximised through the cost-effective fullfilment of orders.

Materiálový tok tedy zahrnuje pohyb materiálu mezi všemi články logistického řetězce i v rámci těchto článků samotných. Zahrnuje tedy jak dopravu, resp. přepravu materiálu, tak i manipulaci s ním a jeho skladování. V tomto smyslu je vhodné uvést rozdíl v chápání pojmů doprava a přeprava, v jehož důsledku v kontextu této práce bude nadále využíván v souvislosti s přemísťováním (pohybem) materiálu termín přeprava. [13]:

Doprava je úmyslný pohyb (jízda, plavba, let) dopravních prostředků po dopravních cestách anebo činnost dopravních zařízení, kterými se uskutečňuje přeprava; proces charakterizovaný pohybem dopravních prostředků po dopravní cestě.

Přeprava je činnost, kterou se přímo uskutečňuje přemísťování osob a věcí (nákladu) dopravními prostředky anebo dopravními zařízeními.

Velmi komplexní a složitý je materiálový tok zejména v oblasti hromadné výroby. Důvodem je spolupůsobení různých faktorů, jako je spolehlivost použitého technologického vybavení (sahající do oblasti teorie spolehlivosti), součinnost úseků s různým stupněm automatizace a manuálních pracovišť, plánovaný výrobní program a směnový režim, způsob skladování dílů a jejich přísun k výrobním linkám (vycházející mj. z teorie front, ABC a XYZ analýzy, optimalizačních heuristik pro nalezení nejkratší cesty pro vyskladnění nebo naskladnění, apod.) a mnohé další jevy deterministické, ale z velké části také stochastické povahy.

Jedním ze základních kritérií dělení materiálového toku je časové hledisko, resp. povaha přemísťovaného materiálu. Podle tohoto hlediska rozlišujeme materiálový tok diskrétní (kdy přemísťovaným materiálem jsou početné entity – např. palety, krabice, výrobní díly apod.) a tok spojitý (tok plynného či kapalného média potrubím). Simulace logistických, resp. výrobních procesů (o které pojednává následující kapitola) se ve většině případů zabývá diskrétním materiálovým tokem. Ten je také zkoumán v rámci této dizertační práce. Zde bude materiálovým tokem rozuměn pohyb početných (kusových) objektů, které se v pravidelných či nepravidelných časových rozestupech pohybují na dopravních cestách nebo dopravníkových drahách.

Pro doplnění dodejme, že existují také nástroje (resp. rozšíření a speciální knihovny prvků pro simulační softwary), pomocí kterých je možné zachytit v simulačním modelu, jehož cílem je testování (příp. optimalizace) daného logistického systému, také kontinuální materiálový tok. Příkladem může být knihovna *Brewing Library* rozšiřující základní funkce simulačního SW Plant Simulation, díky níž je možné simulovat technologické procesy v potravinářském průmyslu. [16]

Pro realizaci materiálového toku jsou určující následující procesy či technické postupy, které jsou typické pro výrobní či distribuční proces – zpracování, manipulace, zkoušení, montáž, doprava (transport), skladování, shromažďování, dělení, třídění, balení. Tomu odpovídá i znázornění materiálového toku (např. pomocí vývojového diagramu), v rámci kterého lze rozlišit jednotlivé funkce – dopravu, větvení (dělení), sloučení (spojení), čekání, obsluha. [17]

Jednou z důležitých úloh nauky o materiálovém toku, ale také zadání při plánování a návrhu úprav výrobních a logistických systémů je zjištění **průchodnosti** (měřené v kusech materiálu prošlým určitým bodem na jeho trajektorii – dopravní dráze, obvykle tedy v jednotkách [$\text{ks} \cdot \text{hod}^{-1}$], [$\text{ks} \cdot \text{den}^{-1}$] apod.). [17]

Kromě průchodnosti existují další důležité ukazatele materiálového toku, které jsou podstatné pro návrh správné funkce a průběhu předpokládaných procesů v navrhovaných/upravovaných výrobních a logistických systémech. Těmito ukazateli je **doba mezi průchody** (tedy interval záznamu dvou po sobě následujících jednotek materiálu sledovaných na určitém bodě dopravní

dráhy), **doba průchodu** (mezi dvěma zvolenými body na trase, po které je materiál manipulován), **obsazenost** (úseku vymezeného opět dvěma body, mezi kterými materiál prochází – např. také obsazenost skladu, kde tyto body mohou být co do polohy totožné), a změna, resp. **zachování sekvence** (pořadí, v jakém jednotky materiálu vstupovaly do vymezené oblasti/úseku materiálového toku, v porovnání s pořadím jejich výstupu z vymezeného úseku). [17]

V následující podkapitole je o těchto ukazatelích materiálového toku pojednáno podrobněji, tj. včetně jejich analytického rozboru.

4.1.1 Základní charakteristiky materiálového toku

V následujících úvahách je předpokládán diskretní materiálový tok probíhající mezi dvěma body (A – zdroj materiálového toku, B – ústí materiálového toku) nacházejícími se ve vzdálenosti l . Pokud nebude uvedeno jinak, jsou jednotlivé veličiny materiálového toku uvedeny v základních jednotkách odpovídajících soustavě SI fyzikálních jednotek a v kusech („ks“) vyjadřujících počet elementů materiálového toku. Samozřejmě v praxi bývají používány také odvozené jednotky, např. $[\text{ks}\cdot\text{hod}^{-1}]$ nebo $[\text{ks}\cdot\text{den}^{-1}]$ pro stanovení (průměrné) hodinové nebo denní produkce (kupříkladu výrobní linky) apod.

Následující charakteristiky materiálového toku jsou využívány při plánování dopravních, manipulačních a logistických systémů. Přestože, jak je uvedeno v dalších kapitolách věnovaných počítačové simulaci těchto systémů, nelze vzhledem k jejich složitosti spoléhat při plánování nových či návrhu úpravy stávajících systémů pouze na analytické propočty, ve kterých nacházejí tyto charakteristiky (veličiny) uplatnění, mají dále uvedené vztahy význam také v rámci simulačních studií, zejména ve fázi ověření správnosti simulačního modelu (tzv. validaci).

Jedná se zejména o tyto charakteristiky [17]:

- **Průchodnost λ $[\text{ks}\cdot\text{s}^{-1}]$** – je determinována intenzitou vstupů jednotek materiálu (z bodu A) a rychlostí v pohybu materiálu. Ta je obvykle dána rychlostí v dopravního či manipulačního zařízení, které přemístění materiálu realizuje (dopravník, vysokozdvizný vozík apod.). Pokud budeme uvažovat dopravu materiálu na dopravníku s rozstupem s (měřeným mezi např. krajními předními body) jednotlivých elementů materiálu o délce s_0 , potom je průchodnost dána vztahem:

$$\lambda = \frac{v}{s} \quad (2)$$

Maximální průchodnost bude dosažena, pokud mezery mezi sousedními elementy materiálu jsou nulové (elementy se pohybují v těsném závěsu), tj. pokud $s = s_0$. Potom tedy

$$\lambda_{MAX} = \frac{v}{s_0} \quad (3)$$

Tyto jednoduché vztahy lze samozřejmě použít pouze za předpokladu konstantní rychlosti v pohybu elementů materiálu (příp. průměrné rychlosti pro zjištění průměrné průchodnosti – např. průměrné hodinové, denní průchodnosti), kdy nejsou uvažována přerušování pohybu materiálu (z důvodu např. poruchovosti manipulačního zařízení nebo směnových přestávek) ani možný rozptyl v rozestupu s elementů materiálu (v případě zejména autonomních manipulačních prostředků – vozíky, elektrické závěsové dopravníky s vlastním pohonem, apod.).

- **Stupeň vytížení ρ [-]** – udáván případně v procentech vyjadřuje, do jaké míry je dosažena maximální (teoretické) průchodnost. Té obvykle dosáhnout nelze, neboť v reálném systému musí z bezpečnostních důvodů existovat nenulové rozestupy mezi elementy materiálového toku, a také proto, že v uzavřených smyčkách materiálového toku (kde $A \equiv B$) při plné obsazenosti elementy materiálového toku (např. plošinami skidového dopravníku na uzavřeném dopravníkovém okruhu) dojde k zablokování materiálového toku ($v = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Pokud maximální (pouze teoreticky dosažitelnou) průchodnost označíme v souladu s předchozí rovnicí λ_{MAX} , bude stupeň vytížení dán poměrem

$$\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \leq 1 \quad (4)$$

Nerovnost doplněná na pravou stranu vztahu vyjadřuje výše okomentované technické omezení. Hodnota poměru rovná 1 („jedné“) je pouze teoretická (tj. kdy $\lambda = \lambda_{MAX}$).

- **Takt T [s]** – je měřen v ústí materiálového toku (zde bodě B). V tomto smyslu je význam taktu stejný jako veličiny „doba mezi průchody“, která bývá zjišťována v určitém bodě materiálového toku mezi ústím a zdrojem (příp. na uzavřené smyčce materiálového toku). Podstatný je však zejména rozdíl spočívající v tom, že takt lze uvažovat pouze tehdy, pokud jeho hodnoty mohou nabývat pouze vymezených (diskrétních) hodnot. Pokud tyto hodnoty vykazují určité náhodné spojitě rozdělení, je třeba hovořit o době mezi průchody. Lze odvodit, že takt je převrácenou hodnotou průchodnosti, neboli

$$T = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

- **Doba mezi průchody t [s]** – popisuje stejný jev jako takt, avšak v tomto případě neplatí podmínky nutné pro to, aby časové intervaly mezi průchody/příchody elementů materiálového toku nabývaly početných hodnot (byly diskrétní) – tedy $v = konst.$, $s = konst.$. Často nejsou jednotlivé elementy totožné, proto navíc $s_0 \neq konst.$. Doba mezi průchody t pak je třeba chápat jako náhodnou veličinu s rozdělením daným hustotou pravděpodobnosti a distribuční funkcí (vyjadřující pravděpodobnost, že doba mezi průchody nepřekročí určitou hodnotu – zde dobu t_K):

$$0 \leq f(t) \leq \infty \rightarrow F(t_K) = \int_0^{t_K} f(t) dt \quad (6)$$

Díky tomu lze pak v praxi uvažovat střední hodnotu doby mezi průchody:

$$E(t) = \int_0^{\infty} f(t) \quad (7)$$

Z důvodu omezené přesnosti měřicí techniky, pomocí které je doba mezi průchody zaznamenávána (pro jednotlivé elementy materiálového toku), však získané hodnoty budou diskrétní povahy. V praxi proto bývá uvažována jako diskrétní náhodná veličina definovaná pravděpodobnostní funkcí, pomocí které lze opět stanovit střední hodnotu doby mezi průchody:

$$P(0 \leq t \leq t_K) = \sum_{i=1}^k p_i \rightarrow E(t) = \sum_{i=1}^n t_i \cdot p_i \quad (8)$$

- **Doba průchodu τ [s]** – je doba, za kterou urazí element materiálového toku vzdálenost mezi body A a B . Pokud je vzdáleností $|AB|$ dráha l , jak bylo uvedeno v úvodu této podkapitoly, bude za předpokladu konstantní rychlosti $v = konst$ pohybu všech elementů materiálového toku (takže se jednotlivé elementy na dráze mezi body A a B neomezují/neblokují) rovna rovnici $\tau = l/v$. V reálných dopravních a manipulačních systémech však dochází k neplynulostem materiálového toku ($v \neq konst.$), k jeho (lokálnímu) zastavení vlivem provozních, technických či organizačních prostožů – např. zastavení dopravníku s dílem pro provedení montážní operace. Takový systém se již podobá modelu, který lze postihnout jako systém hromadné obsluhy (SHO), ve kterém lze pozorovat fronty požadavků (v tomto případě elementů materiálového toku zařazených před stanovištěm pracovní operace či např. výhybkou, na které se materiálový tok dělí), a obslužná místa.

Kromě výše uvedených charakteristik materiálového toku bývají v závislosti na povaze řešené úlohy důležité i další parametry. Velice často jsou zmíněné charakteristiky závislé také na povaze (typu) materiálu, jehož pohyb je sledován. Konkrétním příkladem může být různá doba trvání technologické operace na pracovišti montážní linky podle typu sestavovaného polotovaru/výrobku, nebo interval vyskladnění zboží z automatizovaného skladu pomocí manipulačního zařízení⁴ v závislosti na umístění zboží v rámci topologie skladu v souladu s ABC analýzou, resp. XYZ analýzou. S tím souvisí další parametr sledovaného výrobního (logistického) systému:

- **Výrobní mix** – označovaný také termínem „*produktový mix*“, který určuje jednotlivé typy elementů materiálového toku (např. typy motorů sestavovaných na montážní lince, různé spotřebitelské balení jednotlivých druhů potravin apod.). Výrobní mix určuje, v jakém poměru jsou (ve sledovaném časovém období) zastoupeny jednotlivé typy elementů materiálového toku. Může být zadán tabelárně s údaji o typu a procentuálním podílu jejich zastoupení, nebo např. histogramem.
- **Výrobní program** – kromě informací o vzájemném poměru výskytu jednotlivých typů elementů materiálového toku je důležité znát časovou posloupnost, ve které mají být tyto typy elementů (výrobky) zadávány do výroby, resp. expedovány dopravním systémem v rámci logistického řetězce. To může významně ovlivnit například vytížení jednotlivých manipulačních zařízení schopných obsloužit jen určité typy materiálu, nebo technologických stanovišť, kde trvání příslušné technologické operace je závislé právě na typu zpracovávaného elementu materiálového toku.

V rámci plánování výrobních/logistických systémů je pak obvykle nutné zvolit místo (bod) na trajektorii materiálového toku, ve kterém je možné výše uvedené charakteristiky sledovat. Jejich sledování může být zajištěno různými technickými prostředky. Ručně prováděným sledováním a záznamem, elektronicky pomocí čárových kódů, QR⁵ kódů aj. s možností propojení se systémem

⁴ V anglické literatuře se objevuje pojem „*Goods to man*“, v německé „*Ware zum Mann*“ označující princip vyskladnění zboží ze skladu k pevnému obslužnému místu pomocí (automatizovaného) manipulačního zařízení.

⁵ Zkratka pochází z anglického výrazu *Quick Response* (rychlá odezva).

výpočetní techniky a ukládáním dat pro možnost jejich pozdější analýzy, vyhodnocení materiálového toku s využitím záznamu z bezpečnostních kamer – viz např. projekt TiLO (*Tracing Intelligenter LogistikObjekte*) [18] a další. V této práci je toto místo obecně označováno jako „evidenční bod“ (zkráceně „EB“).

Záznamy o průchodech EB pak umožní odvodit a analyzovat další charakteristiky materiálového toku, které jsou důležité zejména v rámci plánování výrobních/logistických systémů [19]:

- **Četnost průchodů EB za sledované období [ks^{-1}]** – udává tedy průchodnost (viz výše), a vyjadřuje například v případě výrobní linky její výkonnost (počet hotových produktů vyrobených na dané lince).
- **Obsazenost objektů mezi dvěma EB [ks]** – obvykle sledovaná v průběhu vymezeného časového období, udává počet elementů materiálového toku, které se v daném období nacházely mezi dvěma evidenčními body, přičemž tyto evidenční body tak vymezují hranice sledovaného úseku materiálového toku; tento údaj je důležitý například v souvislosti s plánováním prostorových (skladových) kapacit, které musí být schopny pojmout veškerý materiál nacházející se ve vymezeném úseku (prostoru).
- **Dodržení sekvence objektů** – v souvislosti s výše zavedeným pojmem výrobního programu bývá důležité sledovat také případnou změnu pořadí, v jakém jsou řazeny elementy materiálového toku v různých úsecích trajektorie materiálového toku. K této změně sekvence (promíchání) může dojít v místech rozdělení či sloučení materiálového toku, které bývá (ale nemusí být) podmíněno právě určitou charakteristikou materiálu (typ, kvalita zpracování, kdy v případě neshodného dílu dojde k jeho vyřazení z hlavního materiálového toku, resp. v případě repasovaného dílu k jeho opětovnému zařazení do hlavního materiálového toku).

4.1.2 Materiálový tok v systému hromadné obsluhy

Výše uvedené charakteristiky materiálového toku lze definovat pro libovolný systém, ve kterém dochází k pohybu (přemístění) materiálu. Tedy obecně v libovolném logistickém řetězci. V případě, že kromě pohybu materiálu dochází také k časovým prodlevám (čekací době), lze hovořit o systémech hromadné obsluhy (dále jen SHO). Jednotlivé prodlevy, kdy se materiál nepohybuje, lze rozlišit na plánované a neplánované čekací doby, přičemž jejich důvodem mohou být následující procesy [17]:

- Vyrovnání kolísání výrobních odvolávek nebo zakázek (skladování) – plánovaná čekací doba.
- Procesem podmíněná časová spotřeba mezi jednotlivými technologickými operacemi (např. sušení, chlazení, ...) – plánovaná čekací doba.
- Změna průchodnosti zapříčiněná průběhem materiálového toku (např. zkouška kvality, repase, atd.) – plánovaná čekací doba, v případě repase neshodného dílu (náhodný výskyt) neplánovaná čekací doba.
- Technický prostoj způsobený poruchou technologického zařízení, který vede k vytvoření fronty (materiálu) – neplánovaná čekací doba.

- Změna sekvence elementů materiálového toku např. v důsledku třídění, vyskladňování, apod. – plánovaná čekací doba.

Obecně je daný SHO vymezen zdrojem požadavků, obslužnou stanicí a výstupem ze systému. SHO se zabývá disciplína označovaná jako *teorie front*⁶. Lze rozlišit otevřené a uzavřené SHO. V případě otevřených SHO je zdroj požadavků neomezený, stejně jako kapacita ústí (výstupního EB), který jednotlivé požadavky SHO opouští. V případě uzavřených SHO do systému požadavky nevstupují, ani je neopouští, nýbrž se pohybují v uzavřené smyčce (trajektorií materiálového toku je uzavřená křivka s obecně libovolným počtem rozvětvení a spojení toku). Pro SHO jsou dále definovány podobné charakteristiky materiálového toku, jaké byly vyjmenovány v kapitole 4.1.1 výše s tím, že jednotky zde uvedené jsou opět v souladu se soustavou SI a v praxi je možné se setkat s jejich odvozenými násobky [17]:

- **Intenzita vstupů θ [$\text{ks}\cdot\text{s}^{-1}$]** – je dána dobou mezi vstupy jednotlivých požadavků (element materiálového toku) t_a do SHO. Doba mezi vstupy může být náhodnou veličinou obecného rozdělení hustoty pravděpodobnosti se střední hodnotou $E(t_a)$. Potom platí:

$$\theta = \frac{1}{E(t_a)} \quad (9)$$

- **Intenzita obsluhy μ [$\text{ks}\cdot\text{s}^{-1}$]** – vyjadřuje průměrný počet jednotek materiálu zpracovaných za jednotku času na obslužné stanici. Analogicky jako v případě obecného materiálového toku za platnosti podmínek uvedených v části 4.1.1, kde je o něm pojednáno, platí, že intenzita obsluhy určuje (průměrný) takt obslužné stanice. Jestliže je doba obsluhy jednotky materiálu t_b náhodnou veličinou se střední hodnotou $E(t_b)$, platí pro intenzitu obsluhy vztah:

$$\mu = \frac{1}{E(t_b)} \quad (10)$$

- **Stupeň vytížení ρ [-]** – opět v analogii s charakteristikami materiálového toku pro stupeň vytížení obslužné stanice daného SHO platí vztah (4), tedy $\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{MAX}} \leq 1$.
přičemž nerovnost na pravé straně vyplývá z podmínky stability SHO:

$$t_b < t_a \leftrightarrow \mu > \lambda \leftrightarrow \rho < 1 \quad (11)$$

kde symbol \leftrightarrow má význam matematické ekvivalence (logická spojka „právě tehdy, když“).

V nestabilním SHO se hromadí požadavky/elementy materiálového toku před obslužnou stanicí a vytváří tak frontu, jejíž velikost v čase je dána monotónní neklesající funkcí. Fronty se budou v SHO před obslužnou stanicí obecně vytvářet tehdy, pokud alespoň jedna z veličin t_a , t_b je stochastické povahy, přičemž rozsah hodnot obou těchto veličin se překrývá, neboli pokud $\langle t_a^{min}; t_a^{max} \rangle \cap \langle t_b^{min}; t_b^{max} \rangle \neq \emptyset$. V důsledku toho je pak i délka fronty stochastickou veličinou s jistou střední hodnotou a proto se dále zavádí [17]:

- **Střední počet požadavků ve frontě N_w [-]** – střední počet elementů materiálového toku, které jsou řazeny před obslužné místo. V analogii s charakteristikami materiálového toku

⁶ queuing theory, Warteschlangentheorie

definovanými v kapitole 4.1.1 lze tuto veličinu chápat jako obsazenost objektů mezi dvěma EB (vstupní EB je totožný s místem vstupu požadavků / materiálu do SHO a výstupní EB je umístěn před sledovanou obslužnou stanicí).

- **Střední počet požadavků v SHO N_S [-]** – střední počet elementů materiálového toku, které se nacházejí v celém systému SHO, tedy ve frontě před jednotlivými obslužnými stanicemi i v samotných stanicích. V analogii s charakteristikami materiálového toku definovanými v kapitole 4.1.1 lze tuto veličinu chápat jako obsazenost objektů mezi dvěma EB (vstupní EB je totožný s místem vstupu požadavků / materiálu do SHO a výstupní EB je umístěn na výstupu SHO – tedy až za obslužnými stanicemi).
- **Střední doba čekání ve frontě t_W [s]** – střední doba, která uplyne mezi vstupem požadavku/elementu materiálu do SHO a okamžikem, kdy začne jeho zpracování na některé z obslužných stanic. V analogii s charakteristikami materiálového toku definovanými v kapitole 4.1.1 lze tuto veličinu chápat jako dobu průchodu mezi dvěma EB (vstupní EB je totožný s místem vstupu požadavků/materiálu do SHO a výstupní EB je umístěn před sledovanou obslužnou stanicí).
- **Střední doba setrvání v SHO t_S [s]** – střední doba, která uplyne mezi vstupem požadavku/elementu materiálu do SHO a okamžikem dokončení jeho obsluhy na některé ze stanic SHO. V analogii s charakteristikami materiálového toku definovanými v kapitole 4.1.1 lze tuto veličinu chápat jako dobu průchodu mezi dvěma EB (vstupní EB je totožný s místem vstupu požadavků / materiálu do SHO a výstupní EB je umístěn na výstupu SHO – tedy až za obslužnými stanicemi).

V zásadě lze rozdělit jednotlivé SHO podle počtu front, obslužných stanic, charakteristik rozdělení náhodné veličiny, které vykazují jejich parametry t_a a t_b , a podle logiky řízení materiálového toku/řazení požadavků ve frontách před jednotlivými obslužnými stanicemi. Toto rozdělení definuje Kendallova klasifikace SHO, podle které lze každý SHO charakterizovat notací obecného tvaru [17], [20]:

$$A|B|m|K|S|xxxx \quad (12)$$

kde:

- A povaha vstupů požadavků do SHO, která je dána rozdělením pravděpodobnosti doby mezi vstupy požadavků t_a
- B povaha obsluhy požadavků na stanicích SHO, která je dána rozdělením pravděpodobnosti doby obsluhy jednotky materiálu/požadavku t_b .
- m počet paralelně řazených obslužných stanic, které vykazují identické vlastnosti vzhledem k charakteristice B
- K maximální počet požadavků v systému (daný součtem počtu obslužných míst/linek a kapacity fronty před těmito místy)
- S počet zdrojů požadavků (elementů materiálového toku), není-li neomezen
- $xxxx$ strategie obsluhy požadavků, tj. přiřazení priority jednotlivým požadavkům/elementům materiálového toku, které se řadí ve frontě/frontách před obslužnou stanicí/obslužnými stanicemi (např. FIFO – First In First Out, nebo LIFO – Last In First Out)

Pro typická rozdělení pravděpodobnosti doby mezi vstupy požadavků t_a a doby jejich obsluhy t_b jsou často využívány následující označení [17]:

- M exponenciální rozdělení
- E_K Erlangovo rozdělení s parametrem k
v tomto případě definuje k počet za sebou řazených nezávislých fází procesu
- D Diracovo rozdělení, vhodné pro případy konstantních dob t_a , resp. t_b (obvykle automatizovaný proces, kde doba zpracování je dána manipulačními procesy, které vykonává robot a kde tyto procesy se neliší pro jednotlivé typy zpracovávaného materiálu, resp. vyskytuje se pouze jediný typ zpracovávaného materiálu/požadavku)
- G Obecné rozdělení, které není známé, pouze je známa střední hodnota dob t_a , resp. t_b , tj. $E(t_a)$, resp. $E(t_b)$ a rozptyl $Var(t_a)$, resp. $Var(t_b)$

Pro jednotlivé SHO lze dále odvodit vztahy mezi jeho jednotlivými parametry. V praxi je možné řešené logistické či výrobní systémy považovat za SHO takových vlastností, které dovolují odvození obecných a relativně nekomplikovaných závislostí mezi jeho jednotlivými parametry, jen za řady zjednodušujících předpokladů. Přesto bývá těchto závislostí (vztahů) využíváno zejména v případě modelování takových logistických či výrobních systémů. Toto využití přichází na řadu zejména ve fázi tzv. validace modelu (popsané blíže v následující kapitole 4.1.4), kdy je nutné ověřit shodu výstupů simulačního modelu s předpoklady, které se právě opírají o obecné vztahy plynoucí mimo jiné z teorie front. Níže jsou pro obvyklé typy SHO (modely SHO) tyto vztahy shrnuty:

- **M|M|1 model** – základní model teorie front, pro který lze střední počet požadavků (elementů materiálu) v systému určit na základě vztahu (odvození viz např. [17]):

$$N_s = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (13)$$

kde

- ρ stupeň vytížení SHO [-] (viz rovnice (4))
- λ intenzita vstupů do SHO [$\text{ks} \cdot \text{s}^{-1}$] (viz vztah (9))
- μ intenzita obsluhy stanicí SHO [$\text{ks} \cdot \text{s}^{-1}$] (viz vztah (10))

Střední počet požadavků ve frontě před obslužnou stanicí je pak dán vztahem (odvození viz např. [17]):

$$N_w = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (14)$$

Dále platí

$$\frac{N_w}{N_s} = \rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (15)$$

Pro střední dobu čekání ve frontě, resp. v systému, dále platí vztahy:

$$t_W = \frac{N_S}{\mu} = \frac{N_W}{\lambda}; t_S = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (16)$$

- **D|D|1 – model** – lze jej s výhodou využít pro analýzu a plánování automatizovaných logistických či výrobních systémů, které vykazují konstantní dobu mezi vstupy materiálu/požadavků do systému a konstantní dobu zpracování požadavků (trvání technologických/logistických operací); pro případ stabilního systému (tj. za podmínky $t_a > t_b \leftrightarrow \rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$), přičemž v tomto případě jsou t_a a t_b konstanty, platí [17]:

$$t_W = 0; t_S = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} = \frac{1}{\mu} \quad (17)$$

- **M|D|1 model** – jde o model systému, ve kterém se doba mezi vstupy požadavků t_a do systémů řídí rozdělením určité náhodné veličiny, zatímco doba zpracování požadavku t_b je konstantní. Typickým příkladem je určité významné místo na trajektorii materiálového toku (např. bod rozdělení, sloučení, či jiné manipulační operace apod.), kde příslušná manipulační operace je technicky zajištěna zařízením jako např. zvedák, příčný přesuvný dopravník, otočný či kyvný stůl, výhybka podvěsné dráhy apod. Pro charakteristiky daného systému platí [17]:

$$t_W = 0; t_S = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} = \frac{1}{\mu} \quad (18)$$

- **M|E_k|1 model** – je vhodný pro napodobení SHO, ve kterém doba obsluhy požadavku (trvání technologické operace) vykazuje Erlangovo rozdělení a zároveň je možné celý proces obsluhy (technologickou operaci) rozdělit do sekvence k navzájem nezávislých kroků, jejichž dokončení je nutnou podmínkou pro možný vstup dalšího požadavku (jednotky materiálového toku) z fronty do obslužného místa. Pro charakteristiky takového SHO platí [17]:

$$N_S = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \left(1 - \rho \cdot \frac{k - 1}{2 \cdot k}\right); N_W = \frac{\lambda^2}{k \cdot \mu^2} + \rho^2 \quad (19)$$

$$t_S = \frac{N_S}{\lambda} = t_S + \frac{1}{\mu}; t_W = \frac{k + 1}{2 \cdot k} \cdot \frac{\rho}{\mu \cdot (1 - \rho)}$$

kde

k počet navzájem nezávislých fází, do kterých je rozdělen proces obsluhy (příslušná technologická nebo manipulační operace)

Speciální případ nastává pro $k = 1$, kdy model M|E_k|1 přechází v model M|M|1, a pro $k \rightarrow \infty$, kdy model M|E_k|1 přechází v model M|D|1.

- **M|G|1 model** – jeho využití je vhodné u těch SHO, ve kterých proces obsluhy vykazuje trvání s obecným (nikoliv exponenciálním) rozdělením. Typickou aplikací je optimalizace velikosti výrobní dávky (s ohledem na lišící se charakteristiky časů zpracování t_b různých druhů elementů materiálu, příp. s uvážením seřizovacích dob při změně výrobní dávky). Také pro tento případ SHO byly odvozeny vztahy mezi jednotlivými charakteristikami SHO [17]:

$$t_W = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \bar{t}_r \quad (20)$$

kde

\bar{t}_r [s] střední doba trvání dokončení obsluhy (v případě, že se v okamžiku vstupu požadavku do fronty v obslužné stanici nachází jiná zakázka / materiál); lze odvodit [17]:

$$\bar{t}_r = \frac{E(t_b^2)}{2 \cdot E(t_b)} \quad (21)$$

Dále platí [17]:

$$t_W = \frac{\rho \cdot E(t_b)}{1 - \rho} \cdot \frac{1 + v_b^2}{2} = \frac{\rho \cdot E(t_b)}{1 - \rho} \cdot \frac{1 + v_b^2}{2} \quad (22)$$

kde

v_b [–] variační koeficient (stochastické) doby trvání obsluhy t_b :

$$v_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)} = \frac{1}{E(t_b)} \cdot \sqrt{E(t_b^2) - E^2(t_b)} \quad (23)$$

Poslední výraz vpravo v rovnici (22) vyjadřuje tzv. Pollaczekův-Khintchinův vztah. [17] Střední délka fronty (počet požadavků před obslužnou stanicí / elementů materiálových toků před místem technologické operace) je dán vztahem:

$$N_W = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \cdot \frac{1 + v_b^2}{2} \quad (24)$$

- **G|G|1 model** – jedná se o obecný model, kde kromě dob obsluhy t_b také samotné vstupy požadavků/elementů materiálu do SHO vykazují obecné rozdělení pravděpodobnosti. S využitím vztahů mezi variačním koeficientem doby mezi vstupy t_a do SHO a doby obsluhy t_b :

$$v_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_a)}}{E(t_a)} = \lambda \cdot \sigma(t_a); v_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)} = \lambda \cdot \sigma(t_b) \quad (25)$$

a kombinací vztahů platných pro modely M|G|1 a G|M|1 lze odvodit [17]:

$$N_S \approx \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{v_a^2 + v_b^2}{2} \right) \cdot \rho \right] \quad (26)$$

Pro střední dobu průchodu zakázky / elementu materiálu od vstupu SHO do obslužné stanice, resp. k výstupu z SHO lze dále odvodit [17]:

$$t_S = \frac{N_S}{\lambda}; t_W \approx \frac{N_S - \rho}{\lambda} = \frac{\rho \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{v_a^2 + v_b^2}{2} \right) \right]}{\mu \cdot (1 - \rho)} \quad (27)$$

- **M|M|m model** – je zobecněním M|M|1 modelu s tím, že SHO obsahuje m navzájem nezávislých obslužných stanic (paralelních pracovišť). Tím se násobí intenzita obsluhy μ takového SHO, čemuž odpovídá také m -násobně nižší stupeň vytížení, pokud bude intenzita vstupů λ stejná jako u systému M|M|1. Neboli pro stupeň vytížení SHO zde platí [17]:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu \cdot m} \quad (28)$$

Pro střední počet požadavků ve frontě (střední délku fronty) dále platí [17]:

$$N_W = \frac{\rho \cdot (m \cdot \rho)^m}{m! (1 - \rho)^2} \cdot \left[\frac{(m \cdot \rho)^m}{m! (1 - \rho)} + \sum_{\kappa=0}^{m-1} \frac{(m \cdot \rho)^\kappa}{\kappa!} \right]^{-1} \quad (29)$$

kde

$\kappa [-]$ hraje roli počtu požadavků/elementů materiálového toku v SHO, tedy obecně $0 \leq \kappa < \infty$; v případě vztahu (29) jsou tedy uvažovány pouze ty stavy SHO, kdy nejsou obsazeny všechny obslužné stanice. Výraz v hranaté závorce představuje pravděpodobnost, že se v daném SHO nevyskytnou žádné požadavky.

V celém SHO a dále pro střední dobu průchodu zakázky/elementu materiálu od vstupu SHO do jedné z obslužných stanic, resp. k výstupu z SHO platí [17]:

$$N_S = N_W + \frac{\lambda}{\mu} = N_W + m \cdot \rho; t_S = \frac{N_S}{\lambda} = t_W + \frac{1}{\mu}; t_W = \frac{N_W}{\lambda} \quad (30)$$

V literatuře, např. [17] je jako jeden ze stěžejních vztahů mezi veličinami zavedenými a diskutovanými v této kapitole uváděn **Littleův vztah**, který dává do souvislosti střední dobu setrvání v SHO t_S , střední počet požadavků N_S v SHO, příp. střední hodnotu doby mezi vstupy jednotlivých požadavků do SHO $E(t_a)$, příp. intenzitu vstupů λ :

$$t_S = N_S \cdot E(t_a) = \frac{N_S}{\lambda} \quad (31)$$

Z tohoto vztahu lze pak odvodit rovnice pro výpočet ostatních důležitých ukazatelů. Konkrétně pro střední dobu čekání ve frontě t_W platí [17]:

$$t_W = t_S - E(t_b) \quad (32)$$

Tyto vztahy tedy platí obecně s tím, že je lze pro konkrétní typ SHO upravit dosazením za jednotlivé činitele pomocí vztahů platných pro daný SHO. Např. pro SHO typu $M|M|1$ lze odvodit [17] následující **zjednodušenou formu Littleova vztahu**:

$$t_S = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (33)$$

$$t_W = t_S - E(t_b) = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} = \frac{N_S}{\mu} = \frac{N_W}{\lambda} \quad (34)$$

Jak bylo poznamenáno na úvod této kapitoly, kromě otevřených SHO, pro které platí výše uvedené vztahy (13) až (30), existují také uzavřené SHO. Ty modelují například uzavřený okruh dopravníkové trati. Typickým příkladem jsou závěsové nebo skidové dopravníky používané v hromadné výrobě k přemístění polotovarů v rámci výrobní linky pomocí závěsů, resp. skidů mezi po sobě následujícími stanovišti, na kterých jsou vykonávány jednotlivé technologické operace. Jiným příkladem jsou např. systémy zásobování výrobních linek pomocí automatizovaných řízených vozidel⁷, která slouží jako tahače nosičů dílů pro zásobování

⁷ AGV – Automated Guided Vehicle; FTS – Fahrerlose Transportsysteme

montážních linek materiálem, přičemž tato vozidla se pohybují po přesně definovaných uzavřených trajektoriích. Důležitým parametrem těchto SHO je počet aktivních prvků K_A (nosičů materiálu – např. závěsů nebo vozidel).

- **M|M|1|K|xxxx model** – jde o SHO s počtem požadavků (elementů materiálu) omezeným hodnotou K . Pro takový systém lze odvodit následující vztahy pro střední délku fronty před obslužnými stanicemi, resp. v celém systému [17]:

$$N_S = \sum_{j=1}^{K_A} \frac{K_A!}{(K_A - j)!} \cdot j \cdot \left(\frac{\bar{\theta}}{\mu}\right)^j \cdot \frac{1}{\sum_{i=0}^{K_A} \left(\frac{\bar{\theta}}{\mu}\right)^i \cdot \frac{K_A!}{(K_A - i)!}} \quad (35)$$

$$N_W = \sum_{j=2}^{K_A} \frac{K_A!}{(K_A - j)!} \cdot j \cdot \left(\frac{\bar{\theta}}{\mu}\right)^j \cdot \frac{1}{\sum_{i=0}^{K_A} \left(\frac{\bar{\theta}}{\mu}\right)^i \cdot \frac{K_A!}{(K_A - i)!}} \quad (36)$$

kde intenzita vstupů θ závisí na aktuálním stavu systému a proto je třeba uvažovat střední intenzitu vstupů $\bar{\theta}$, pro kterou platí [17]:

$$\bar{\theta} = \sum_{j=0}^{K-1} \theta \cdot (K_A - j) \cdot \frac{1}{\sum_{j=0}^{K_A} \left(\frac{\theta}{\mu}\right)^j \cdot \frac{K_A!}{(K_A - j)!}} \cdot \left(\frac{\theta}{\mu}\right)^j \cdot \frac{K_A!}{(K_A - j)!} \quad (37)$$

pro $0 \leq j \leq K_A$.

4.1.3 Způsoby zjišťování hodnot signifikantních charakteristik materiálového toku

V kapitole 4.1.1 byla vyjmenována řada charakteristik materiálového toku. Ve většině případů (při řešení projektů týkajících se logistiky, resp. simulací logistických/výrobních systémů, potažmo materiálového toku obecně) není třeba všechny tyto charakteristiky sledovat. Samozřejmě v jisté závislosti na konkrétních požadavcích plynoucích z řešené úlohy lze vytipovat následující signifikantní charakteristiky materiálového toku (jednotky zde uváděných veličin jsou stejné jako byly uvedeny v kapitole 4.1.1, případně bývají použity jejich násobky):

- **Průchodnost** – resp. produkce (maximálně dosažitelná, minimální požadovaná, průměrná hodinová / denní / za směnu...).
- **Takt** – často chápáný jako technický parametr konkrétního manipulátoru či stroje, který definuje maximální intenzitu materiálového toku tímto manipulátorem (strojem) procházející.
- **Doba průchodu** – někdy bývá sledována, je-li důležité dodržet např. včasnost realizace (jisté části) materiálového toku – typicky v případě dodávek JIT (*Just In Time*), ale také např. u technologických operací, jejichž doba trvání může výrazně ovlivnit výslednou kvalitu zpracovávaného polotovaru/hotového produktu – např. tepelná či chemická úprava materiálů.
- **Obsazenost** – případně stupeň (míra) zaplnění vyjádřená jako procentuální hodnota vzhledem ke kapacitě sledované oblasti, ve které materiálový tok probíhá.

Tyto charakteristiky mohou hrát roli jak vstupních parametrů, jejichž znalost je nutnou podmínkou k úspěšnému vyřešení daného projektu, tak roli sledovaných výstupních ukazatelů.

Způsoby sledování materiálového toku lze rozdělit podle místního a časového hlediska [21]:

- **Bodová (lokální) sledování** – sledování v určitém bodě trajektorie materiálu po určitou dobu.
- **Okamžitá (momentální) sledování** – prostorová sledování na určitém úseku trajektorie materiálového toku (o známé dráze, resp. vzdálenosti mezi počátečním a koncovým bodem).
- **Prostorově časová sledování** – sledování na určitém úseku trajektorie materiálu (na více místech v rámci tohoto úseku) po určitou dobu.
- **Úseková sledování** – sledování materiálového toku ze soustavy spojené s jedním z elementů tohoto materiálového toku (typicky v dopravě jde o měřicí vozidlo).

Technická řešení pro zajištění sledování materiálového toku mohou být různá a závisí mj. na podmínkách, ve kterých má být materiálový tok sledován (např. výbušné prostředí, zákaz pořizování audiovizuálních záznamů apod.). Obecně lze rozlišit [12]:

- **Optické systémy** – nejznámější je čárový kód různých typů – EAN (European Article Number), UCC (Uniform Commercial Code), ITF (Interleaved Two of Five), Code 11, Code 39, Code 128, MSI, PDF 417, Data Matrix, Maxicode, Vericode, Bokód, Codabar...) a dále systémy OCR⁸ a MICR⁹ pro rozpoznávání písma, ale zařadit lze také (audio)vizuální záznamy (viz dále) a také skladovací systém *pick by light* usnadňující proces vychystávání zakázek ze skladu, resp. naskladnění.
- **Radiofrekvenční systémy** – výhodné v prašném či vlhkém prostředí, kde mohou být optické systémy nespolehlivé.
- **Magnetické systémy** – nevýhodou je možnost rušení a krátký dosah stejně jako nespolehlivost, dochází-li k překryvu materiálu [22].
- **Biometrické systémy** – používané pro identifikaci osob, tedy nikoliv pro sledování materiálového toku. Kromě relativně vyšších nákladů je překážkou jejich širšího nasazení související problematika ochrany osobních údajů.
- **Hlasové systémy** – rovněž používané pro identifikaci osob, ale také v moderních systémech skladování – např. systém *pick by voice* (který je analogií výše zmíněného systému *pick by light*).

Žádný z těchto systémů nevykazuje 100% spolehlivost, což může mít mj. za následek výpadek v záznamech evidovaného toku (pohybu) materiálu. Z toho důvodu je vhodné způsoby záznamů kombinovat, což však na druhé straně naráží na snahu o finanční racionalizaci této činnosti.

Způsoby sledování materiálového toku se zabývá také řada projektů. Výzkum zaměřený na optické sledování pohybu materiálu vychází většinou ze známých technických řešení, jakými jsou

⁸ OCR – Optical Character Recognition

⁹ MICR – Magnetic Ink Character Recognition

CCD¹⁰ senzory (kamery) a CMOS¹¹ senzory. Zajímavý je například projekt TiLo (*Tracing Intelligenter Logistikobjekte*) řešený na Technische Universität Duisburg-Essen. [23], [24]. Jeho cílem je umožnit pomocí heuristických algoritmů použít záznamy z bezpečnostních kamer (které nejsou primárně pořízovány za účelem sledování materiálového toku) k vyhodnocení pohybu materiálu včetně souvisejících charakteristik materiálového toku (intenzita, směr...). Zejména pro aplikaci v průmyslu je zde slibná minimální výše investičních nákladů (pokud jde o HW vybavení), problematičtější je naopak otázka ochrany osobních údajů.

4.1.4 Simulace materiálového toku, výrobních a logistických systémů

Pro optimalizaci často složitých a rozsáhlých logistických systémů nebo jejich částí je použití simulace ve virtuální realitě v podobě počítačového modelu, do kterého je reálný systém přenesen, velmi vhodné, mnohdy dokonce to jediné v praxi akceptovatelné řešení (přestože se zdaleka nejedná o jedinou možnost využití simulačních nástrojů). Podrobný popis veškerých kroků, ze kterých každá simulační studie sestává, podává [1] a [25]. Pokud jde o kompletní simulační studii (tj. včetně získání vstupních dat, určení cílových hodnot jednotlivých veličin atd.), typický průběh uvádí [26] či [27] a pojednává o něm rovněž směrnice VDI 3633 (platná v Německu¹², ale využívaná obecně i v jiných zemích, zejména v sektoru automobilového průmyslu v rámci simulačních studií prováděných jak pro koncové výrobce, tak i pro subdodavatele). Citovaná směrnice definuje rovněž související pojmy, kterými jsou [3]:

- **Simulační běh** – zobrazení chování systému pomocí modelu v rámci určitého časového rozsahu, během kterého jsou současně sledovány a statisticky vyhodnocovány hodnoty relevantních stavových veličin.
- **Replikace** – z důvodu zajištění spolehlivosti výsledků simulace je nutno provést simulační běh modelu se stejnými vstupními daty a parametry opakovaně, vždy s jinými počátečními hodnotami (tzv. *seed values*) používanými algoritmy pro generování proudů pseudonáhodných čísel (viz oddíl 4.4). Výjimkou jsou modely bez definovaného ukončení simulace, kde není prováděno n replikací, z nichž každá trvá simulární čas ΔT , nýbrž je zvolen n -násobně dlouhý simulární čas. Výsledky, které lze považovat za statisticky vzájemně nezávislé, jsou vztaženy ke každému z n intervalů tohoto simulačního času. [28]
- **Simulační experiment** – cílené empirické šetření chování modelu na základě opakovaných simulačních běhů při systematickém provádění změn parametrů nebo struktury modelu. Existují různé přístupy k provádění simulačních experimentů, podle nichž je strukturován plán experimentů. Nejznámější přístupy k simulačním experimentům jsou [29]:
 - **Metoda postupných změn faktorů (one-by-one factor method)** – principem je změna vybraného faktoru (a provedení nového simulačního experimentu), zatímco ostatní faktory zůstávají nezměněny. Nevýhodou je, že tak nemusí být odhalen dopad spolupůsobení více faktorů.

¹⁰ CCD – Charged Coupled Device

¹¹ CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

¹² VDI – Verein Deutscher Ingenieure

- **Metoda změn všech faktorů (Factorial Testing/Multi-Faktorielle Versuchsplanung)** – vyžaduje provádění experimentů pro každou kombinaci faktorů (jejich hodnot); nevýhodou je z toho plynoucí velké (exponenciálně rostoucí) množství prováděných experimentů.
 - **Plán změn vybraných faktorů (Fractional Factorial Planning/Teilfaktorielle Versuchsplanung)** – vychází z poznatku, že některé společné vlivy více faktorů lze nahradit jediným novým činitelem.
 - **Shaininova metoda** – vychází z Paretova zákona uplatňovaného i v jiných technických a společenskovedních disciplínách, podle kterého většina následků má (z množiny všech možných) jen velmi málo dominantních (rozhodujících) příčin. Snahou je tedy při návrhu simulačního experimentu předem určit ty parametry, které mají na výsledky experimentu největší vliv.
- **Verifikace** – formální důkaz správnosti simulačního modelu (VDI 2008, Abschnitt 6.5.3). Jde o ověření, zda byl model transformován z původního formátu popisu do nového způsobu popisu korektně. [28] Jednou z častých technik patřících do skupiny statických verifikačních metod je strukturované „procházení“¹³ kódu použitého simulačního jazyka. Příkladem dynamické verifikace může být přepis programu klíčových komponent a ověření získání stejných výsledků nebo analýza vztahu vstupů a výstupů, která souvisí již s pojmem validace (viz dále). [30] Více konkrétní vysvětlení pojmu je ještě uvedeno dále v části 4.4.
 - **Validace** – ověření dostatečné shody modelu a originálního systému. Účelem je ujistění, že model vykazuje „dostatečně shodné“ a bezchybné chování jako originální systém. V souvislosti s pojmy verifikace a validace se ještě používá výraz *akreditace*, resp. *certifikace*, a to pro simulační modely vojenského využití – pojem zavedlo ministerstvo obrany Spojených států amerických. Akreditace zohledňuje kromě výsledků validace a verifikace i snadnost ovládnutí simulačního modelu a zejména dokumentaci celé simulační studie [30]. Formální důkaz správnosti modelu je však většinou obtížné předložit. Proto se používá také pojem *kredibilita*, který lze chápat jako přijatelnost modelu pro zadavatele (konečného uživatele). [28] V cizí literatuře se také používá výraz *face validity*, resp. *Validierung im Dialog*, který naznačuje provedení validace opírající se především o vizuální ověření správnosti chování modelu. Toto ověření obvykle provádí znalci daného simulovaného systému a pokud možno nezainteresované osoby/skupina osob [30], [31], [32], [33]. Jde především o ověření logiky pojmového modelu a logičnosti vztahu mezi vstupy a výstupy [34]. Pojem je dále rozveden v části 4.4. Další metodiky validace stručně vyjmenovává např. [30], [31], [34], [33].
 - **White-box validation** – jde o část validace zaměřenou na dílčí submodely simulačního (meta)modelu za účelem ověření, že každá jeho část reprezentuje model (systém) s dostatečnou přesností. Je třeba mít na paměti, že porovnávání výstupů modelu a systému, resp. metamodelu a modelu, je porovnávání dvou náhodných výběrů ze souborů náhodných veličin. [35] White-box validace zkoumají explicitní předpisy funkcí, na kterých je daný simulační (sub)model nebo metamodel založen. [7]

¹³ Structured walk-through

- **Black-box validation** – část validace zaměřená na celkový (meta)model ověřující dostatečně přesnou reprezentaci reálného systému, resp. detailního simulačního modelu. [35] Black-box validace zkoumá pouze vztah mezi vstupy a výstupy simulačního (meta)modelu, tj. bez nutné znalosti explicitního vyjádření funkcí, které vstupy na výstupy jednoznačně převádějí. [7]
- **Testování** – předmětem testování je provedení běhu se simulačním modelem na základě testovacích vstupních dat (parametrů) za účelem ověření přesnosti chování a přesnosti modelem realizované simulace transformace vstupních dat na výstupy. [36], [37]
- **Operační validace¹⁴** - určení (ověření), že výstupní chování modelu vykazuje dostatečnou přesnost s ohledem na účel, za jakým byl simulační model vytvořen, tj. na oblast jeho možného využití. [30], [31], [32], [33]
- **Instrumentace modelu** – vložení dodatečného (bloku programového) kódu do prováděného kódu modelu za účelem sběru dat vykazujících podstatné informace o chování modelu již za jeho běhu. [37], [36]

4.2 AKTUÁLNÍ POZNATKY V OBLASTI DISKRÉTNÍ SIMULACE

V zahraničí i v České republice se pravidelně konají konference, symposia, semináře a jiná setkání uživatelů příslušných simulačních nástrojů, na kterých bývají prezentovány příklady využití diskrétní simulace v praxi. Z domácích lze jmenovat např. mezinárodní konferenci Výrobní systémy dnes a zítra pořádanou Katedrou výrobních systémů Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci, mezinárodní konferenci Witness pořádanou firmou Humusoft s.r.o. či každoroční Setkání uživatelů Plant Simulation pořádané pobočkami společnosti Siemens Industry Software nejen v ČR, ale i v zahraničí. Např. v Německu je dále každoročně firmou SDZ GmbH pořádáno SIMposimu, setkání uživatelů SW SimPro, Dosimis3 a dalších produktů této firmy. Další akcí je ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Významnou událostí zaměřenou nejen na diskrétní simulace je Winter Simulation Conference (WSC) spojující významné světové asociace jako např. American Statistical Association (ASA), Association for Computing Machinery (ACM), Institute of Industrial Engineers (IIE), The Society for Modeling and Simulation International (SCS) a další..

V rámci těchto konferencí byla (a bývá) publikována řada případových studií z oblasti diskrétní simulace materiálového toku ve výrobě. Za všechny jmenujme např. [38] prezentující využití simulačního modelu a PLC rozhraní pro virtuální uvedení do provozu. Z domácích publikací pak [39] popisující simulaci realizovanou v prostředí SIMUL8 a následnou analýzu výroby vačkových hřídelí [40] prezentující simulační studii provedenou s podporou nástroje Witness za účelem určení optimálního počtu automatických vozíků (AGV) operujících v bratislavském závodě koncernu Volkswagen, či [41], kde je ukázáno využití propojení analýzy v MS Excel s využitím maker a simulačního nástroje Witness.

Kromě příspěvků zveřejněných v rámci odborných konferencí byly další případové studie vydány formou článků v odborných časopisech. Zajímavý je příspěvek [42], ve kterém jsou ověřovány výsledky dvou různých heuristických metod použitých za účelem vybalancování pracovišť linky na výrobu motocyklů s pomocí simulačního modelu v prostředí ARENA. Za

¹⁴ Operational validation

zmínku stojí rovněž studie [43], ve které je představen komplexní simulační model vytvořený v prostředí Witness v propojení s MS Excel pro vstup a výstup dat v souvislosti s měřením výrobní efektivity zařízení (OEE¹⁵) v závodě založeném na konceptu tzv. Focus Factory (tedy na principu cílené produkce v relativně úzkém rozsahu portfolia). Z českých publikací lze jmenovat např. článek týkající se problematiky statistické analýzy časového průběhu zakázek hromadnou výrobou [11], navazující na starší příspěvek [44] z oblasti projektu digitální továrny ve firmě Škoda Auto, a.s., nebo také článek představující možnost využití diskretního simulačního modelu pro optimalizaci nevýrobních podnikových procesů. [45]

Existují také publikace, které případové studie zaměřené na diskretní simulace uvádějí souborně (formou sbírky/svazku). Např. [46] uvádí řadu simulačních studií z jednotlivých technologických úseků automobilového průmyslu (simulace zařízení lakoven, činnosti pracovníků v oblasti konečné montáže, apod.), ale také [26] obsahuje řadu případových studií zejména se zaměřením na optimalizační úlohy (což je časté využití simulací). [47] je sbírka případových studií uvádějící příklady simulací z oblasti materiálového toku v distribučním centru, vnitropodnikové logistiky, montážních a výrobních procesů i problematiky simulace personálních zdrojů.

4.3 METODY EFEKTIVNÍHO VYUŽÍVÁNÍ SIMULAČNÍCH MODELŮ

Prameny, které jsou zmíněny výše, se v převážné části věnují popisu simulačního modelu vytvořeného v některém ze standardních simulačních nástrojů, příp. jeho propojení s tabulkovým procesorem či databázovým systémem. Zvláště však v případě komplexních výrobních (logistických) systémů často vznikají rozsáhlé modely obsahující velké množství prvků. Nedůsledná dokumentace či nepřehledná struktura (hierarchie) simulačního modelu, resp. chybějící možnost jeho centrální parametrizace znesnadňuje reflexi změny parametrů provedené ve skutečném systému do jeho simulačního modelu. Zejména v situaci (která je velmi častou), kdy uživatelem a tvůrcem příslušného simulačního modelu jsou různé osoby. Další nevýhodou bývá nižší rychlost simulačního běhu z důvodu vysokého nároku na využití CPU použité výpočetní techniky v souvislosti s generováním pseudonáhodných čísel, grafickým vykreslováním simulovaných procesů, požadavky na kapacitu paměti atd.

Pro rychlejší průběh simulačních experimentů lze přistoupit k distribuované simulaci nebo k paralelní simulaci. Oba přístupy umožňují provedení simulačního programu pomocí výpočetního systému obsahujícího více procesorů, nebo multiprocessorů. Zatímco paralelní simulace probíhá s podporou více procesorů obsažených ve stejné jednotce výpočetní techniky (např. pracovní stanice), distribuovaná simulace je vykonávána více počítači alokovanými na různých místech (budovy, kontinentu...). Lze předpokládat eliminaci nepříznivého vlivu komunikační latence (zpoždění signálu) v případě distribuovaných procesorů s tím, jak jsou stále zrychlovány příslušné komunikační sítě (LAN¹⁶, WAN¹⁷, internet...). Podle základní taxonomie lze paralelní počítače dělit dále na systémy se sdílenou pamětí, distribuovanou pamětí a systémy zpracovávající stejné instrukce s různými daty, tj. v různých instancích konání programu [48]. Metoda paralelní distribuce tedy předpokládá disponibilitu několika licencí daného simulačního SW instalovaných na výpočetní technice propojené v rámci LAN, internetu apod. Kromě naznačených možných

¹⁵ Overall Equipment Effectiveness

¹⁶ Local Area Network (lokální síť)

¹⁷ Wide Area Network (rozsáhlá počítačová síť)

potíží s rychlostí komunikace jsou jednou z dalších nevýhod distribuované simulace vysoké investiční náklady spojené s pořízením nutného vybavení (licence, počítače, ...).

Pokud jde o samotný průběh simulace s využitím distribuované nebo paralelní simulace, lze rozlišit pět možností dekompozice příslušné úlohy, případně jejich kombinace [49]:

- 1) **Paralelizující kompilátor** – hledá úseky v sekvenčně prováděném kódu, které je možné vykonat paralelně; v případě nedostatku takových úseků lze větší časové úspory dosáhnout použitím multiprocesoru.
- 2) **Distribuované experimenty** – nezávislé replikace simulačního experimentu mohou být realizovány více procesory, jejichž koordinace je minimalizována na výpočet průměru jednotlivých výstupů; vhodné zejména u systémů dosahujících rychle ustálený stav a v případě potřeby dlouhých simulačních běhů.
- 3) **Distribuované jazykové funkce** – metodika založená na přiřazení pomocných úkonů (např. generace pseudonáhodných čísel) jednotlivým procesorům; hlavní výhodou spíše než časová úspora je přehlednost při použití téměř jakýchkoliv simulačních jazyků.
- 4) **Distribuované události** – přístup vyžadující existenci globálního seznamu událostí (*event list*) spravovaného hlavním procesorem; je třeba protokolů pro komunikaci mezi procesory (nutnou z důvodu možných chronologických inkonsistencí událostí), proto je tato možnost výhodná pro systémy se sdílenou pamětí a snadným přístupem k ní.
- 5) **Distribuované části modelu** – tato alternativa je možná u systémů s nízkými nároky na informační toky a řízení. Reprezentaci těchto systémů pomocí orientovaných grafů lze rozlišit podle toho, má-li systém fixní topologii (např. systém hromadné obsluhy) nebo topologii dynamickou (např. počítačová hra, simulátor letu apod.).
- 6) **Kombinovaný přístup** – např. distribuce výpočtu událostí a aktualizace grafiky.

V případě diskrétní simulace nachází výrazné uplatnění dekompozice simulačních experimentů principem distribuovaných experimentů. Konkrétní způsob dekompozice může např. spočívat v rozdělení matice experimentů do bloků (jejichž počet je dán počtem jader procesoru použité výpočetní techniky), přičemž toho rozdělení proběhne automaticky na základě algoritmů zabudovaných (naprogramovaných) již v rámci použitého simulačního SW (příp. lze rozdělit matici experimentů manuálně a její části spustit v oddělených instancích simulačního modelu, přičemž statistiky sledovaných veličin je pak nutné zpětně dopočítat).

V souvislosti s metodou distribuovaných událostí je nutno ještě poznamenat, že lze rozlišit historicky dva přístupy k synchronizaci: konzervativní a optimistický. Optimistická synchronizace toleruje porušení podmínky lokální kauzality s tím, že tato porušení musí být napravena (zpětným posunem simulačního času před tuto událost). Známým zástupcem této synchronizace je tzv. *time-warp mechanismus*. Naopak konzervativní synchronizace neumožní paralelní simulaci dvou událostí, pokud se tyto mohou navzájem ovlivnit. Tím je sice vyloučeno porušení podmínky lokální kauzality, na druhou stranu ovšem není plně využit potenciál paralelity simulačního průběhu [25].

Jinou možností eliminující problémy související s nedostatečnou rychlostí průběhu simulačních experimentů je tvorba a použití simulačních metamodelů. Kleijnen používá pojem metamodel pro označení (regresního) modelu, který popisuje vztahy mezi vstupy a výstupy (původního)

simulačního modelu, tedy vztahy mezi vstupními parametry a (vysvětlujícími) nezávislými proměnnými na straně jedné a hodnotami výstupních (vysvětlovaných) proměnných (veličin) na straně druhé [50]. Podrobné pojednání o konceptu metamodelů, výběru dat pro související regresní analýzu, způsobech určení parametrů regresní funkce založené na principu nejmenších čtverců, validaci metamodelů včetně příkladů jejich využití lze nalézt v [51].

Význam metamodelů pro diskrétní simulaci nespočívá ovšem pouze v (zamýšleném) urychlení průběhu simulace. Z pohledu uživatele je možné metamodel (stejně jako i detailní simulační model) chápat jako transformátor vstupních parametrů, které jsou zadány ve vhodném uživatelském prostředí, na hodnoty výstupních (sledovaných) veličin. Výhody pro uživatele jsou následující:

- možnost obsluhy simulačního modelu pomocí jiné aplikace (se kterou je uživatel lépe seznámen nežli s příslušným simulačním softwarem),
- často využívaná možnost propojení s prezentačními nástroji (Power Point, HTML soubory apod.) pro usnadnění přípravy prezentace výsledků simulační studie.

Přes tyto výhody se samozřejmě nelze vyhnout splnění jistých nutných podmínek, které využití a práci s metamodelem umožňují. Předně jde o pořízení a instalaci simulačního software, jehož dodání může být součástí smluvně ujednaných služeb poskytovaných v rámci dané simulační studie. Další omezení spočívá v prvně jmenované výhodě – totiž využívat simulační metamodel jako „černou skříňku“ (black box), kdy se uživatel spoléhá bez hlubších znalostí vnitřních algoritmů či dokonce problematiky simulace na správnost takto získaných výsledků (kterými často bývají odpovědi na otázky typu „co se stane, když...“ – tzv. „what-if“ analýza).

Z technologického hlediska může být propojení příslušného simulačního softwaru s jinou aplikací zajištěno několika možnými způsoby. Jde obecně o datovou komunikaci, která je řízena konkrétně použitým metajazykem. Jako metajazyk je označován komunikační jazyk, který definuje strukturu a zpracování dat, která jsou předmětem komunikace [52]. Jedním ze způsobů komunikace mezi aplikacemi je DDE (Dynamic Data Exchange), což je funkcionalita, která umožňuje programům v operačním systému Windows přistoupit (coby DDE klient) k jinému programu (DDE serveru) a provádět jeho instrukce a která také podporuje výměnu dat (pomocí DDE hotlinks). Běžná je možnost (obousměrného) propojení s textovými soubory či soubory formátu .csv (comma separated value), XML (eXtensible Markup Language¹⁸) a s databázovými systémy (např. Access, Oracle, SQL, Infomix) pomocí rozhraní ODBC (Open Database Connectivity) nebo API, kdy lze použít příkazy SQL (Structured Querying Language) apod. Standardní aplikace jako nástroje balíku MS Office umožňují rovněž ovládání simulačního softwaru pomocí jazyka VBA (Visual Basic for Application). Obecně je možné propojit libovolné aplikace, které podporují COM rozhraní (Component Object Model) – kromě aplikací MS Office také např. Windows Scripting Host. Příkladem mohou být příkazy DDE, kterými lze mj. také zadávat instrukce jazyka SimTalk (jehož syntaxe je využívána v SW Plant Simulation), stejně jako lze z prostředí Plant Simulation v rámci kódu jazyka SimTalk volat makra (jež mají syntaxi odpovídající jazyku VBA) spouštěná v jiných aplikacích. Alternativou je připojení knihovny

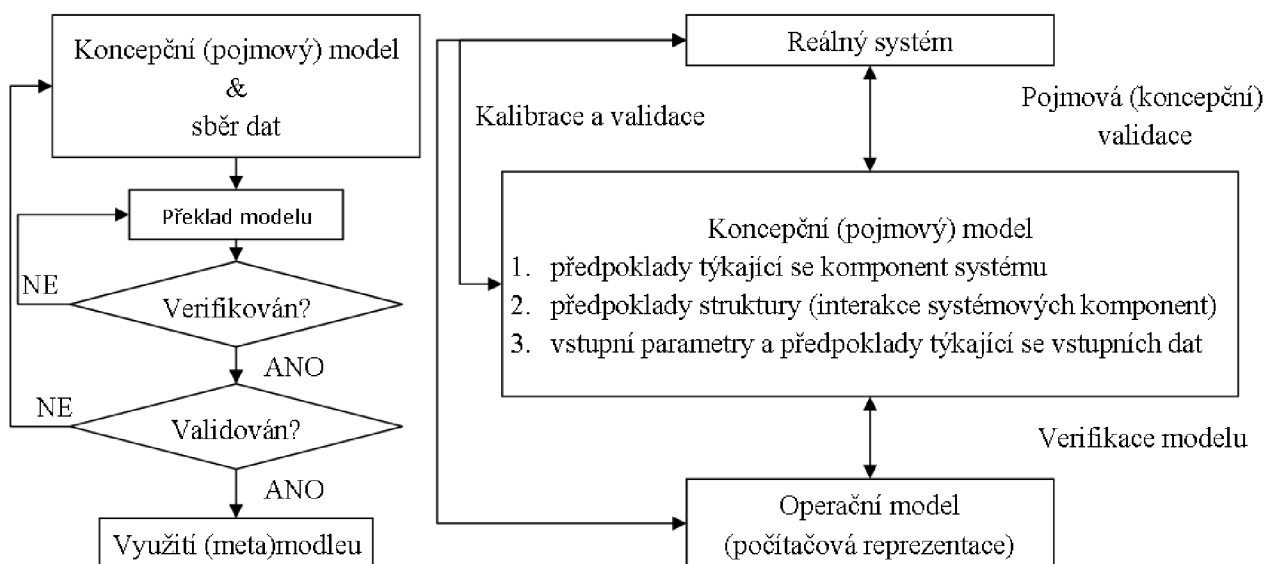
¹⁸ Na bázi XML byly vyvinuty další datové formáty jako CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) nebo AutomationML (Automation Markup Language). [52]

emPlantLib (toto rozšíření umožní použití dalších příkazů pro vzdálené ovládání simulačního modelu v Plant Simulation), resp. knihovny Ds3Edit.tlb pro ovládání software modelu v softwaru Dosimis-3. V obou případech je komunikace založena na principu COM rozhraní. To umožňuje také propojit Dosimis-3 s prostředím Visual C++. Jiná možnost je použití prvku ActiveX (např. pro aktivaci COM prvků, jako jsou Internet Explorer, Media Player apod.). Další alternativou je komunikace s jinou aplikací prostřednictvím protokolu TCP/IP.

Pokud jde o komunikaci simulačních programů s PLC (využívanou většinou v rámci emulací), možností je využití rozhraní OPC (OLE for Process Control – komunikační protokol rozhraní mezi HW a SW produkty průmyslové automatizace) nebo SIMIT (Simulation & Testing), což je platforma pro testování automatizační techniky.

4.4 SIMULAČNÍ METAMODELY

Na simulační model lze nahlížet jako na transformátor vstupních parametrů na hodnoty výstupních veličin. To samozřejmě také platí pro metamodely (tj. „modely simulačních modelů“), které tuto transformaci efektivněji, ovšem s jistou mírou nepřesnosti, realizují. Náhradu detailního simulačního modelu metamodelem lze uskutečnit pomocí regresní analýzy¹⁹. Náhradou je tedy v tom případě regresní metamodel simulačního modelu [51]. V podstatě se stále jedná o úlohu tvorby simulačního modelu, která je obvykle prováděna v několika iterativních krocích. Různí autoři tyto kroky popisují s různou mírou detailnosti – viz např. [53] nebo [25]. Se zaměřením na samotnou tvorbu modelu lze tento proces zachytit pomocí následujícího vývojového diagramu, kde vývoj metamodelu (vlevo) je porovnán s procesem tvorby modelu na základě reálného systému (vpravo) podle [53].



Obr. 3 Proces tvorby simulačního metamodelu a detailního modelu (zdroj: autor)

Pojmový model může být vytvořen pomocí přirozeného nebo (v drtivé většině) umělého jazyka – např. také formou vývojového diagramu. Také pojmový model je třeba validovat, jak zmiňuje např. [33] – jde o určení, že teorie a předpoklady, na kterých se pojmový model zakládá, jsou

¹⁹ V nejjednodušším případě (v praxi málo pravděpodobném), kdy model má jen jeden vstupní parametr, lze použít vizuální analýzu.

pravdivé, a že reprezentace daného problému (systému, který má být simulován – v zahraniční literatuře se někdy používá pojem *problem entity*) včetně zachycených kauzalit je správná. Příkladem modelu se rozumí převedení pojmového modelu do programovacího jazyka (C++, Java, VBA, SimTalk či jiné.). Implementace obecných programovacích jazyků (např. FORTRAN, C) může vést k více chybám nežli použití speciálních programovacích jazyků vyvinutých pro účely tvorby simulačních modelů (např. SimTalk) [30], [32], [33]. Účelem verifikace je ověření, že implementace modelu (do prostředí použitého simulačního softwaru) a použitá data odpovídají koncepčnímu modelu. Jde o odpověď na otázku „Vytvořili jsme simulační model správně?“. Oproti tomu v rámci validace jde o ověření shody chování modelu s reálným systémem, který má model simulovat. Jde tedy o odpověď na otázku „Vytvořili jsme správný model?“. Balci používá pro rozlišení alternativní pojmy, a to přesnost transformace pro verifikaci a přesnost reprezentační/chování pro validaci [54]. S tím souvisí také pojem kalibrace modelu, což je iterativní porovnávání modelu s realitou a následné provádění odpovídajících úprav modelu.

Vraťme se k otázce vytvoření regresního simulačního metamodelu. Předpokládejme reálný systém, jenž je předmětem simulace. I ten je možné popsat z pohledu jednotlivých výstupních veličin jako transformační funkci

$$w = f_0(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (38)$$

kde n uvádí počet vstupních parametrů (ten může být spočetný nebo – teoreticky – nekonečný) a w je výstupní veličina (její hodnota). Otázka nespočetnosti vstupních parametrů je spíše filosofická, proto zde budeme předpokládat (stejně jako je tomu při tvorbě simulačních parametrů) konečný počet vstupních parametrů (volených např. na základě citlivostní analýzy), které ovšem mohou být jak deterministické, tak stochastické povahy.

Je třeba rozlišit mezi proměnnými a parametry [55]. Pod pojmem parametr budeme dále rozumět kvantitativní údaj, který nelze v reálném systému přímo pozorovat (např. intenzita vstupů či obsluhy v systému hromadné obsluhy – SHO). Naopak proměnnou lze přímo měřit – např. doba mezi příchody (zakázek do SHO) nebo počet obslužných stanic.

Téměř vždy jsou procesy probíhající v reálném systému náhodné. Proto také hodnota výstupní veličiny simulačního modelu reálného systému bude náhodná veličina

$$y = f_1(z_1, \dots, z_k, r) \quad (39)$$

kde r označuje pseudonáhodné číslo, pomocí kterého je v simulačním modelu zachycena náhodnost simulovaných procesů, a z_1 až z_k jsou parametry modelu. Pseudonáhodné číslo je výsledkem rekursivního algoritmu, tj. hodnota r_i je funkcí předchozích hodnot r_{i-1}, r_{i-2}, \dots . Tato relace je deterministická (jedná se o sofistikovaný algoritmus, který je v některé z možných forem součástí simulačních software), proto se užívá výraz pseudonáhodné číslo. Hodnota r_1 je pak často v zahraniční literatuře či prostředí simulačních software označována jako *seed value* pro proud pseudonáhodných čísel – *stream (Strom)*. Generování pseudonáhodných čísel je většinou řízeno příslušnými numerickými algoritmy. Např. knihovny NAG (Numerical Algorithm Group) obsahují řadu subrutin naprogramovaných v jazyce FORTRAN. Jejich volání v jazyce Pascal uvádí [51].

4.4.1 Regresní simulační metamodely prvního řádu

Celý simulační model lze tedy matematicky popsat jako vícerozměrnou transformační funkci, jejíž výstupní hodnota je stochastické povahy – viz rovnice (39).

Příslušný regresní metamodel lze pak popsat pomocí vztahu

$$y_{ij} = \beta_0 + \sum_{h=1}^{q-1} \beta_h \cdot x_{ih} + \varepsilon_{ij} \quad (40)$$

se stochastickou chybou $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, kde dále $i = 1, 2, \dots, n$ jsou kombinace vysvětlujících proměnných h , jejichž hodnotu nabývá x_{ih} a kde q je celkový počet vysvětlujících proměnných. Každá kombinace i vychází z jiného proudu náhodných čísel, proto náhodné veličiny $y_{11}, \dots, y_{i1}, \dots, y_{n1}$ jsou vzájemně nezávislé. n je dáno počtem různých hodnot každé z q vysvětlujících proměnných. Regresní proměnná x_{ih} může být v některých případech totožná s parametrem či proměnnou (detailního) simulačního modelu, nebo může jít o výsledek transformace jednoho či více parametrů (proměnných) tohoto modelu. Maticový zápis stejného transformačního vztahu má podobu

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \mathbb{B} + \mathbf{e} \quad (41)$$

Pokud jde o otázku validace již kalibrovaného regresního metamodelu, existují tři základní principy [30]. Subjektivní vyhodnocení vycházející z porovnání grafických výstupů – histogramy, krabicové diagramy apod. (příp. s podporou vizualizace), statistické metody založené na určení konfidenčních intervalů a testy hypotéz. [51] uvádí možný postup, který spočívá v ověření přesnosti odhadů $\hat{\mathbf{y}}_{n+1}$ pomocí odhadu $\hat{\mathbb{B}}$ vektoru \mathbb{B} regresních parametrů β_h v rovnici (41) získaných metodou nejmenších čtverců pro případ nové série vstupních parametrů ($\mathbf{x}_{(n+1)}^T = (1, x_{(n+1) \cdot 1}, \dots, x_{(n+1) \cdot q-1})$). Postup spočívá v provedení $m_{n+1} > 1$ simulačních běhů se vstupními parametry $x_{(n+1)}$ a vyjádření odhadu rozptylu průměru výstupů pro těchto m_{n+1} replikací:

$$\widehat{var}(\bar{y}_{n+1}) = \sum_{j=1}^{m_{n+1}} \frac{(y_{n+1,j} - \bar{y}_{n+1})^2}{(m_{n+1} - 1) \cdot m_{n+1}} \quad (42)$$

kde

$$\bar{y}_{n+1} = \frac{1}{m_{n+1}} \cdot \sum_{j=1}^{m_{n+1}} y_{n+1,j} \quad (43)$$

je aritmetický průměr pro m_{n+1} replikací simulace s novou kombinací vstupu $x_{(n+1)}$.

Konečně je třeba vyjádřit standardní chybu odhadu označovanou v cizí literatuře také jako *Studentized prediction error* [51]:

$$z = \frac{\hat{y}_{n+1} - \bar{y}_{n+1}}{(\widehat{var}(\hat{y}_{n+1}) + \widehat{var}(\bar{y}_{n+1}))^{1/2}} \quad (44)$$

což je rovněž náhodná proměnná. Její absolutní hodnotu je nutné porovnat se $z_{1-\alpha/2}$, tedy s $(1 - \alpha/2)$ kvantilem náhodné proměnné s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Překročení kritické hodnoty implikuje zamítnutí nulové hypotézy tvrdící, že metamodel je vyhovující náhradou simulačního modelu, na hladině významnosti α . Jak [51] dále ukazuje, v případě provedení běhů pro několik kombinací nezávislých (vstupních) parametrů a proměnných při konstantní hladině významnosti roste nebezpečí chyby I druhu, tedy pravděpodobnosti chybného

zamítnutí ve skutečnosti vyhovujícího (meta)modelu (bliže o chybě I, II a III druhu v části 4.5.1). S využitím **Bonferroniho nerovnosti** lze pak ukázat, že pravděpodobnost zamítnutí modelu α_E splňuje následující podmínku:

$$\alpha_E \leq \sum_{gk=1}^{GK} \alpha_{gk} \quad (45)$$

kde GK je počet kombinací nezávislých parametrů a proměnných a α_{gk} označuje hladinu významnosti použitou pro testování gk -té kombinace.

Tento postup má nevýhodu v nutnosti provádět GK simulačních běhů (pro každou kombinaci). Alternativou je křížová validace, *cross-validation*, která spočívá v analogickém postupu s tím rozdílem, že před výpočtem odhadu regresního parametru $\hat{\beta}$ výstupní (náhodné) veličiny \hat{y} a jejího rozptylu a kovariance a konečně před určením kritické hodnoty je vždy jedna kombinace v těchto výpočtech vynechána. Celkem tedy získáme n kritických hodnot (statistik) z . Navíc bylo dokázáno, že není třeba provádět výpočty pro všech n vynechávaných kombinací, neboť platí [51]:

$$\hat{y}_{-i} - y_i = \frac{\hat{y}_i - y_i}{1 - h_{ii}} \quad (46)$$

kde \hat{y}_{-i} označuje odhad výstupního parametru při vynechání i -té kombinace a celý výraz na levé straně rovnice (46) je reziduum vzniklé tímto vynecháním. Výraz h_{ii} je i -tý element hlavní diagonály matice $\mathbb{H} = \mathbb{X}(\mathbb{X}^T \mathbb{X})^{-1} \mathbb{X}^T$. V případě použití metody vážených nejmenších čtverců pro regresi metamodelu půjde o matici $\mathbb{H}^* = \mathbb{W} \mathbb{X}(\mathbb{X}^T \mathbb{W}^{-1} \mathbb{X})^{-1} \mathbb{X}^T \mathbb{W}$, kde \mathbb{W} a \mathbb{W} jsou diagonální matice, jejichž prvky tvoří hodnoty $1/\hat{\sigma}_i$, resp. $\hat{\sigma}_i^2$. Výraz $\hat{\sigma}_i^2$ značí rozptyl výstupní veličiny y_{ij} , tedy:

$$\hat{\sigma}_i^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m_i - 1} \right]^{1/2} \quad (47)$$

Další alternativou, jak validovat regresní metamodel, je tzv. *Rao's Lack-of-Fit test* (test nedostatku souladu), který porovnává podíl dvou odhadů rozptylu s kritickou hodnotou $F_{p,q}$, kde $p = N - q$ a $q = \sum_{i=1}^n (m_i - 1)$. Prvním bodovým odhadem rozptylu je odhad čtverců reziduí

$$\hat{g}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{N - q} \quad (48)$$

Druhý bodový odhad je odhad rozptylu výstupních hodnot, tj.

$$\hat{\sigma}_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m_i - 1} \right)^{1/2} \quad (49)$$

Bodový odhad (48) má tendenci přecenit skutečnou hodnotu v případě, že metamodel je chybný, což vede k překročení kritické hodnoty $F_{p,q}$ a zamítnutí nulové hypotézy o správnosti regresního metamodelu.

4.4.2 Regresní simulační metamodely vyšších řádů

Zatímco v případě regresních metamodelů prvního řádu neexistuje vzájemná závislost mezi jednotlivými vstupními proměnnými a parametry, v případě metamodelů vyšších řádů bude hodnota výstupní veličiny závislá také na kombinaci jednotlivých parametrů:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^K \beta_j \cdot x_j + \sum_{j=1}^K \sum_{g=j+1}^{K-1} \beta_{jg} \cdot x_j \cdot x_g + \sum_{j=1}^K \beta_{jj} \cdot x_j^2 + \varepsilon \quad (50)$$

Rovnici (50) lze samozřejmě linearizovat zavedením vhodné substituce. Validace regresních simulačních metamodelů je analogická postupům pospaným v části 4.4.1. Pro úplnost dodejme, že výše popsaný způsob validace je možno aplikovat na vztah regresní metamodel vs. (detailní) simulační model. Existuje samozřejmě řada dalších validačních technik, které jsou uplatňovány zejména v rámci simulačních studií v průmyslové praxi. Ucelený přehled podává [28]. Zmiňme zde pouze citlivostní analýzu, kterou lze použít také v rámci validace metamodelů. Samostatnou skupinou jsou pak statistické techniky a techniky založené na teorii pravděpodobnosti.

4.4.3 Využití regresních simulačních metamodelů

Existují dvě základní možnosti praktického využití validovaných metamodelů (bez ohledu na jejich výhody naznačené v úvodní kapitole 4 tohoto oddílu). [51] První je testování odhadu regresního parametru s cílem určit, do jaké míry se jeho hodnota blíží nule. Nulová hodnota např. parametru β_h (resp. hodnota velmi blízká nule) napovídá, že vliv vstupního parametru/proměnné je zanedbatelný. Je to alternativa, resp. odpověď na otázku v rámci „what-if“ analýzy. Druhá možnost využití metamodelů je extrapolace neboli predikce výstupů odpovídajících nové kombinaci vstupních parametrů.

4.5 VALIDACE MODELŮ A METAMODELŮ, VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

V této části práce je pojednáno o problematice související s ověřením validity simulačních modelů, resp. metamodelů. Kromě toho jsou zde také diskutovány možné způsoby plánování simulačních experimentů (problematika označovaná v cizí literatuře často jako *design of experiments*). V logické návaznosti je pak tato část práce zakončena diskuzí možného zpracování výsledků simulačních experimentů prováděných s (validovanými) modely, resp. metamodely.

Validace i vyhodnocení simulačních experimentů patří mezi základní fáze, ze kterých se skládá typická simulační studie. Zde je zdůrazněn význam a dopad zohlednění náhodných jevů v simulačních modelech, díky kterému je také na výsledky simulačních experimentů prováděných s těmito modely třeba nahlížet jako na data povahy náhodného výběru. Příčinou je přitom skutečnost, že (jak již bylo řečeno) ve většině případů modely, resp. metamodely postihují náhodné procesy. Problematikou tohoto zohlednění (formou regresních rovnic) se zabývaly již předchozí kapitoly 4.4.1 a 4.4.2. Je proto možné vysledovat jistou podobnost mezi prezentovanými postupy při validaci modelů i při vyhodnocení simulačních experimentů.

4.5.1 Statistické techniky validace simulačních modelů a metamodelů

Tyto techniky, někdy také označované jako kvantitativní techniky [28], uvádějí jako výsledek pravděpodobnost, se kterou simulační model svým chováním odpovídá simulovanému systému, resp. metamodel odpovídá detailnímu simulačnímu modelu. Jde o statistické testy (χ^2 test, Kolmogorov-Smirnovův test, Anderson-Darlingův test a Poissonův test), dále postupy založené na určení konfidenčních intervalů výstupních dat a konečně testování statistických hypotéz.

Společným problémem je, že většina těchto statistických technik předpokládá vzájemně nezávislé hodnoty (výstupní veličiny) – náhodný výběr a (nebo) jejich normální rozdělení. Ovšem výsledky simulačních běhů (či experimentů) jsou závislé (závislost je záležitostí *seed values* pro tvorbu proudů náhodných čísel). Je proto třeba použít další techniky k úpravě výstupů simulace, než mohou být tyto výstupy podrobeny některé ze statistických procedur. Jde o postupy zabývající se zpracováním výstupních dat simulačních modelů. Často používaným je dávkování (*batching*) spočívající ve spojení výstupních dat získaných z různých replikací simulačního běhu.

Validační techniky založené na konfidenčních intervalech vycházejí z konfidenčních intervalů, simultánních konfidenčních intervalů, nebo ze společných intervalů spolehlivosti (*confidence intervals, simultaneous confidence intervals, joint confidence intervals*), které lze vyjádřit pomocí rozdílů mezi středními hodnotami, odchylkami a rozděleními pravděpodobnosti výstupních veličin detailního modelu a metamodelu. Lze rozlišit jednorozměrné statistické techniky (*univariate statistical techniques*) pro výpočet konfidenčních intervalů a simultánních konfidenčních intervalů za použití Bonferroniho nerovnosti, a vícerozměrné statistické techniky (*multivariate statistical techniques*) pro vyjádření simultánních a společných konfidenčních intervalů (*simultaneous and joint confidence intervals*). Otázkou volby je některý z následujících vzájemně závislých parametrů: hladina významnosti, velikost populace (tj. počet výstupních hodnot daný počtem replikací v rámci simulačního běhu), odhady délky konfidenčních intervalů a bodové odhady jejich polohy [30], [31], [34], [33].

Často se podpůrně užívají též grafické techniky validace. Obvykle jde o vykreslení histogramů, krabicových diagramů a bodových diagramů. Výhodou je, že zde odpadá nárok na nezávislost a normální rozdělení dat, na kterých se grafy zakládají [33]. Přesněji, v případě histogramů a krabicových diagramů není nutná nezávislost dat a tato mohou mít libovolné, avšak shodné rozdělení pravděpodobnosti. Jestliže je veličinou, jejíž hodnoty jsou takto vykreslovány, náhodná proměnná, je obvykle třeba řádově tisíců pozorování. V případě středních hodnot výběru postačí stovky hodnot. Méně pozorování většinou vyžadují krabicové diagramy. Data použitá u bodových diagramů (zejména v případě operační validace – tzv. grafy chování) mohou být korelovaná, řídit se libovolným rozdělením pravděpodobnosti a být nestacionární. Jediný požadavek je dostatečný počet pozorování [56].

Kromě histogramů, krabicových diagramů a bodových diagramů jsou rovněž používány další grafy pro vyšetření statistických zvláštností dat či ověření základních předpokladů kladených na daný výběr dat. Pro vyhodnocení typu rozdělení se používá houslový diagram (na ose x je vynesena náhodná proměnná, na ose y percentily a hodnoty proměnné), pro rozlišení tvaru rozdělení může být využit kvantilový graf (na ose x je vynesena pořadová pravděpodobnost P_i na ose y pořádková statistika $x_{(i)}$). Dále se lze setkat s vrubovým krabicovým grafem (osa x je úměrná hodnotám $x_{(i)}$, na ose y je vynesena interval úměrný hodnotě \sqrt{n}) sloužícím pro posouzení variability mediánu. Grafy polosum (na ose x jsou vyneseny řádkové statistiky $x_{(i)}$, na ose y pak statistika $Z = 0.5 \cdot (x_{(n+1-i)} + x_{(i)})$), grafy symetrie (na ose x je vynesena hodnota $M - x_{(i)}$, na ose y $x_{(n+1-i)} - M$, kde M je medián) či grafy šikmosti (na ose x jsou hodnoty $u_{P_i}^2/2$ pro $P_i = i/(n+1)$, kde u_{P_i} značí kvantil normovaného normálního rozdělení, na ose y $Z_i = 0.5 \cdot (x_{(n+1-i)} + x_{(i)})$ slouží pro určení symetrie rozdělení. Pro posouzení náhodnosti (normálnosti) dat lze využít graf špičatosti (na ose x jsou opět hodnoty $u_{P_i}^2/2$ pro $P_i = i/(n+1)$, na ose y je $\ln(x_{(n+1-i)})/-2 \cdot u_{P_i}$). Graf rozptýlení s kvantily (který má na ose x vyneseny hodnoty P_i a na ose y hodnoty $x_{(i)}$) slouží

pro odhad kvantilové funkce výběru a na základě jeho tvaru lze opět odvodit typ rozdělení. Kvantilově-kvantilový graf (v cizí literatuře označovaný jako $Q-Q$ plot) umožňuje posoudit shodu výběrového rozdělení (na ose x je vyneseno teoretické kvantilové rozdělení $Q_T(P_i)$, na ose y hodnoty $x_{(i)}$). Pro porovnání rozdělení výběru s normálním rozdělením se tento graf označuje rankitový graf. K ověření normality výběrového rozdělení lze také využít podmíněný rankitový graf, který má na ose x vyneseny hodnoty $\Phi^{-1}[0.5 \cdot (U_{(n-1)} + U_{(n+1)})]$ a na ose y hodnoty $x_{(i)}$. Pořádkové statistiky $U_{(i)}$ jsou uspořádané náhodné proměnné U_i (volí se $U_{(0)} = 0$ a $U_{(n+1)} = 1$). Příkladem aplikace vizuálního ověření hypotézy je využití kruhového grafu, kterým lze ověřit symetričnost výběru [57].

Validační techniky založené na ověřování nulových hypotéz jsou používány pro porovnání středních hodnot, rozptylů a typů rozdělení výstupních hodnot detailního simulačního modelu a metamodelu (příp. simulovaného systému a modelu). Nulová hypotéza H_0 zní (např.) „daný simulační metamodel vykazuje přijatelnou míru shody s detailním modelem na hladině významnosti α “. Alternativní hypotéza H_1 má potom znění „daný simulační metamodel nevykazuje přijatelnou míru shody s detailním modelem na hladině významnosti α “. Hladinu významnosti α lze volit, přičemž je snahou vyhnout se chybám, jejichž pravděpodobnost je volbou α určena. Chyba I druhu znamená zamítnutí validního modelu (zamítnutí ve skutečnosti pravdivé nulové hypotézy H_0) a nazývá se také riziko tvůrce modelu (*Model builder's risk*). Má hodnotu α . Chyba II druhu je způsobena přijetím nevalidního modelu (mylné přijetí nulové hypotézy, která ve skutečnosti neplatí) a bývá též označována jako riziko uživatele modelu (*Model user's risk*). Její hodnota bývá značena β , přičemž potom platí:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (51)$$

Lze se ještě setkat s pojmem chyba III druhu, která znamená případ, kdy je řešen nesprávný problém. Ve [58] autoři navrhuji 20 indikátorů pro měření pravděpodobnosti chyby III. druhu a současně pravděpodobnosti, že sada možných výstupů (modelu) bude zamítnuta v důsledku chybné formulace problému. Současně navrhuji indikátory pro měření, jak dobře je daný problém strukturován.

V případě porovnávaných modelů, resp. detailního modelu a metamodelu, nebo také simulačního modelu a reálného systému jde o vyjádření rozdílu konfidenčních intervalů bodových odhadů středních hodnot výstupních veličin θ_1 , θ_2 obou modelů. Existují dvě rozdílné techniky (uvedené dále) – nezávislé vzorkování²⁰ a metoda společných náhodných čísel²¹. Pro obě je společné vyhodnocení výsledků. Mohou nastat tři případy [53]:

- 1) Konfidenční interval je záporný, potom nelze na dané hladině významnosti α zamítnout hypotézu $H_0: \theta_1 - \theta_2 < 0$.
- 2) Konfidenční interval je kladný, potom nelze na dané hladině významnosti α zamítnout hypotézu $H_0: \theta_1 - \theta_2 > 0$.
- 3) Konfidenční interval obsahuje 0 (číslo „nula“), na dané hladině významnosti α nelze zamítnout hypotézu o shodě obou modelů.

²⁰ Independent sampling

²¹ Common random numbers

Metoda nezávislého vzorkování předpokládá pořízení výstupních dat z obou modelů (nebo stejného modelu při dvou různých konfiguracích, jež jsou předmětem srovnání) na základě simulačních běhů s rozdílnými proudy náhodných čísel. To zajistí, že oba výběry $\{Y_1^{r_1}, r_1 = 1, \dots, R_1\}$ a $\{Y_2^{r_2}, r_2 = 1, \dots, R_2\}$ tvoří vzájemně nezávislé hodnoty (řady, kde R_1 , resp. R_2 je počet replikací provedených s modelem 1, resp. 2). Pro rozptyl rozdílu bodových odhadů středních hodnot \bar{Y}_1 a \bar{Y}_2 (což jsou v tomto případě aritmetické průměry) platí [53]:

$$\text{var}(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) = \text{var}(\bar{Y}_1) + \text{var}(\bar{Y}_2) = \frac{\sigma_1^2}{R_1} + \frac{\sigma_2^2}{R_2} \quad (52)$$

A $100(1 - \alpha)\%$ konfidenční interval rozdílu středních hodnot $\theta_1 - \theta_2$ (pomocí rozdílu jejich bodových odhadů $\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$) má hodnotu:

$$\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 \pm t_{\alpha/2, \nu} + \varepsilon(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) \quad (53)$$

kde $t_{\alpha/2, \nu}$ je $100(1 - \alpha)$ kvantil t rozdělení s ν stupni volnosti a $\varepsilon(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)$ je standardní chyba bodových odhadů středních hodnot. Tu lze vyjádřit následujícím vztahem [53]

$$\varepsilon(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) = \sqrt{\frac{S_1^2}{R_1} + \frac{S_2^2}{R_2}} \quad (54)$$

a kde S_1^2 , resp. S_2^2 je odhad rozptylu výstupních hodnot pro model 1, resp. 2:

$$S_i^2 = \frac{1}{R_i - 1} \cdot \left(\sum_{r=1}^{R_i} Y_{ri}^2 - R_i \cdot \bar{Y}_i^2 \right), i = \{1, 2\} \quad (55)$$

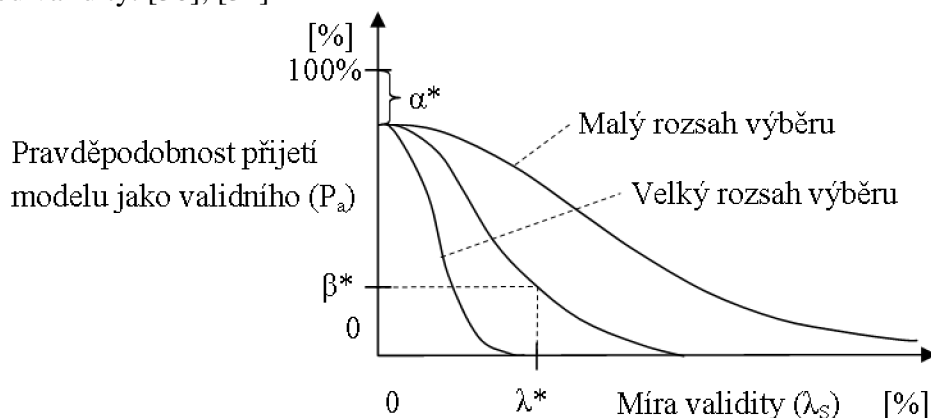
Nejjednodušší případ porovnání výstupů dvou modelů (obecně jakýchkoliv systémů) nastává, je-li porovnávaný výstup jednorozměrný, resp. jedná-li se o vzájemně nezávislé veličiny. V případě provedení K_O pozorování, v rámci kterých bude pozorována řada nezávislých hodnot, získáme hodnoty Z_{ij} pro systémový výstup (výstup detailního modelu) a W_{ij} pro výstup (meta)modelu, kde $i = \{1, \dots, n\}$ jsou pozorované veličiny a $j = \{1, \dots, K_O\}$ jsou jednotlivá pozorování (např. provedená v K_O různých dnech). Byla-li pozorování homogenní, budou mít rozdíly $d_{ij} = Z_{ij} - W_{ij}$ identické rozdělení. Pokud navíc probíhala pozorování v časově oddělených intervalech (např. různých dnech), jsou hodnoty d_1, \dots, d_K statisticky vzájemně nezávislé a tvoří tedy náhodný výběr. Pokud jsou navíc hodnoty W_{ij} a Z_{ij} bodové odhady průměru dané veličiny, lze využít centrální limitní věty, podle které mají $d_{ij} \sim N(\mu_d, \sigma_d^2)$. Jde tedy o nezávislé veličiny s identickým rozdělením (i.i.d.²² veličiny). Pak lze pro ověření nulové hypotézy $H_0: \mu_d = 0$ (alternativní hypotéza je $H_1: \mu_d \neq 0$) použít párový (oboustranný) t-test, kde kritickou hodnotu $t_{\alpha/2, k-1}$ ($k - 1$ je počet stupňů volnosti) stačí porovnat se statistikou

$$t_0 = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d / \sqrt{K_O}} \quad (56)$$

kde S_d^2 je odhad rozptylu a \bar{d} je odhad střední hodnoty (viz rovnice (54)). Nulovou hypotézu je třeba zamítnout, pokud $|t_0| > t_{\alpha/2, K-1}$. To znamená, že metamodel vzhledem k dané nezávislé výstupní veličině nevykazuje dostatečnou míru shody s detailním modelem (dostatečnost je dána volbou α). V opačném případě nulovou hypotézu na hladině významnosti α nelze zamítnout. [53]

²² Independent Identically Distributed

Míra shody mezi detailním (originálním) modelem a metamodelem je dána mírou validity λ_S . Ta bývá volena v jistém rozsahu $0 \leq \lambda_S \leq \lambda_S^*$, přičemž platí, že míra shody mezi modely klesá s rostoucí mírou validity. [30], [31]



Obr. 4 Operační charakteristika [30]

V praxi se pro simulace materiálového toku velmi často používají softwary, které jsou založeny na objektově orientované architektuře. [37] uvádí taxonomii verifikačních a validačních technik se zaměřením na objektově orientované simulační modely. Základními skupinami jsou metody konvenční (tj. metody použité i v jiných oblastech simulace), adaptivní (využívají objektovou orientaci) a specifické (použitelné pouze u objektově orientovaných modelů – ty jsou dále děleny na podskupiny jako testování dědičnosti, integrace, stavu apod.).

4.5.2 Provedení simulačních experimentů

Jakmile je k dispozici validovaný simulační model, je možné provádět simulační experimenty. Ty poskytují výsledky – hodnoty výstupních veličin simulačního modelu (nebo metamodelu). Vzhledem k pseudonáhodné povaze (většiny) simulačních modelů jsou výstupní hodnoty jakékoliv sledované veličiny náhodným výběrem této náhodné veličiny a vykazují proto variabilitu. Proto je zapotřebí provádět více replikací (lišících se hodnotami *seed values* pro generátor pseudonáhodných čísel) a následně vyjádřit (alespoň) střední hodnotu a konfidenční interval výstupní veličiny. To je cílem všech statistických technik pro zpracování výstupů simulačních modelů, resp. metamodelů.

Vhodnost použití jednotlivých technik závisí mj. na typu prováděné simulace. Kromě dělení na spojitě a diskrétní simulace (výstupem spojitých simulací jsou veličiny coby spojitě funkce simulačního času a k jejich zpracování je nutný integrální a diferenciální počet, výstupní veličiny diskrétních simulací mají hodnoty „vzorkovány“ v diskrétních časových okamžicích) lze dále rozlišit dva zásadní případy [59]:

- Simulace s ukončením (*terminating simulations*) – simulace běží jen do okamžiku (v rámci simulačního času), kdy nastane předem definovaná událost (např. zaplnění zásobníku, dosažení simulačního času 1 den apod.); odhadovaný výstup závisí pouze na datech, která simulační (meta)model vygeneroval do tohoto okamžiku.
- Simulace bez ukončení (*nonterminating simulations*) – simulace teoreticky pokračuje „donekonečna“, v praxi je simulován velmi dlouhý simulační čas.

Toto dělení ještě zpřesňuje [25] rozlišením třech typů simulace bez ukončení:

- Simulace s ustálenými parametry.
- Simulace s ustálenými cyklickými parametry.
- Simulace s jinými parametry.

Délka simulovaného času má význam vzhledem k přechodové fázi (v cizí literatuře se užívá některý z pojmů *warm-up period*, *transient phase*, *Anlaufphase*, *Einschwingsphase*), jež se vyznačuje vlivem počátečních podmínek na výstupní hodnoty (poskytované modelem v rámci této fáze). Po překonání přechodové fáze se simulační model dostává do ustáleného stavu, což znamená, že pro sekvenci hodnot výstupní veličiny Y platí: řada K_0 pozorování $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_{K_0}\}$ má stejné rozdělení pravděpodobnosti jako řada $\{Y_{h+1}, Y_{h+2}, \dots, Y_{h+K_0}\}$ pro libovolné $h = 1, 2, \dots$ [59].

V případě simulací s ukončením výstupní parametry závisí na počátečních podmínkách. Je proto nutné provést více replikací s různými počátečními podmínkami. Je-li v rámci replikací použito nezávislých proudů náhodných čísel, získáme pro n replikací nezávislé výstupní hodnoty $Y_i, i = 1, \dots, n$, které mají stejné rozdělení pravděpodobnosti. Data jsou tedy i.i.d. a lze vyjádřit např. konfidenční interval [59], [25]:

$$\bar{Y} \pm t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (57)$$

kde s^2 je výběrový rozptyl:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (58)$$

V případě simulací bez ukončení je třeba řešit dva problémy. Prvním je odhad délky přechodové fáze, kdy výstupní data je třeba očistit právě o výstupy příslušné této fázi. To je značná nevýhoda dané metody, protože při každé replikaci model generuje řadu dále nevyužitých dat. To je neefektivní – v rámci každé simulace musí být pokaždé znovu překonána přechodová fáze (aniž by tato poskytovala použitelná výstupní data). Druhá komplikace je autokorelace pozorování, která zkresluje odhad rozptylu střední hodnoty pozorovaných dat. V případě pozitivní autokorelace je odhad rozptylu střední hodnoty zatížen chybou, která způsobí jeho snížení a zkrácení příslušného konfidenčního intervalu. Řešením je provést m simulačních běhů (a v každém opět n replikací), pro které vyjádříme střední hodnotu výstupní veličiny $\bar{Y}_i, i = 1, \dots, n$. Protože střední hodnoty pro jednotlivé běhy jsou i.i.d., lze vyjádřit konfidenční interval z těchto hodnot [59].

Problém určení nutné doby náběhu se tedy týká pouze simulací bez ukončení a simulací stacionárních systémů. Jak bylo poznamenáno výše, doba náběhu se vyznačuje rozdílem simulovaného stavu a reality, který je způsoben nastavením počátečních podmínek, které realitě neodpovídají. Typicky jde o postupné zaplnění simulovaného (výrobního) systému zakázkami (a příchodem pracovníků). Jedna z technik tvorby simulačních modelů, které tento problém eliminují, je vložení zásobníku (zakázek a dalších pohyblivých objektů) do modelu, ve kterém budou příslušné pohyblivé objekty k dispozici již v počátečním okamžiku simulace. Obtížné je však realisticky definovat veškeré počáteční podmínky.

Druhou možností je skutečně pracovat s dobou náběhu. Pro určení její délky se používají statistické i grafické metody. Mezi nejčastější statistické metody patří Schrubenův test, který umožňuje automatické určení délky doby náběhu na základě provedení několika pilotních simulačních běhů. [27]. Tento test byl popsán v [60] a dále zdokonalen v [61]. Je založen na porovnání statistiky s kritickou hodnotou t_S Studentova rozdělení, které určí, zda bylo odstraněno dostatečné množství počátečních dat (spadajících do doby náběhu) pro jejich statistické vyhodnocení. Další statistickou metodou pro vyhodnocení nutné délky doby náběhu je Yücesanův test navržený v [62]. Tento test je založen na středních hodnotách získaných dávkách simulačních běhů (*batch means*).

Pokud jde o stanovení délky simulovaného období tak, aby bylo možno data získaná v rámci simulačních běhů spolehlivě analyzovat, pro praxi bohužel neexistuje jednoznačná směrnice či metoda. Z mnoha doporučení, která bývají aplikována, lze jmenovat [27]:

- Získání stovek dat sledované veličiny (bez bližší specifikace počtu dat a jeho podmíněnosti).
- V rámci simulovaného období musí nastat všechny relevantní události několikrát; v případě potřeby je nutné nastavit simulační (meta)model tak, aby toto nastavení odpovídalo různým testovaným scénářům (např. normální provoz, maximální zátěž apod.).
- V rámci simulovaného období musí být zahrnuty (realizovány) i výjimečné události (výpadky zařízení s vysokou pohotovostí apod.).

Konečně je třeba také stanovit počet replikací realizovaných v rámci jednotlivých simulačních běhů. Pouze obecně lze říci, že malý počet replikací vede k vyššímu rozptylu získaných dat a tím nižší vypovídací hodnotě odpovídajících středních hodnot a dalších statistik. Rovněž neexistuje paušálně platící doporučení ohledně volby mezi více simulačními běhy kratší délky, resp. naopak menším počtem delších simulačních běhů [27].

Zohlednění doby náběhu má nevýhodu v tom, že není plně využito všech dat získaných během simulace, resp. že je nutné realizovat jistou dobu simulace bez sběru dat. Může být přitom dokázáno, že v případě jednoduchého SHO typu je střední kvadratická odchylka minimální [51].

K volbě provedení simulačních experimentů patří neodmyslitelně sestavení plánu experimentů. Cílem je získat s minimem experimentů maximální množství informací o simulovaném systému. Většinou (obzvláště v rámci „what-if“ analýz) je cílem získat odpověď na otázku, jaký vliv má jistý parametr na jisté výstupní veličiny. Nejjednodušším simulačním experimentem je v tom případě jednofaktorová analýza, při které jsou ostatní vstupní parametry zafixovány na jistých hodnotách, a měněn je jen sledovaný parametr. Sofistikovanější je multifaktorová analýza, která však vyžaduje velký počet simulačních běhů. Proto jí někdy předchází tzv. *factor screening*, jehož cílem je vytipovat jen ty faktory, které mají na sledované veličiny významný vliv [27]. Plánováním a vyhodnocováním simulačních experimentů se zabývá směrnice VDI 3633 Blatt 3.

4.5.3 Statistické techniky zpracování výstupů simulačních modelů

V případě provedení simulačních experimentů získáváme sadu výsledků v podobě dat, která lze přiřadit jednotlivým simulačním běhům, resp. jednotlivým replikacím v rámci každého z těchto běhů. Tato data (hodnoty) se vztahují ke sledovaným výstupním veličinám. Další úlohou je obvykle sestavení konfidenčních intervalů a různých statistik pro tato data.

V případě stacionárních simulačních (meta)modelů lze pro konstrukci konfidenčních intervalů použít metodu dávkování (*batching*) zmíněnou již v kapitole 4.5.1. Principem je rozdělení velmi dlouhého simulačního běhu do několika částí/dávek (*batches*), pro které vypočítáme průměrnou výstupní hodnotu \bar{w}_i pro i -tou dávku, kde $i = 1, 2, \dots, m_B$ a kde m_B značí počet dávek. Přestože původní data mohou být autokorelovaná, díky tomuto rozdělení jsou \bar{w}_i a \bar{w}_{i+1} v zásadě nezávislé veličiny. Problémem zůstává určení velikosti dávek (tj. délky jednotlivých částí z celkového simulovaného období). Příliš malé dávky vedou k zachování autokorelace a k podcenění rozptylu výsledných hodnot. Pro testování nezávislosti průměrů dávek je doporučeno použít von Neumannovy statistiky [51]:

$$\frac{\sum_{i=2}^{m_B} (\bar{w}_i - \bar{w}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{m_B} (\bar{w}_i - \bar{w})^2} \sim N(2, 4 \cdot (m_B - 2) / (m_B^2 - 1)) \quad (59)$$

Nevýhodou tohoto testu je nutnost simulovat tak dlouhé období, které lze rozdělit na alespoň $m_B = 100$ dávek. Případ, kdy $m_B < 100$,

může vést k chybě II druhu. Teprve poté, co je ověřena nezávislost průměrů dávek, je možné vyčíslit $(1 - \alpha)$ konfidenční intervaly pomocí t statistiky. [51]

$$\left(\bar{w} - t_{m_B-1}^{\frac{\alpha}{2}} \frac{s_{\bar{w}}}{\sqrt{m_B}}; \bar{w} + t_{m_B-1}^{\frac{\alpha}{2}} \frac{s_{\bar{w}}}{\sqrt{m_B}} \right) \quad (60)$$

kde $s_{\bar{w}}$ je standardní odchylka průměru \bar{w} přes jednotlivé dávky.

Další možností zpracování výsledků simulačních experimentů je použití regenerativní analýzy (*regenerative analysis*²³). Název této analýzy je odvozen od předpokladu, že simulovaný stochastický systém se navrácí (periodicky) do stavu obnovy, tj. stavu, po jehož nastoupení jsou další události nezávislé na předchozích stavech systému. V této analýze mohou být zahrnuta také data spadající do doby náběhu. Principem je rozdělení dat získaných z celého simulovaného období do množin náležejících časově periodám, které jsou ohraničeny stavy obnovy. S pomocí centrální limitní věty lze odvodit asymptotický $(1 - \alpha)$ konfidenční interval pro střední hodnotu sledované veličiny μ_w [51]:

$$\left(\bar{w} - z^{1-\alpha/2} \frac{\hat{\sigma} / \sqrt{m_B}}{\bar{L}}; \bar{w} + z^{1-\alpha/2} \frac{\hat{\sigma} / \sqrt{m_B}}{\bar{L}} \right) \quad (61)$$

kde $\hat{\sigma}$ lze odvodit z definičního vztahu pro $\hat{\sigma}^2$:

$$(\hat{\sigma}^2 = \widehat{var}(y) + \bar{w}^2 \cdot \widehat{var}(L) - 2 \cdot \bar{w} \cdot \widehat{cov}(y, L)) \quad (62)$$

a kde L značí průměrnou délku cyklu:

$$L = \frac{1}{m_B} \sum_{i=1}^{m_B} L_i \quad (63)$$

²³ Též označovaná jako *renewal analysis*

Vztah je založen na transformaci $y - \mu_w L$, přičemž jednotlivé odhady lze získat pomocí vztahů:

$$\widehat{var}(y) = \frac{1}{(m_B - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{m_B} (y_i - \bar{y})^2 \quad (64)$$

$$\widehat{var}(L) = \frac{1}{(m_B - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{m_B} (L_i - \bar{L})^2 \quad (65)$$

$$\widehat{cov}(y, L) = \frac{1}{(m_B - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{m_B} (y_i - \bar{y}) \cdot (L_i - \bar{L}) \quad (66)$$

Dalšími metodami, které lze použít v souvislosti se statistickým vyhodnocením dat získaných provedením simulačních experimentů, je spektrální analýza a metoda standardizovaných časových řad (*standardized time series*) [51].

4.6 METODIKY TVORBY DISKRÉTNÍCH SIMULAČNÍCH MODELŮ POUŽÍVANÉ V PRAXI

Protože tvorba diskrétních simulačních modelů je velmi rozsáhlá problematika a v praxi se jí věnuje celá řada profesionálních firem a specializovaných pracovišť průmyslových podniků, byly vytvořeny směrnice, doporučení či specifikace popisující nejen samotnou metodiku tvorby simulačních modelů, ale také veškeré související procesy a postupy v rámci celého projektu, jehož součástí je právě tvorba simulačního modelu, provedení simulačních experimentů a zhodnocení jejich výsledků. Autory těchto směrnic, manuálů a doporučení jsou nejen sami tvůrci příslušných simulačních softwarových nástrojů nebo jejich nadstaveb (knihoven prvků), ale také firmy, které tyto simulační softwary využívají a které se často také na jejich vývoji podílejí, nebo vytváří samostatné nadstavby, které jsou pak jejich firemním know-how.

Konkrétními požadavky kladenými na simulační projekty a modely, resp. doporučeními pro jejich realizaci jsou zpracování dokumentace obsahující specifikaci jednotlivých úloh, které mají být v rámci studie provedeny, dále definice systémových hranic, které vymezují analyzovaný (a následně simulovaný a testovaný) systém, ale také určení způsobu využití, resp. opakovaného následného využívání simulačního modelu, který má být vytvořen, a v neposlední řadě také kritéria pro převzetí simulačního modelu (není-li tento vytvořen příslušným interním pracovištěm firmy, která simulační studii sama zadává a ve které dané interní pracoviště odpovídá za správu a event. další využití vytvořených simulačních modelů; zde jde tedy zejména o případ zpracování simulačního projektu na zakázku, kdy je třeba stanovit technické požadavky, požadavky na funkcionalitu modelu a samozřejmě požadavky stran zpracování simulačních experimentů, jejich výsledků a obecně dosažení cílů projektu). [27]

Jedním z nejrozšířenějších simulačních softwarů je Plant Simulation, který je vyvíjen společností Siemens PLM Software. Tato společnost stále vyvíjí nové prvky („stavební kameny“ – *Bausteine/Elements*), pomocí kterých je možno efektivně vytvářet modely technologických zařízení (jako např. portálový jeřáb, závěsná dopravníková dráha a mnohé další). Efektivita spočívá v nutnosti pouhé parametrizace těchto prvků, není již nutné vytvářet detailní model.

Dalším významným subjektem zabývajícím se vývojem vlastní knihovny prvků pro software Plant Simulation je Pracovní skupina diskretní simulace (*Arbeitsgruppe Ablaufsimulation*) spolku Verband der Automobilindustrie (VDA). Příslušná knihovna prvků se nazývá *VDA Bausteinkasten* a na jejím vývoji se podílí firmy jako např. Audi, BMW, Daimler, VW, iSILOG a další [63], [64], [65].

Příkladem aplikace, která není rozšířena v příliš početné zájmové komunitě, nýbrž je využívána jakožto vlastní know-how, je např. aplikace APP (Analyser of Production Processes) vyvinutá v rámci grantu Interní grantové agentury Škoda Auto (IGA) [11]. Analogickým příkladem je stavební prvek *iSI_Experiments* vyvinutý firmou *iSILOG GmbH* pro realizaci simulačních experimentů (včetně možnosti provedení distribuované simulace a interakce s dalšími programy použité výpočetní techniky) a pro jejich statistické vyhodnocení [66] a další stavební prvky (*iSI_Chart*, *iSI_Stat*, atd.).

5 NAVRHOVANÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ

V mnoha případech z praxe, kde je využívána diskrétní simulace výrobních, dopravních (manipulačních), resp. obecně logistických procesů (uvažované pojetí předmětu simulace závisí na zvolené rozlišovací úrovni řešeného systému a na stanovených systémových hranicích) nastává v průběhu řešení simulačního projektu řada problémů, které mohou významně ovlivnit celkový výsledek projektu. V této části práce je pozornost věnována zejména těm problémům, které souvisí se samotnou realizací simulační studie, pouze okrajově je brán zřetel na související ekonomické, personální, příp. legislativní podmínky (limity), za kterých musí být tato studie provedena a které (zejména v případě plánování nových systémů) musí být při návrhu a posuzování jednotlivých řešení zohledněny.

Jednotlivé situace, při kterých vzniká požadavek na zpracování simulační studie (tj. mimo další úkoly zejména na vytvoření samotného simulačního modelu), je účelné pro další návrh přístupu pro vytvoření tohoto modelu (nebo generování simulačního metamodelu) rozlišit podle toho, o jaký typ zadání se jedná. V zásadě lze rozlišit tři situace (charaktery zadání):

- Virtuální zprovoznění instalovaného výrobního systému.
- Plánování nového logistického (výrobního) systému.
- Provedení zásahů do stávajícího logistického (výrobního) systému.

Pro úplnost zde uváděné **virtuální zprovoznění** výrobního (nebo také manipulačního) systému pomocí simulačního modelu je relativně moderní přístup umožňující testování a optimalizaci mechatronických systémů, které jsou činnou součástí systému řízení výrobních (manipulačních) zařízení, resp. výrobního systému jako celku. [67] Výhodou virtuálního zprovoznění je zkrácení doby nutné pro uvedení systému do provozu, možnost provádět testování systému v příznivějším prostředí (než je reálné prostředí budoucího skutečného provozu) a také možnost využít virtuální model pro zaškolení obsluhy (pracovníků), dále paralelizace vývoje mechanických částí systému a řídicího softwaru a v neposlední řadě také souběžné programování a ladění kódu pro vyvíjený řídicí systém. [68] Pro účely virtuálního zprovoznění je třeba vytvořit velmi detailní simulační model daného systému (výrobního, manipulačního). Jedná se zpravidla o simulační model materiálového toku, který musí zajišťovat synchronizaci běhu simulárního času (v rámci modelu) a reálného času, podporovat různá komunikační rozhraní (např. OPC) a samozřejmě mít implementovanou logiku řízení fyzického řídicího systému (PLC), který má být testován. [69], [70] Z těchto důvodů musí být simulační model materiálového toku velmi detailní, musí zpravidla zohledňovat každý prvek mechatronického systému. Jeho náhrada zjednodušeným metamodelem je tedy neúčelná, a proto nejsou tyto simulační modely předmětem zájmu navrhované metodiky.

V případě **plánování nového logistického (výrobního či dopravního) systému** na začátku (v okamžiku zadání simulační studie) ještě neexistuje žádný simulační (často ani koncepční) model plánovaného stavu. Z komplexního pohledu, tj. z pohledu životního cyklu výrobku (který je předmětem materiálového toku v daném systému – tj. pasivním logistickým prvkem příslušného logistického řetězce, který je možné v daném systému definovat), je vhodným přístupem při zpracování simulační studie tzv. *Metodika postupně se zpřesňujících modelů*. Jde o koncept, který integruje počítačovou simulaci do procesu (projektu) plánování nového výrobního (logistického) systému s důrazem na využití simulace již v rané fázi řešení projektu, kdy je jako jeden z prvních

bodů řešen materiálový tok (jeho trajektorie i intenzita, logika řízení apod.). Principem *Metodiky postupně se zpřesňujících modelů* je scénář, podle kterého je tvorba simulačního modelu rozdělena do třech stupňů (stupeň 1 – simulační model sloužící pro účely návrhu více variant prostorového uspořádání jednotlivých prvků řešeného systému, resp. více uvažovaných alternativ logiky řízení, možných scénářů daných výrobním programem atd., stupeň 2 – simulační model zohledňující zvýšenou rozlišovací úroveň, tj. zachycující veškeré prvky řešeného systému jako jsou jednotlivé výrobní stroje, manipulační prostředky atd., stupeň 3 – simulační model vycházející většinou z modelu zachycujícího preferovanou alternativu řešenou již rámcově v prvním kroku, který umožňuje zachycení a případnou změnu všech důležitých technických parametrů, jako např. trvání výrobních procesů, rychlosti manipulačních pohybů dopravních a manipulačních zařízení atd.). [8]

V případě zvažování **změn ve stávajícím výrobním (logistickém) systému**, které mohou být motivovány např. snahou zvýšit dosahovanou produkci (výrobků), snížit mezioperační zásoby či jiným technickoekonomickým záměrem, je ve většině případů možné v rámci připravované simulační studie vyjít z již existujícího simulačního modelu. Může nastat případ, kdy simulační model daného systému ještě neexistuje. To je možné tehdy, pokud nebyla aplikována *Metodika postupně se zpřesňujících modelů* ani jiný přístup vyžadující ověření navrhovaného systému pomocí simulační studie. Případně simulační model daného systému existuje, avšak není aktuální. To je možné tehdy, pokud byla v minulosti provedena jedna nebo několik dílčích změn v systému, aniž by tato změna (tyto změny) byla před jejich realizací ověřována pomocí simulace, a tudíž není tato změna (změny) v simulačním modelu zohledněna. V takových případech (neexistence nebo neaktuálnosti simulačního modelu) je nutné nejprve simulační model daného systému vytvořit, resp. aktualizovat. Je přitom nutné vytvořit, resp. aktualizovat simulační model celého sledovaného systému, přestože zvažovaná změna se může týkat jen jeho relativně malé části (několika prvků) – např. prodloužení dílčího úseku dopravníkové dráhy v rámci celého dopravníkového okruhu montážní haly, úprava prostorového uspořádání vybraných pracovišť v rámci zóny příjmu/expedice skladu apod. Vytvoření simulačního modelu celého sledovaného systému je nutné, neboť změny v jeho dílčí části mohou mít vliv na celkové chování systému. Tento vliv by při užším vymezení systémových hranic nemusel být vůbec odhalen. Jedině pomocí celistvého simulačního modelu zahrnujícího veškeré (podstatné) prvky systému lze postihnout případné interakce mezi upravovanou částí a zbytkem systému, které mohou mít významný dopad na sledované charakteristiky (obvykle charakteristiky materiálového toku, o kterých bylo pojednáno v části 4.1.2). Dalším důvodem, proč je nutné pracovat se simulačním modelem celého systému, nikoliv jeho částí, je skutečnost, že cílem zvažované změny, která má být v dané části systému realizována, je (nebo by přinejmenším mělo být) dosažení globálního (nikoli lokálního) optima. To souvisí se systémovým pojetím zdůrazňovaným zejména v teorii logistiky a logistických řetězců, kdy je vždy třeba sledovat celkový efekt, nikoliv dílčí ukazatele (konkrétně to může znamenat například stanovení jako cílové funkce průměrné/minimální dosažené denní produkce v celém výrobním systému namísto průměrné/minimální denní průchodnosti sledovaného úseku systému, nebo např. vytížení všech výrobních kapacit, nejen omezeného počtu sledovaných výrobních zdrojů).

Z pohledu projektového řízení však vyžaduje tvorba nebo aktualizace simulačního modelu vyčlenění časových i personálních (finančních) kapacit. Právě v případě úloh, kdy je cílem simulační studie ověření dopadů zvažovaných úprav v relativně malé oblasti výrobního

(logistického) systému, může být tvorba či aktualizace simulačního modelu rozsáhlého systému vnímána negativně z důvodu vyžadovaných časových/personálních kapacit. Možnosti, jak zkrátit proces tvorby/aktualizace (detailního) komplexního simulačního modelu (který je, jak bylo naznačeno výše, často zapotřebí pro ověření zvažovaných změn pouze úzce vymezené části celého systému), jsou následující:

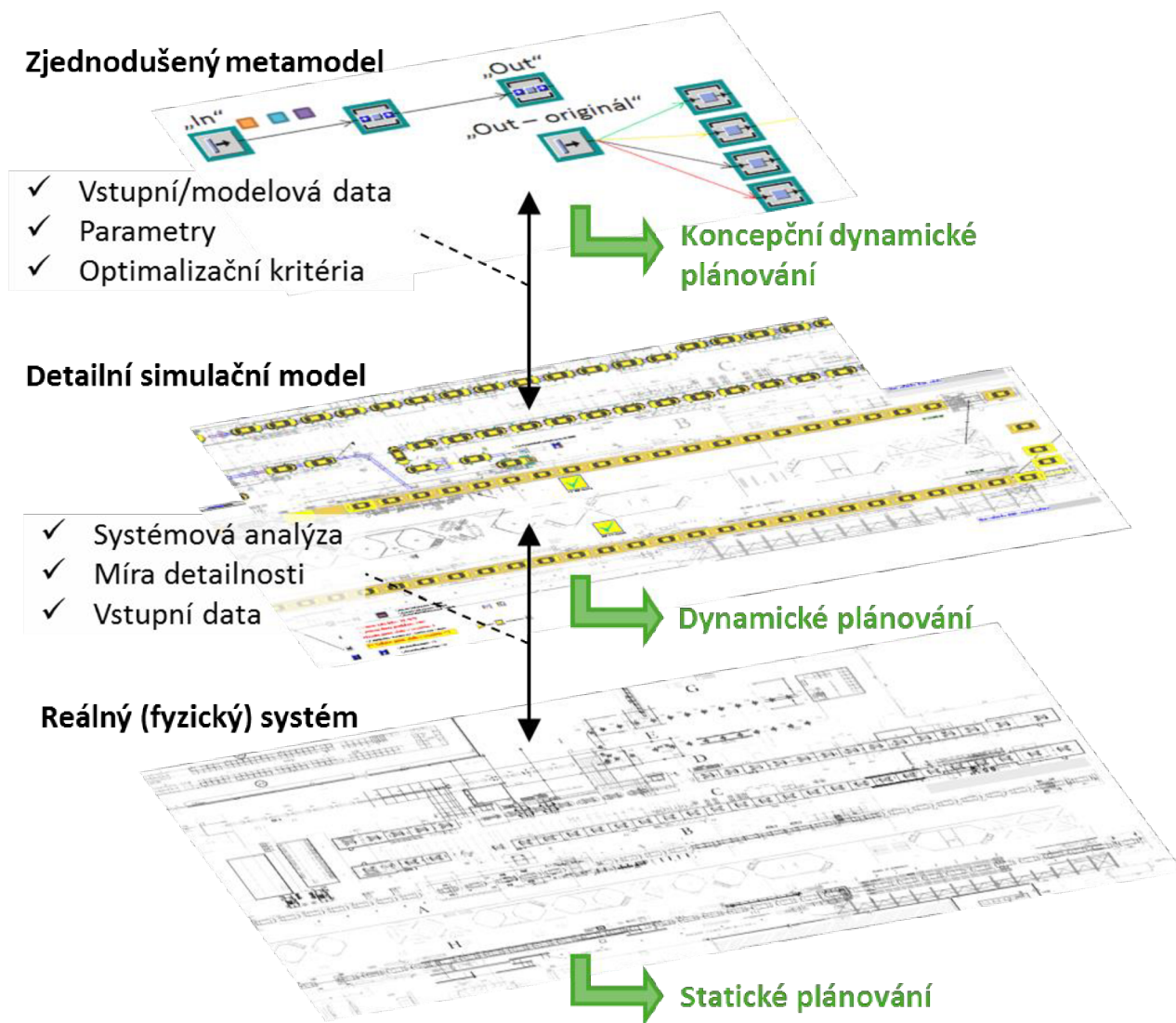
- Použití (vytvoření/aktualizace) simulačního modelu zachycujícího pouze vymezenou část systému, ve které má být zvažovaná úprava realizována.
- Použití (vytvoření/parametrizace) simulačního metamodelu nahrazujícího komplexní simulační model celého systému, v jehož části má být zvažovaná úprava realizována.

Oba přístupy mají své výhody i nevýhody. Výhodou použití modelu zachycujícího pouze vymezenou část celého systému je rychlejší vytvoření simulačního modelu a tím také celé simulační studie (tedy nižší nároky na časové a finanční/personální zdroje). Nevýhodou je nebezpečí, že některé podstatné interakce mezi měněnou částí systému a systémem jako celkem nebudou zachyceny a v rámci řešení projektu uvažovány. To může vést k zamítnutí realizace změn (na základě doporučení vydaným vzhledem k výsledkům simulačních experimentů), které by však ve skutečnosti měly pozitivní dopad na chování celého systému (sledované charakteristiky). Opačný možný případ je ten, kdy v důsledku zanedbání (nezohlednění) některých vlivů nebudou přínosy změny po její realizaci odpovídat predikci vytvořené na základě výsledků simulačních experimentů.

Právě použití simulačního metamodelu je podstatou přístupu navrhovaného v této práci. Jak bylo naznačeno výše, jeho využití je předpokládáno v oblasti plánování (úprav stávajícího nebo nového) logistického/výrobního systému. Při rozlišení úrovní tohoto plánování z hlediska detailnosti a zohlednění dynamických vlivů (daných mj. proměnnými charakteristikami materiálového toku) lze uvažovat tři subjekty a k nim příslušné plánovací úrovně:

- **Statické plánování** – s využitím (návrhu) reálného (fyzického) systému; např. stavebnětechnické propočty a návrhy (generely, výkresy, ...),
- **Dynamické plánování** – s využitím detailního simulačního modelu; např. simulace vlivu změny výrobního programu na vytížení pracovišť výrobní linky,
- **Koncepční dynamické plánování** – s využitím (zjednodušeného) simulačního metamodelu; např. posouzení dopadu rozdílu směnových režimů sousedících výrobních oblastí na dynamiku mezioperačních zásob.

Obr. 5 znázorňuje toto rozlišení úrovní plánování (a modelů). Na Obr. 5 je naznačeno, že k vytvoření detailního simulačního modelu je třeba vycházet z reálného systému (příp. jeho návrhu) a dle zvolené míry detailnosti využít v rámci systémové analýzy a následující tvorby modelu potřebná (vstupní) data. Dále při tvorbě (využití) simulačního metamodelu je třeba s ohledem na vstupní data nastavit parametry a příp. okrajové podmínky metamodelu a stanovit optimalizační kritéria pro nalezení nejlepší možné konfigurace metamodelu vzhledem k účelu jeho využití.

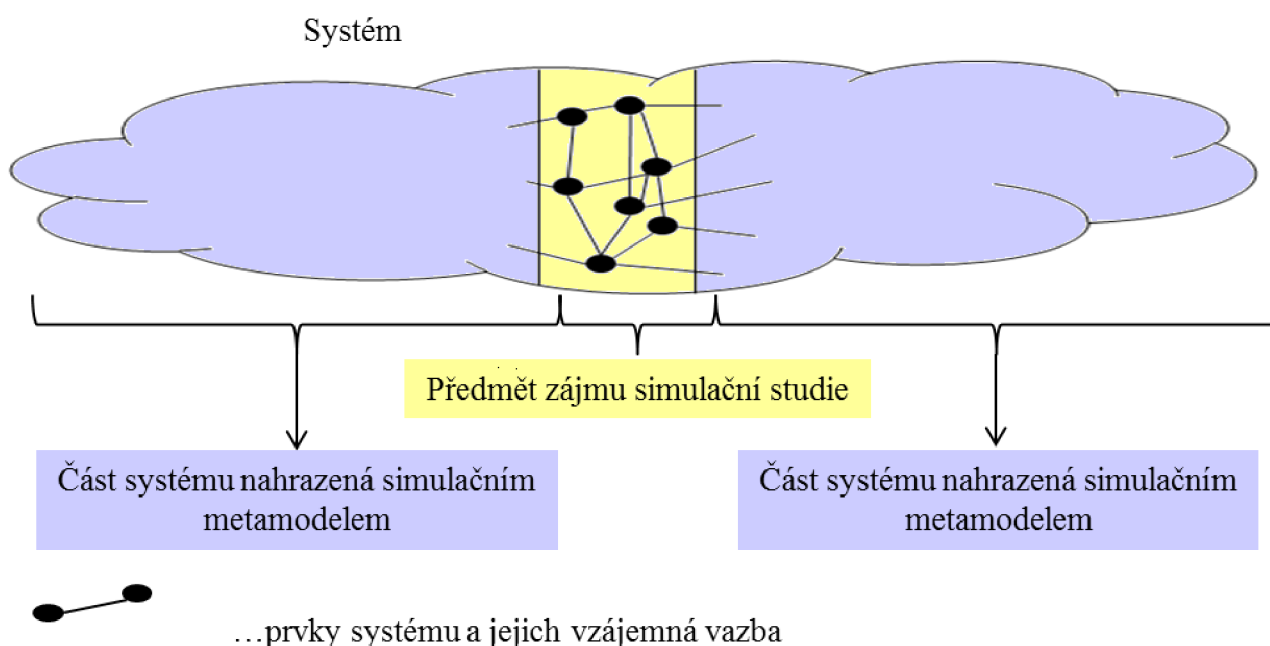


Obr. 5 Úrovně plánování a jim příslušné systémy/simulační modely (zdroj: autor)

Principem zde navrhovaného přístupu je použití zjednodušeného metamodelu, který umožní (s ohledem na zadání konkrétního simulačního projektu) analyzovat příslušný materiálový tok (probíhající v řešeném systému, resp. obecně také v jiném – detailním – simulačním modelu). Použitím simulačního metamodelu je myšleno vytvoření takového simulačního modelu, který bude reprezentovat celý výrobní (logistický) systém, resp. jeho (rozsáhlou) část, avšak nebude detailně zachycovat veškeré jeho prvky. Tedy z pohledu struktury simulačního metamodelu nebude možné v něm identifikovat jednotlivé prvky s tím, že by bylo možné je jednoznačně přiřadit (jakožto zjednodušující obraz – model) konkrétním prvkům modelovaného (výrobního/logistického) systému (nebo detailního simulačního modelu, který obecně může být rovněž předlohou pro vytvářený simulační metamodel). Očekávanou výhodou metamodelu je zrychlení realizace simulačního modelu (díky redukci času potřebného k vytvoření detailního simulačního modelu). Další výhodou je principiálně možná opakovatelnost využití takového metamodelu pro řešení úloh týkajících se různých výrobních (logistických) systémů, kde namísto vytváření simulačního modelu konkrétního systému postačí provést „pouze“ parametrizaci simulačního metamodelu.

5.1 SIMULAČNÍ METAMODEL JAKO GENERÁTOR MATERIÁLOVÉHO TOKU

Jak bylo uvedeno v závěru předchozí části, simulační metamodel lze využít jako náhradu detailního simulačního modelu s tím, že předmětem zájmu (simulační studie) je jen vymezená (relativně malá) část výrobního, dopravního, nebo logistického systému. Celý systém je až na onu (malou) část, která je předmětem zájmu simulační studie, metamodelem nahrazen. Přitom právě ta část celého systému, která je předmětem simulační studie (typicky z důvodu návrhu určité změny, která se dotýká její struktury či parametrů), může být reprezentována detailním simulačním modelem, zatímco zbytek systému je zachycen (ve smyslu podstatného chování) simulačním metamodelem. Tento koncept blíže vysvětluje následující schématické znázornění.



Obr. 6 Princip náhrady části systému metamodelem (zdroj: autor)

Celý systém lze vymežit od okolí systémovými hranicemi. Samotný systém je tvořen prvky, mezi kterými existují vzájemné vazby. Jedná se o informační vazby, kdy informace (např. elektrické signály) jsou vysílány oběma nebo jedním směrem, a dále o fyzický (materiálový) tok, který opět obecně může směřovat oběma směry. Ve schématu proto nejsou směry toku informací ani materiálu pro větší obecnost znázorněny.

V rámci systému existuje oblast, která je předmětem simulační studie (typicky proto, že je zvažována implementace určitých zásahů do této oblasti). Jak je naznačeno pomocí vazeb, změna v této oblasti může (ale obecně nemusí) mít dopad na chování celého systému (a tudíž na hodnoty sledovaných/výstupních charakteristik systému – obvykle charakteristik materiálového toku). Proto je potřeba v rámci simulační studie zohlednit chování systému jako celku. Ta část systému, ve které nejsou zásahy zvažovány (zůstává fixní), může být nahrazena simulačním metamodelem. I zde je třeba zohlednit chování této části systému, aby metamodel tomuto chování odpovídal. Je tedy třeba provést verifikaci simulačního metamodelu. Tato verifikace bude spočívat v porovnání hodnot významných charakteristik materiálového toku vykazovaných reálným systémem (podmínkou je dostupnost dat o materiálovém toku, bez kterých není možné ani vytvořit, resp.

provést parametrizaci metamodelu) a simulačním metamodelem. Samotný metamodel může vzniknout těmito procesy:

- Na základě existujícího simulačního modelu (jeho přípustným zjednodušením).
- Na základě systémové analýzy reálného systému, resp. materiálového toku (jeho charakteristik) v reálném systému.
- Na základě (uživatelsky zadaných) požadavků na chování metamodelu, resp. na dosažené hodnoty zadaných charakteristik materiálového toku.

Jak je vidět, klíčové je dosažení shody mezi chováním existujícího simulačního modelu, resp. reálného systému a vytvářeného/parametrizovaného metamodelu. Pojem *chování systému* je zde užít pro obecnost; v případě systémů, kde dochází k manipulaci s materiálem (výrobní či logistické systémy), bude toto chování reprezentováno dosaženými hodnotami sledovaných charakteristik materiálového toku (ty byly vyjmenovány v kapitole 4.1.2).

Na simulační metamodel lze v tomto případě pohlížet jako na *Generátor materiálového toku*. V tomto metamodelu totiž bude generován materiálový tok požadovaných hodnot charakteristik, které vyplývají z dosažených hodnot charakteristik materiálového toku ve (vzorovém) detailním simulačním modelu, reálném systému, nebo z definovaných požadavků na chování metamodelu. *Generátor materiálového toku* tedy nahrazuje materiálový tok v reálném systému, resp. detailním simulačním modelu, kde příslušný proces trvá mnohonásobně delší čas (ve výrobním systému je to dáno technologickým principem sledovaných procesů, které lze v simulačním modelu pomocí počítače zachytit zrychleně – faktor zrychlení závisí kromě dalšího na parametrech použité výpočetní techniky a simulačním SW, v simulačním modelu – v porovnání s metamodelem – složitější/detailnější strukturou a tím také vyšší výpočtovou náročností).

V následujících podkapitolách jsou postupně prezentovány alternativní metodiky generování, resp. rekonstrukce materiálového toku podle toho, jakým procesem simulační metamodel vzniká. Část 5.1.1 se zabývá metodikou, kdy vstupní data (záznamy materiálového toku nebo přímo vyhodnocené charakteristiky) jsou získána (v elektronické podobě ve formě datového souboru určitého formátu) ze záznamů materiálového toku v reálném systému, nebo (detailním) simulačním modelu. Část 5.1.2 následně představuje metodiku, kdy jsou cílové hodnoty charakteristik materiálového toku (a další výstupní ukazatele) zadávány uživatelsky v rámci parametrizace navrženého simulačního metamodelu.

5.1.1 Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů

Zde popisovaná metodika rekonstrukce logistických procesů je ověřena pomocí simulačního metamodelu schopného nahradit chování (obecného, tedy případně i blíže neanalyzovaného) logistického systému, případně jiného (detailního) simulačního modelu. Vytvořený metamodel umožňuje analyzovat vstupní data, kterými jsou záznamy o průchodu elementů materiálového toku určitým evidenčním bodem (EB), a na základě vyhodnocených charakteristik tento materiálový tok zpětně rekonstruovat.

Princip vyhodnocení charakteristik spočívá v algoritmicke analyze záznamů průchodů příslušných jednomu EB z hlediska data a času průchodu. Datum a čas, kdy materiálový tok probíhal (a byl tedy zaznamenán), je v reálném systému determinován směnovým režimem, tedy

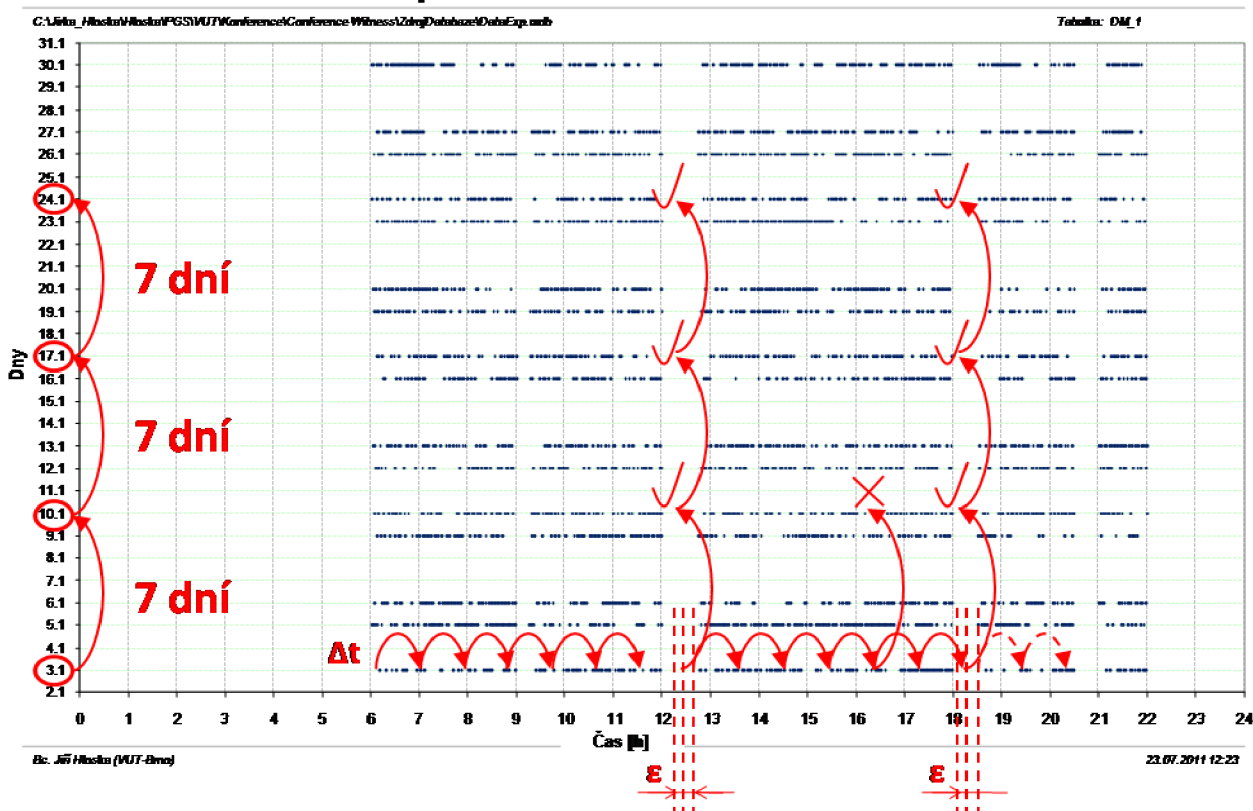
vymezením dní (datum) a intervalů (čas), ve kterých daný (logistický) proces (a tím i materiálový tok) probíhá, resp. ve kterých je naopak přerušen. Cílem analýzy logistického procesu je identifikace časového rozsahu směn a směnových přestávek v rámci pracovních dní tak, aby mohl být následovně (v dalším kroku) rekonstruován materiálový tok řídicí se tímto směnovým režimem. Algoritmus je založen na předpokladu, že časy záznamů průchodů vykazují jistou periodicitu danou taktem materiálového toku (resp. výrobních technologií, přes které materiál plyne)²⁴. Metamodel je tedy možné využít pro analýzu materiálového toku, který tuto periodicitu vyazuje (s jistým přípustným rozptylem daným například technickými prostoji způsobujícími dočasné zastavení/přerušování materiálového toku). Další podmínkou je, že systém (nebo simulační model), ve kterém materiálový tok původně probíhal, byl řízen směnovým režimem s pravidelnými směnovými přestávkami (a případně pravidelnými časovými prodlevami mezi po sobě následujícími směnami). Tato pravidelnost musí být dodržena po celé období, ze kterého data o záznamech materiálového toku pocházejí. V případě, že data časově překrývají více period lišících se směnovým režimem, je nutné před analýzou tato data rozdělit na jednotlivé části zvlášť pro každou periodu (směnový režim).

Algoritmus určení časového vymezení směn a směnových přestávek byl poprvé prezentován v [71]. Spočívá v cyklickém procházení data a času zaznamenaných průchodů od prvního záznamu dále se zvoleným krokem Δt s cílem nalezení časového vymezení (od – do včetně dnů/data platnosti) směn, tedy období, kdy probíhal materiálový tok (a existují záznamy o průchodu jeho elementů daným EB), resp. období, kdy materiálový tok byl přerušen (kdy záznamy o průchodu elementů materiálového toku daným EB v tomto období chybí). Tento krok je volen uživatelsky a jeho hodnota by měla být nejvýše rovna očekávanému taktu rekonstruovaného logistického procesu. V každém kroku je ověřena existence (dalšího) záznamu průchodu, tedy záznamu pořízeného v čase $t_0 + n \cdot \Delta t$, kde t_0 je čas (a datum) prvního záznamu průchodu daným EB a n je číslo kroku. V případě absence záznamu je ověřeno, zda existuje okolí ε aktuálního časového bodu, tedy interval $(t_0 + n \cdot \Delta t - \varepsilon; t_0 + n \cdot \Delta t + \varepsilon)$, ve kterém neexistují žádné záznamy průchodu daným EB – a to ve všechny dny (data), ze kterých analyzované záznamy pocházejí. Jinými slovy musí platit pro $P = d_p \cdot 86400$ [s], kde $d_p \in \mathbb{N}$ je pořadové číslo dne v rámci týdenní periody, tedy $d_p = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, že v intervalech $(P \cdot (t_0 + n \cdot \Delta t) - \varepsilon; P \cdot (t_0 + n \cdot \Delta t) + \varepsilon)$ neexistují žádné záznamy, neboli neexistuje žádný záznam v datum a čas spadající do výše uvedeného intervalu. Tento algoritmus je schematicky popsán na Obr. 7. Na vodorovné ose je vyneseno čas [h] v rozsahu 0 až 24 hod (denní čas), na svislé ose je datum. Záznam o průchodu elementu materiálového toku daným EB je v grafu vyznačen bodem, jehož souřadnice odpovídají času a datu průchodu. V příslušném logistickém systému může nastat (náhodný) prostož způsobující zastavení materiálového toku. To se v analyzovaných záznamech projeví jako absence záznamu v intervalu $(t_0 + n \cdot \Delta t - \varepsilon; t_0 + n \cdot \Delta t + \varepsilon)$. V případě identifikace takové absence je však dále ověřováno, že se ve stejné dny týdnu (v následujících obdobích) stejná absence záznamů v intervalu $(t_0 + n \cdot \Delta t - \varepsilon; t_0 + n \cdot \Delta t + \varepsilon)$ opět vyskytuje. Pokud se vyskytuje v těchto dnech v rámci celého vyhodnocovaného období, je tento interval vyhodnocen jako směnová přestávka, resp. prodleva mezi následujícími směnami.

²⁴ Popisovaný princip je založen na předpokladu 100% spolehlivosti provedení záznamů elementů materiálového toku na daném EB. Neúplnost analyzovaných dat způsobená poruchou záznamového zařízení (nebo chybou ruční obsluhy provádějící záznamy ručně) může způsobit odchylky výsledků analýzy dat od skutečného provozního režimu.

V opačném případě, tedy je-li nalezen alespoň jeden (stejný) den v rámci celého vyhodnocovaného období, ve kterém v příslušném časovém intervalu existuje alespoň jeden záznam průchodu materiálu daným EB, je absence považována za důsledek (náhodného) prostoje a daný interval není vyhodnocen jako směnová přestávka, resp. prodleva mezi následujícími směnami.

Přehled průchodů evidenčním bodem >> In <<

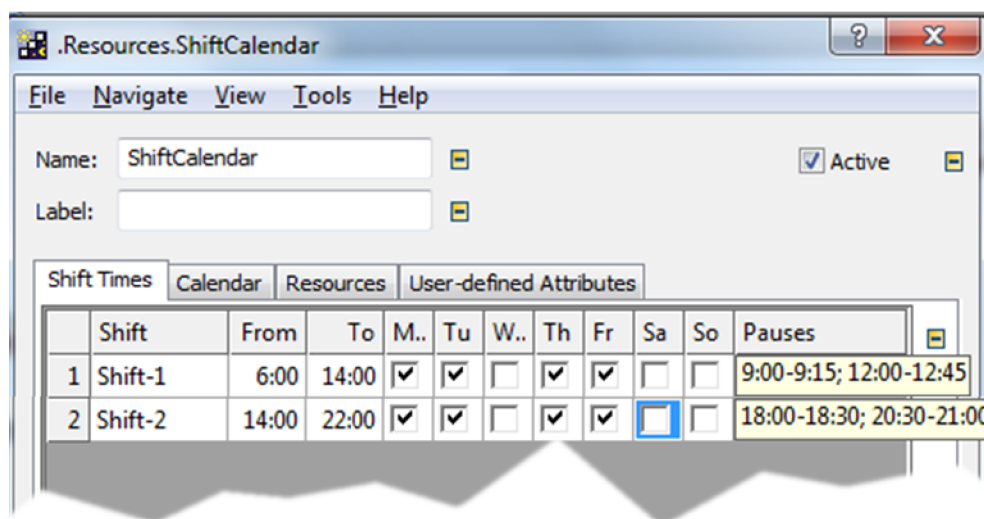


Obr. 7 Algoritmus určení časového vymezení směnových přestávek a směn [71]

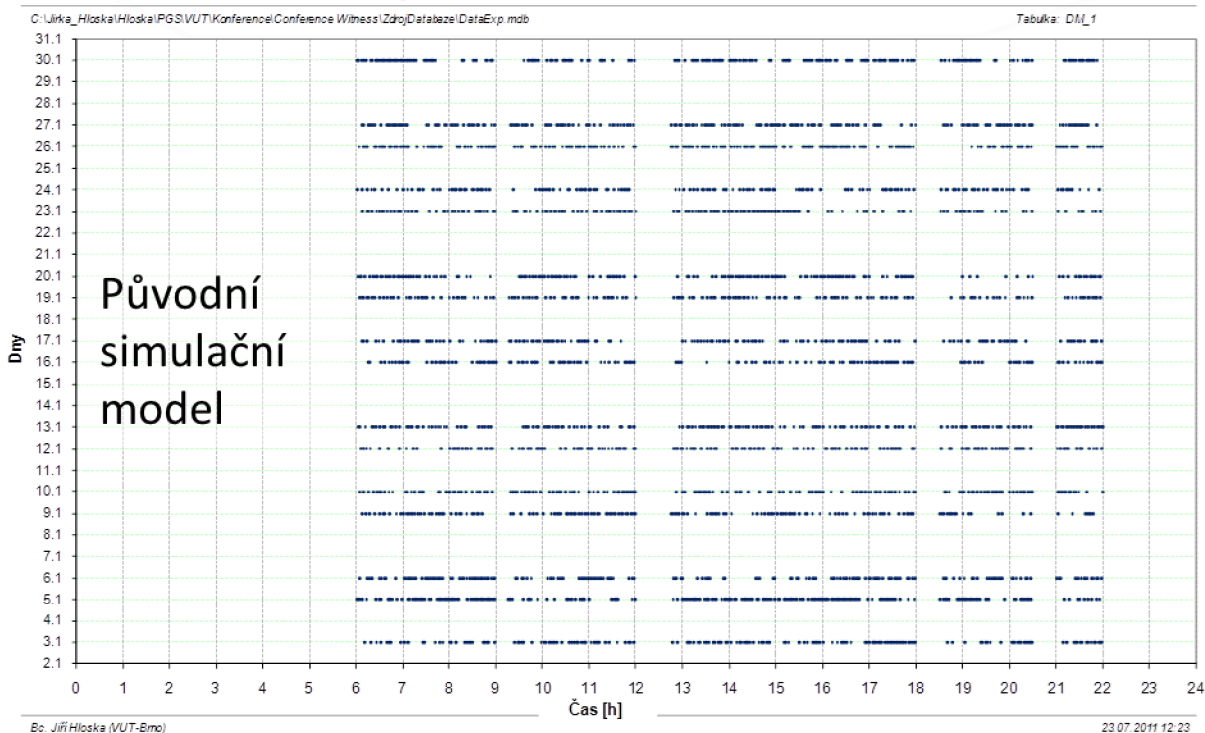
Další funkcí navrženého metamodelu je reprodukce analyzovaných průchodů, tj. rekonstrukce materiálového toku. Na základě zjištěných časových vymezení směn a směnových přestávek je možné spustit simulační běh, ve kterém je materiálový tok z časového hlediska řízen (iniciován a pozdržen) na základě zjištěných vymezení směn a směnových přestávek. Před spuštěním simulace rekonstruující zaznamenaný a analyzovaný materiálový tok je nutné zvolit způsob zohlednění nalezených směnových přestávek – uvažovány jsou následující alternativy:

- Směnové přestávky mají obecně různé časové vymezení pro jednotlivé pracovní dny (pracovní den = den v týdnu, resp. datum, ve kterém byly zaznamenány průchody elementu materiálového toku daným EB). V tomto případě odpovídají nalezené směnové přestávky, tedy časové intervaly, ve kterých neexistuje záznam o průchodu EB, přesně výsledkům výše popsaného *Algoritmu určení časového vymezení směn*.
- Směnové přestávky mají shodné časové vymezení pro všechny pracovní dny. V tomto případě odpovídají nalezené směnové přestávky, tedy časové intervaly, ve kterých neexistuje záznam o průchodu EB, výsledkům *Algoritmu určení časového vymezení směn*, který kontroluje absenci záznamů v okolí ϵ s periodou 1 den (nikoliv 7 dní, jak je naznačeno na Obr. 7).

Na Obr. 8 je uveden příklad vyhodnocovaných časových záznamů (zdrojem byl textový soubor převedený do tabulky v MS Access s názvem „DM_1“, jak je uvedeno v záhlaví grafu „Přehled průchodů evidenčním bodem >> In <<“) znázorněných formou přehledu průchodů analyzovaným evidenčním bodem. Vyhodnocované záznamy pocházely z (detailního) simulačního modelu, ve kterém byl nastaven v oblasti sledovaného materiálového toku směnový režim s parametry zřejmými z dialogového okna příslušného prvku, který v použitém SW Plant Simulation funkci směnového režimu obsluhuje (viz horní část Obr. 8).



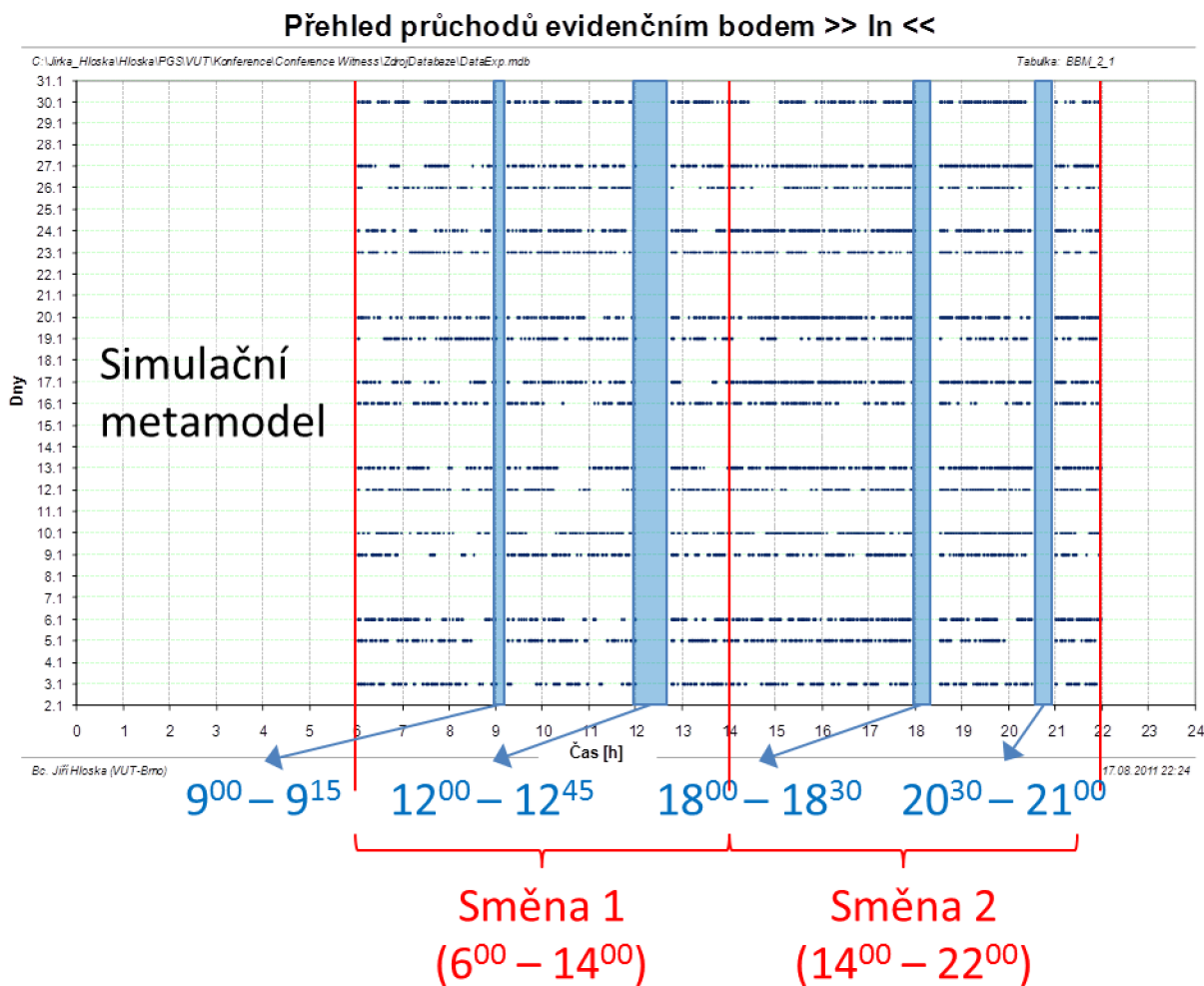
Přehled průchodů evidenčním bodem >> In <<



Obr. 8 Směnový režim a záznamy původního materiálového toku (zdroj: autor)

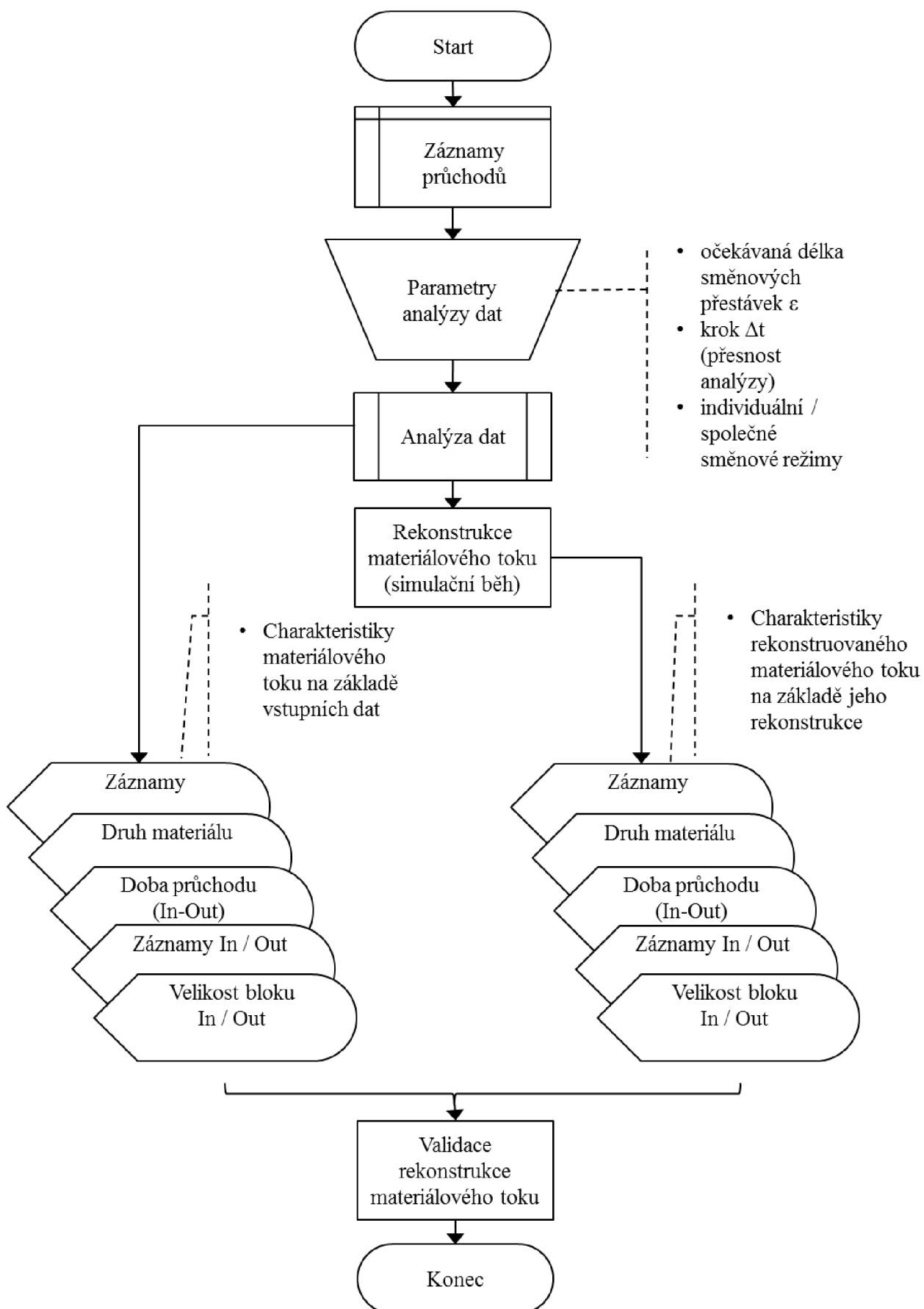
Pořízená data (záznamy průchodů) byla pomocí metamodelu vyhodnocena a reprodukována. Záznamy reprodukováného materiálového toku byly uloženy do tabulky v MS Access s názvem „BBM_2_1“, jak je uvedeno v záhlaví grafu na Obr. 9, který vznikl analýzou těchto dat pomocí

nástroje APP. Zde je také vyznačeno dodržení nalezených směnových přestávek a časového vymezení směn při rekonstrukci materiálového toku.



Obr. 9 Přehled průchodů rekonstruovaného materiálového toku (zdroj: autor)

Z pohledu obsluhy metamodelu uživatelem znázorňuje obě hlavní funkce *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci materiálového toku* (analýza dat se záznamy průchodů materiálového toku přes EB a jeho rekonstrukce na základě této analýzy) Obr. 14 formou vývojového diagramu v souladu s příslušnou normou [72].



Obr. 10 Vývojový diagram znázorňující dvě hlavní funkce Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů (zdroj: autor)

Vzhledem k aplikačním možnostem navrženého metamodelu je třeba definovat okrajové podmínky, vstupní data, se kterými metamodel pracuje, a další softwarové nároky:

- Vstupní data (záznamy průchodů EB) jsou uložena v textovém souboru (*.txt) a splňují požadavky na strukturu (uspořádání) – „datum čas; typ materiálu; ID materiálu²⁵; název EB“, tedy datum a čas záznamu průchodu materiálu určitého typu a jeho unikátního identifikačního čísla, a dále označení konkrétního EB, kde byl záznam o průchodu pořízen.
- Simulační metamodel byl vytvořen v SW Plant Simulation (nejnižší nutná verze je 9.0), je ovládán prostřednictvím uživatelského rozhraní (GUI²⁶) vytvořeném přímo v tomto simulačním SW.
- Pomocí navrženého simulačního metamodelu je možné analyzovat záznamy průchodů (materiálového toku) libovolným EB, které vykazují v celém vyhodnocovaném období stejné časové vymezení směnových přestávek a pracovních směn. Pokud tato podmínka není splněna, znamená to, že pro časy (a datum) záznamů průchodů t_i neplatí:

$$\forall i \in Z: t_i \in T_Z - \bigcap_{n_i=1}^{m_i} \langle P_S \cdot t_i + n_i \cdot \Delta t - \varepsilon; P_S \cdot t_i + n_i \cdot \Delta t + \varepsilon \rangle_{n_i} \quad (67)$$

kde:

i je číslo (pořadí) záznamu průchodu EB, tedy i lze chápat jako přirozené číslo (tj. $i \in \mathbb{N}$),

Z je množina všech záznamů průchodů daným EB, které jsou k dispozici,

P_S [s] je perioda pro hledání časových vymezení společných prodlev mezi záznamy, tj. obvykle $P_S = P = d_P \cdot 86400$ [s], kde $d_P \in \mathbb{N}$ je pořadové číslo dne (pro hledání prodlev/přestávek, které jsou společné pro stejné dny v týdnu),

t_i [s] je časový (a datový) okamžik (bod) záznamu průchodu EB,

T_Z [s] je časový interval, ve kterém byly záznamy průchodů daným EB pořízeny, neboli $T_Z = \langle t_i^{min}; t_i^{max} \rangle$, kde t_i^{min} , resp. t_i^{max} je nejmenší, resp. největší hodnota data a času záznamu průchodů,

Δt [s] je zvolený krok hledání časového vymezení (procházení všech záznamů),

n_i [–] je pořadí iterace pro vyhledávání časového vymezení s krokem Δt ,

m_i [–] je maximální počet iterací pro vyhledávání časového vymezení v rámci dané časové základny (obvykle celého dne, tj. 86400s),

ε [s] je poloměr okolí aktuálního časového bodu t_i , ve kterém neexistuje záznam průchodu elementu materiálu daným EB.

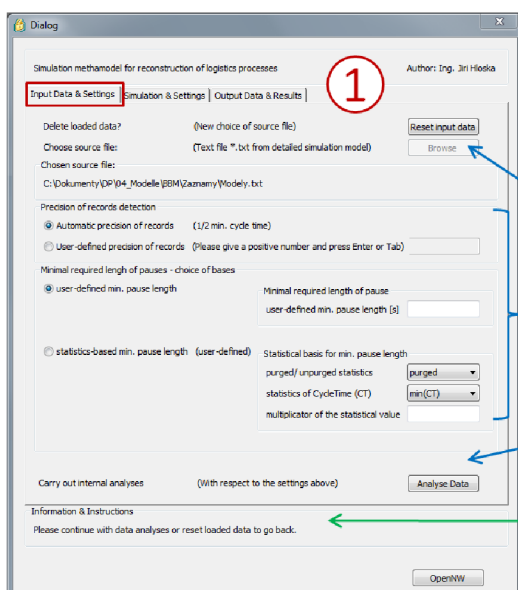
Pokud však existují subintervaly $\langle P_S \cdot t_i + n_i \cdot \Delta t - \varepsilon; P_S \cdot t_i + n_i \cdot \Delta t + \varepsilon \rangle_{k_i}$ pro obecně $1 < k_i \leq m_i$, nebo $1 \leq k_i < m_i$, ve kterých vztah (67) platí, je možné interval T vymežující časový rozsah, ze kterého záznamy pocházejí, rozdělit do těchto subintervalů a provést analýzu pro jednotlivé subintervaly zvláště s tím, že identifikované časové vymezení směn a směnových přestávek bude pro data příslušná jednotlivým subintervalům obecně různé.

²⁵ ID – jednoznačně přiřazené (unikátní) číselné označení pro každý element materiálového toku

²⁶ GUI – Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)

Metamodel pro rekonstrukci logistických procesů umožňuje ovládání pomocí již zmíněného GUI. Jak je vidět na Obr. 11., ve třech oddělených záložkách tohoto GUI lze postupně provést volbu vstupních dat a parametrů jejich analýzy, dále spustit a ovládat simulaci rekonstruující analyzované záznamy průchodů materiálového toku a konečně porovnat tabelární a grafické výstupy vybraných charakteristik materiálového toku pro jeho původní záznamy a pro jeho rekonstrukci metamodelem. Mezi tyto charakteristiky patří přehled průchodů (podobný jako např. na Obr. 9) a také analogický přehled doby mezi průchody po sobě zaznamenaných (rekonstruovaných) průchodů (podobný graf je např. v levé části Obr. 44, který vznikl úpravou grafického výstupu z nástroje APP).

Toto GUI je jednou z alternativ tvorby uživatelských rozhraní k simulačním (meta)modelům, kterou použitý SW Plant Simulation umožňuje. Druhý postup tvorby GUI byl použit v rámci generátoru průchodů evidenčními body (popsaného v následující kapitole). Toto GUI je pak zachycené na Obr. 17 na str. 73.



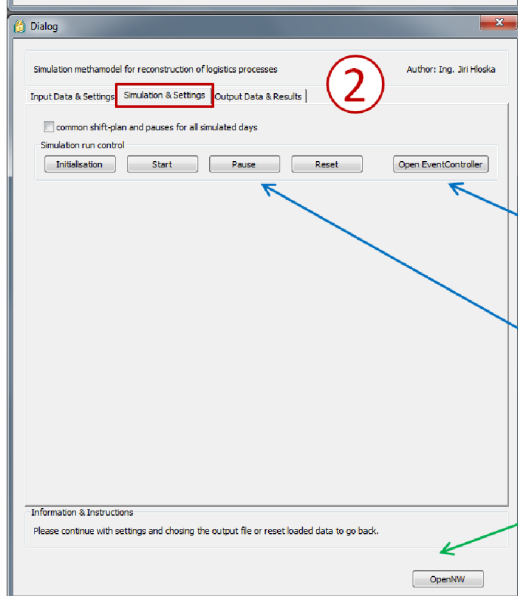
- 1 a) Vstupní data (záznamy průchodů)
- 1 b) Přesnost detekce záznamů a přestávek
- 1 c) Interní kontrolní analýza

Volba zdrojového souboru se záznamy materiálového toku

Nastavení přesnosti detekce přestávek v rámci analyzovaných záznamů materiálového toku

Analýza záznamů materiálového toku

Informace a instrukce pro uživatele

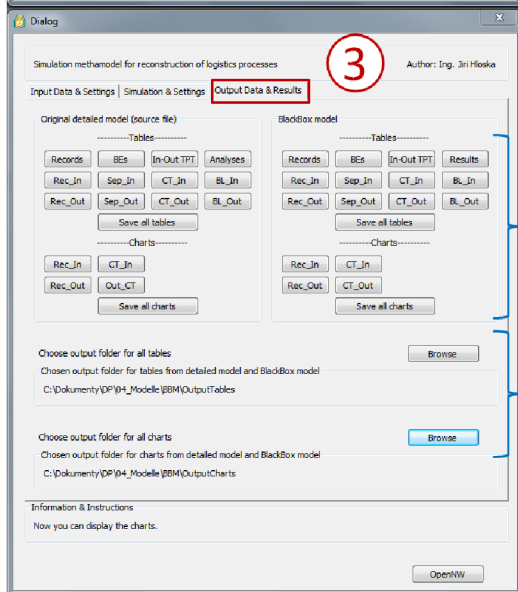


- 2 a) Zohlednění indikovaných směnových režimů
- 2 b) Ovládání simulace

Zobrazení ovladače běhu simulace

Ovládání simulace pro rekonstrukci analyzovaného logistického procesu

Zobrazení vnitřní struktury metamodelu



- 3 a) Tabelární a grafické výstupy pro vstupní data
- 3 b) Tabelární a grafické výstupy reprodukováných záznamů

Grafické a tabelární výstupy originálních záznamů materiálového toku a záznamů rekonstruovaného materiálového toku

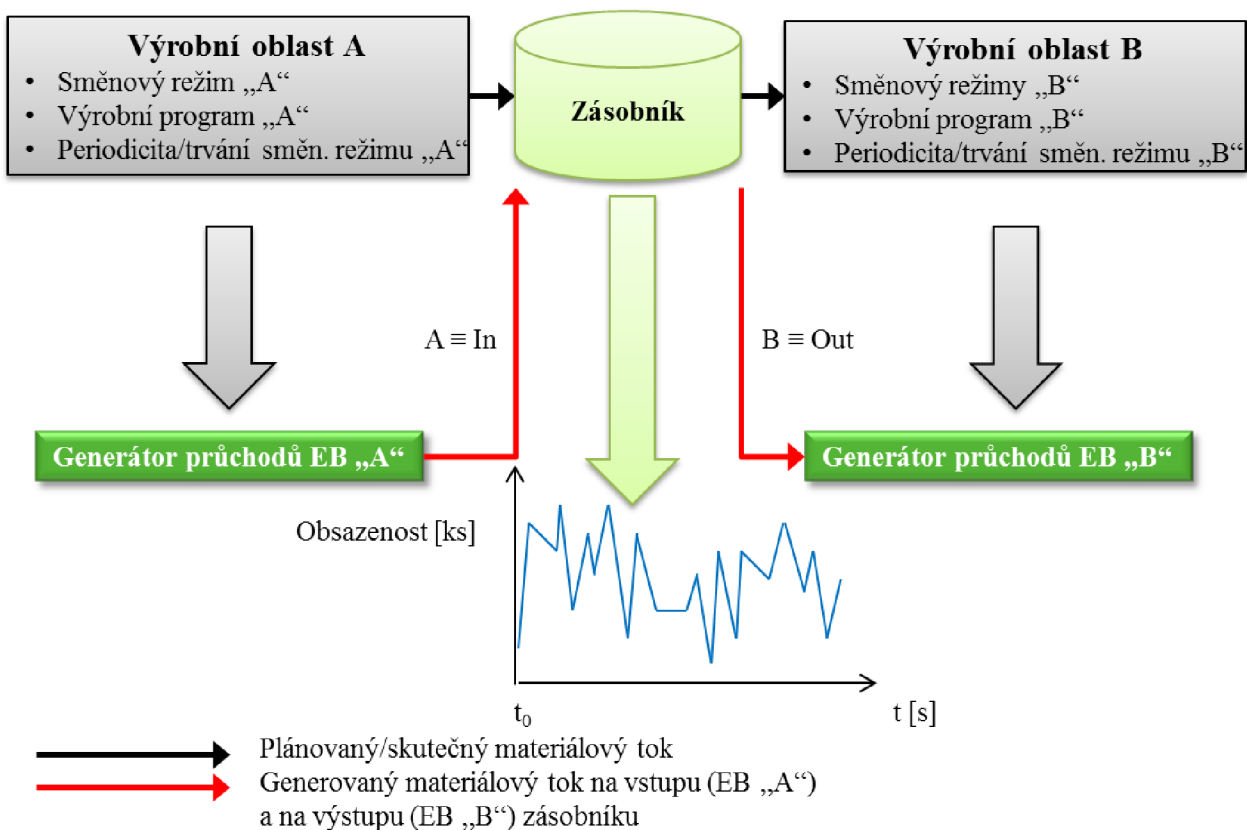
Volba složek v rámci adresáře pro uložení výstupních grafů a tabulek

Obr. 11 Uživatelské rozhraní metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů (zdroj: autor)

5.1.2 Generátor průchodů evidenčními body

V této části je popsán návrh metodiky, díky které je možné generovat záznamy o průchodech materiálového toku, jehož elementy se mohou obecně dle zvoleného hlediska lišit. Metodika generování materiálového toku, stejně jako podle ní vytvořený *Generátor průchodů evidenčními body*, je rozdělena do dvou oblastí – generování materiálového toku z jednoho EB a generování materiálového toku mezi dvěma různými EB. Cílem je generovat materiálový tok dle definovaných pravidel přímo v simulačním metamodelu, aniž by nutně musel probíhat tento materiálový tok v reálném systému (který např. ještě neexistuje a je teprve ve fázi plánování), resp. aniž by musely existovat záznamy o průchodu materiálu určenými EB (např. v situaci, kdy technologie záznamů není v příslušném systému implementována).

Vyžití *Generátoru průchodů evidenčními body* je možné uvažovat ve dvou případech. První možnost (vycházející z metodiky generování materiálového toku mezi dvěma různými EB) znázorňuje schematicky Obr. 12. Jedná se o úlohu spočívající v posouzení potřebné kapacity zásobníku (obecně určité logistické plochy či výrobní oblasti, která může funkci zásobníku plnit – velmi často se jedná o zásoby nedokončené výroby). Pro posouzení požadované kapacity jsou potřebnými vstupními údaji informace o charakteristikách materiálového toku (včetně jejich časového průběhu) na vstupu do posuzované oblasti (zásobníku) – na Obr. 12 je tento vstup označen bodem „A“. Analogicky jsou nutné informace o charakteristikách materiálového toku (včetně jejich časového průběhu) na výstupu z posuzované oblasti (zásobníku) – na Obr. 12 je tento výstup označen bodem „B“. Podstatnou charakteristikou materiálového toku (tyto charakteristiky byly diskutovány v části 4.1.1 a 4.1.2) je zde zejména intenzita vstupů (bod „A“) a výstupů (bod „B“), resp. vstupní takt a výstupní doba mezi průchody (kterou lze chápat jako vstupní takt pro výrobní oblast B). Jsou-li hodnoty těchto charakteristik pro oblast „A“ a „B“ různé a v čase se jejich rozdíl mění (to může být způsobeno různým směnovým režimem včetně jeho periodicity či trvání a/nebo výrobním programem v daných výrobních oblastech), bude se v čase měnit také hladina zásob mezi EB „A“ a „B“ tak, jak schematicky znázorňuje graf uvedený na Obr. 12. Přínosem diskutovaného generátoru průchodů evidenčními body je pak možnost využít ho jako náhradu za (detailní) simulační modely výrobních oblastí A a B. Podmínkou je samozřejmě znalost směnového režimu a výrobního programu, kterým se tyto oblasti řídí. Pokud tyto informace nejsou k dispozici v explicitní formě, avšak existují záznamy o průchodech příslušnými EB v daných oblastech (musí se jednat o již existující, nikoliv teprve plánované výrobní oblasti), lze provést analýzu záznamů o průchodech příslušnými EB například pomocí *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* popsaného v předchozí kapitole.

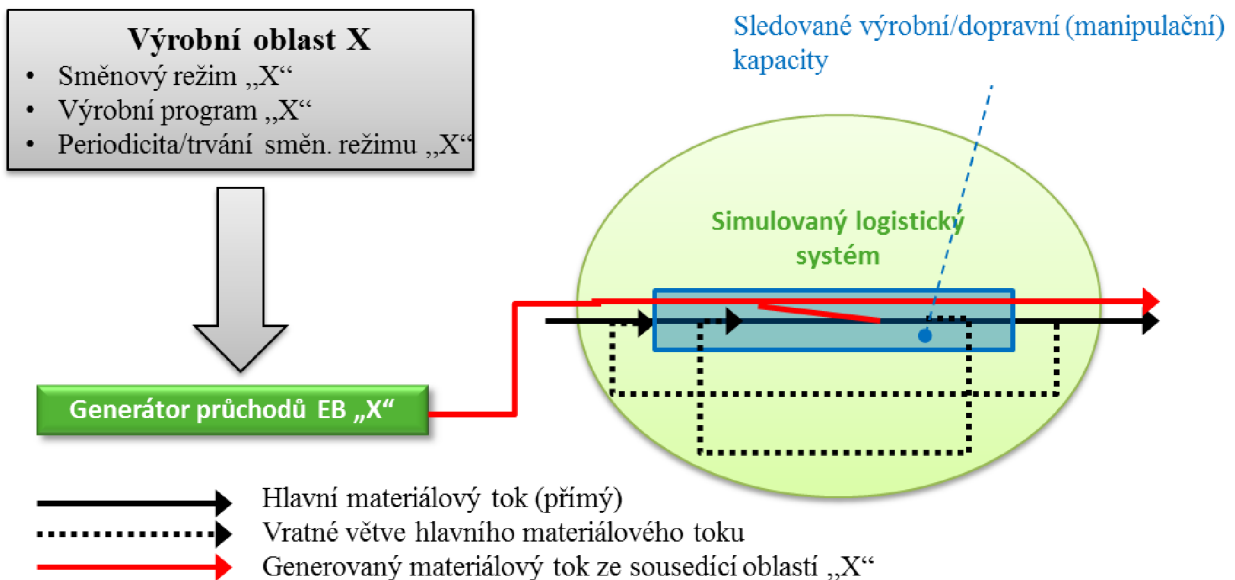


Obr. 12 Využití generátoru průchodů evidenčními body pro analýzu kapacity zásobníku (zdroj: autor)

Druhá možnost využití *Generátoru průchodů evidenčními body* (vycházející z metodiky generování materiálového toku z jednoho EB) opět spočívá v náhradě (neexistujícího) detailního simulačního modelu určitého logistického (sub) systému, ve kterém probíhá materiálový tok ovlivňující procesy probíhající v jiném logistickém systému, který je předmětem simulační studie. Zejména se v tomto případě může jednat o posouzení využití výrobních kapacit nebo analýzu úzkých míst. Schematicky tento problém zachycuje Obr. 13. V případě, že analyzovaný logistický systém (který je předmětem simulační studie, v rámci které je obvykle třeba vytvořit jeho detailní simulační model) je vytyčen systémovými hranicemi oddělujícími jej od dalších (rozsáhlých) logistických/výrobních oblastí, jež však se systémem pomocí vazeb (informačního a zejména materiálového toku) interagují, je nutné i tyto logistické/výrobní oblasti do simulačního modelu zahrnout. Důvodem je, že zmíněná interakce může mít vliv na posuzované vytížení výrobní (manipulační) techniky ve sledovaném systému nebo na polohu úzkého místa v něm. Tzv. úzkým místem²⁷ je myšleno výrobní či manipulační zařízení, které je v rámci logistického systému, jehož je součástí (prvkem), vytíženo nejvíce (v porovnání s časovým vytížením ostatních zařízení). To znamená, že jeho technické parametry determinují celkovou výkonnost systému (měřenou např. počtem elementů materiálového toku odbavených za jednotku času). Namísto (časově/finančně) náročné tvorby (detailního) simulačního modelu interagující výrobní oblasti (na Obr. 13 je označena jako Výrobní oblast X) je možné simulovat materiálový tok, který do analyzovaného logistického systému z této oblasti vstupuje (příp. z něj do této oblasti vystupuje) pomocí generátoru průchodů evidenčními body. Evidenčním bodem bude v tomto případě EB „X“

²⁷ Anglický ekvivalent je *bottle neck*, německý *Engpass*.

představující výstup materiálového toku z výrobní oblasti X, který je shodný se vstupem do simulovaného logistického systému. Stejně jako v případě využití generátoru průchodů evidenčními body pro posouzení potřebné kapacity navrhovaného zásobníku i v tomto případě je podmínkou pro využití znalost směnového režimu a výrobního programu, kterým se výrobní oblast X řídí. Opět platí, že v případě chybějícího explicitního vymezení tohoto směnového režimu je možné jej posoudit na základě dat obsahujících záznamy o průchodech EB „X“ s využitím *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* popsaného v předchozí kapitole.



Obr. 13 Využití generátoru evidenčních bodů pro analýzu vytížení výrobních kapacit (zdroj: autor)

V případě, že existují a jsou k dispozici informace o směnovém režimu a výrobním programu řídících logistické (výrobní) procesy v oblastech nahrazovaných v rámci simulační studie *Generátorem průchodů evidenčními body*, je možné tyto informace zpracovat a použít coby pravidla pro materiálový tok (nahrazovaných oblastí) jako vstupní data generátoru. Podle navržené metodiky lze zmíněná definovaná pravidla pro materiálový tok, tedy provozní parametry systému, ve kterém má materiálový tok probíhat, rozdělit do třech oblastí (datových množin):

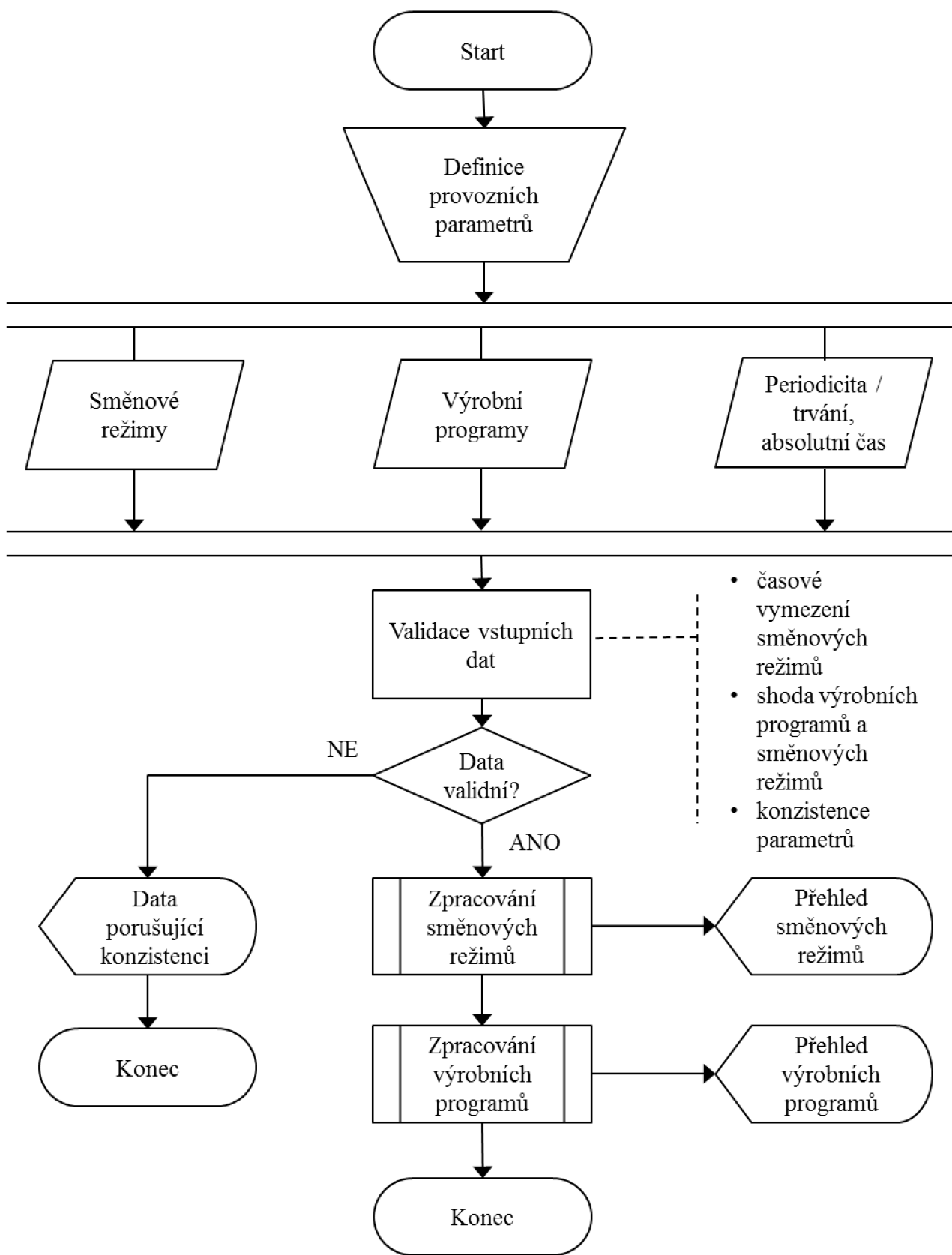
- **Směnové režimy** – tedy časové vymezení period, ve kterých materiálový tok probíhá podle dále určených pravidel, přesněji hodnot jeho charakteristik – jde o výběr z těch, které byly diskutovány v části 4.1.1 s tím, že pro účely komfortnějšího zadávání jsou tyto charakteristiky drobně upraveny, např. pokud jde o rozměr/jednotku, ve které je třeba je zadávat.
- **Výrobní program** – tedy přehled typů elementů materiálového toku (v praxi výrobků či polotovarů), které mají systémem probíhat, a to ve vazbě na výše uvedený definovaný směnový režim.
- **Periodicita/trvání, absolutní čas** – tedy určení opakovatelnosti či trvání (a vzájemného střídání) definovaných směnových režimů a s nimi souvisejících výrobních programů a dále určení vztažného (počátečního) data a času, ve kterém začne simulační běh v rámci generování průchodů elementů materiálového toku dle takto definovaných provozních parametrů systému.

Při návrhu byl kladen důraz zejména na maximální univerzálnost zadávaných pravidel pro materiálový tok. Konkrétně to pro jednotlivé oblasti (datové množiny znamená) tyto možné volby zadání:

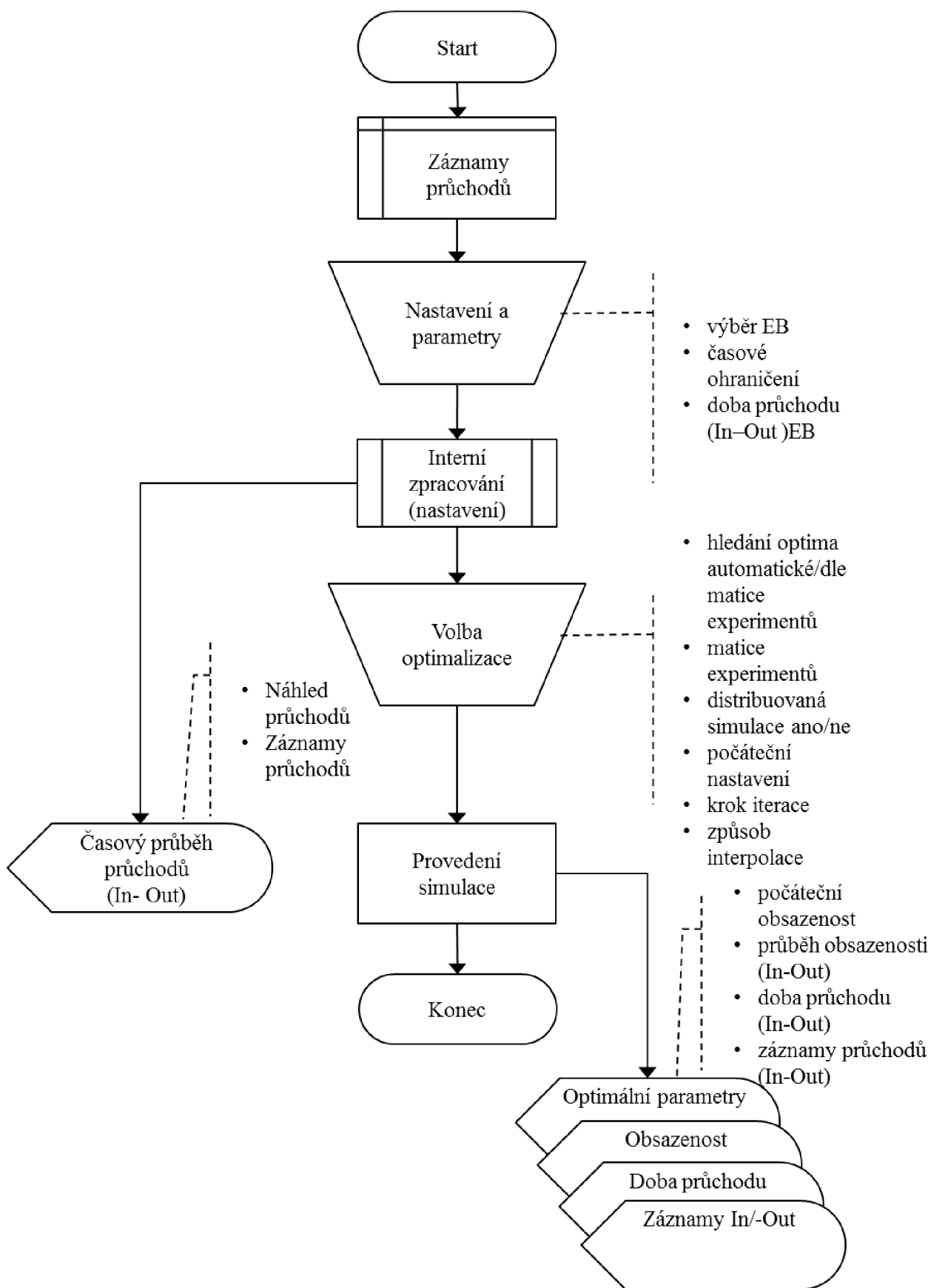
- **Směnové režimy** – lze definovat libovolný počet směnových režimů a v rámci každého z nich libovolný počet (z časového hlediska vzájemně disjunktních) směn. Pro jednotlivé dny v týdnu lze určit, zda příslušná směna je do pracovního plánu zahrnuta či nikoliv (v případě přesahu noční směny do následujícího dne lze zvolit její ne/zahrnutí podle počátečního, resp. obou dnů, případně ji zkrátit o část zasahující do nepracovního dne).
- **Výrobní program** – pro každou ze směn (definovaných v rámci směnových režimů) lze zadat obecně různé výrobní programy. Každý spočívá v zadání typů elementů materiálového toku, jejich vzájemného poměru a dále taktu, ve kterém mají být vyráběny, nebo počtu, ve kterém mají být v časovém rozsahu dané směny vyrobeny (vygenerovány).
- **Periodicita/trvání, absolutní čas** – lze zadat buď periodicitu jednotlivých směnových režimů, tedy počet jejich opakování a pořadí, v jakém mají směnové režimy (s příslušným počtem opakování) následovat. Alternativou je zadání trvání směnových režimů (vyjádřenou v počtech týdnů) a pořadí, v jakém mají směnové režimy následovat.

Část navržené metodiky zaměřené na způsob zadání vstupních dat pro Generátor průchodů evidenčními body ze strany uživatele a na možné kontrolní výstupy sloužící pro ověření korektního zadání veškerých parametrů znázorňuje vývojový diagram na Obr. 14, který byl vytvořen v souladu se související normou [72]. Tato část metodiky je využita nejen při zadání vstupních dat, ale také při generování takto definovaného materiálového toku přes (jediný) EB.

Další část navržené metodiky se týká problematiky generování materiálového toku mezi dvěma různými EB. Předpokládá disponibilitu vstupních dat ve formě záznamů průchodů materiálu (obecně více různými) EB. Grafické znázornění této části metodiky formou vývojového diagramu (vytvořeného opět v souladu se související normou [72]) je na Obr. 15.

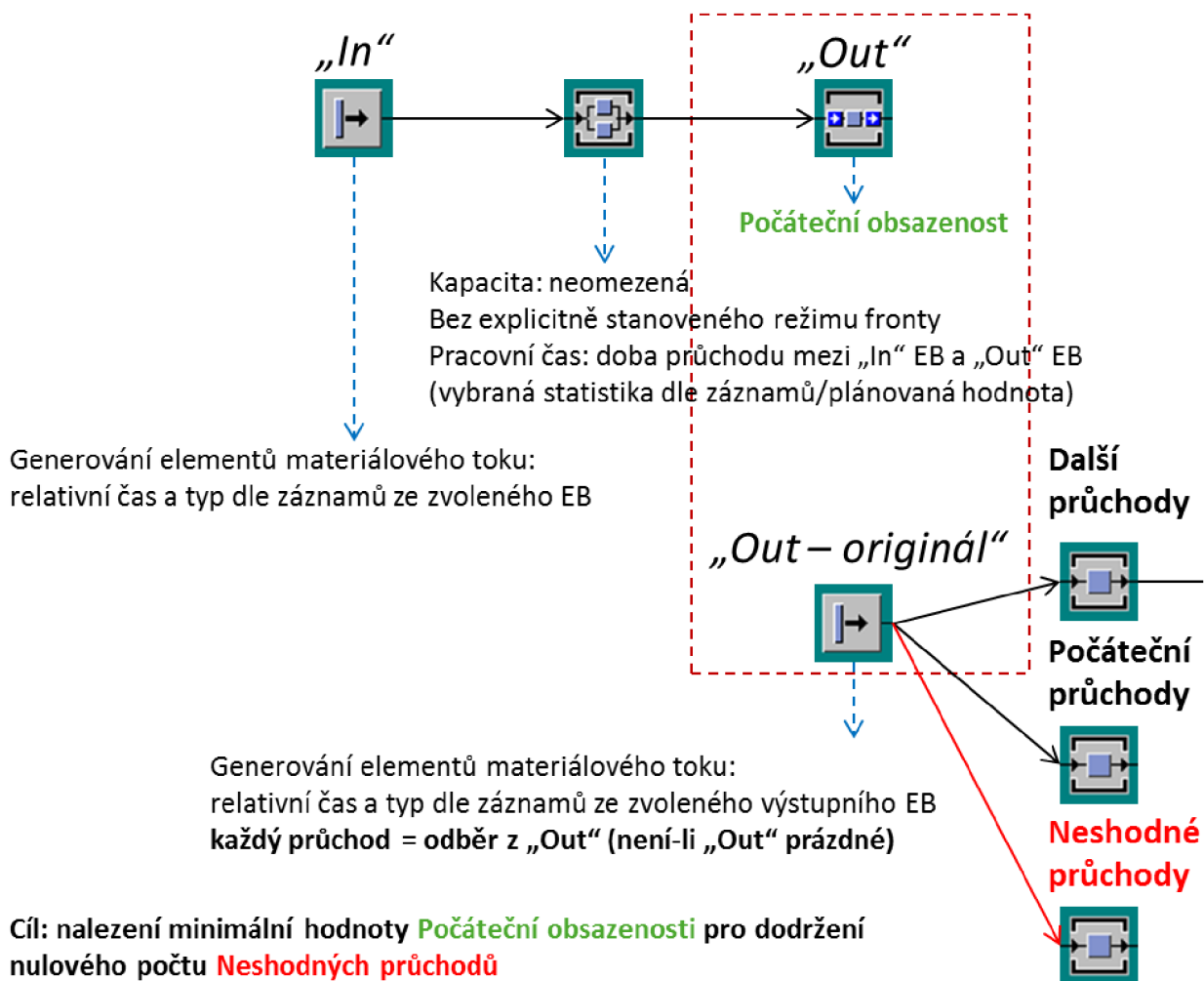


Obr. 14 Vývojový diagram způsobu zadání vstupních dat pro Generátor průchodů evidenčními body včetně ověření jejich správnosti (zdroj: autor)



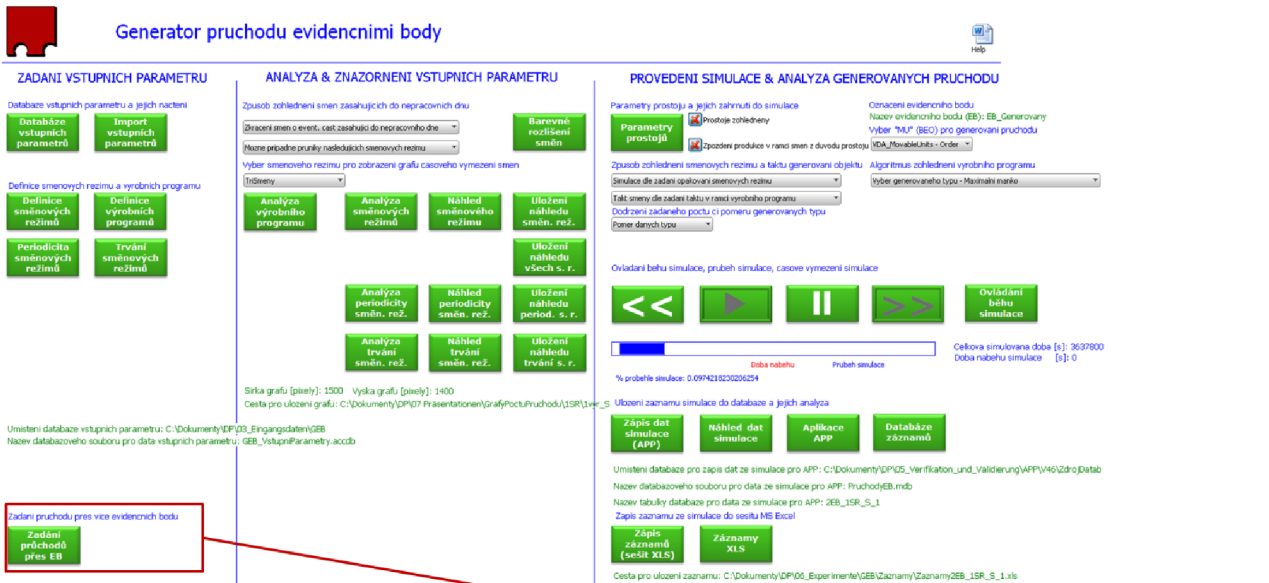
Obr. 15 Vývojový diagram způsobu zadání vstupních dat a vlastního generování průchodů materiálového toku mezi dvěma různými EB (zdroj: autor)

Konkrétní technické provedení náhrady obecně komplexní struktury (logistických) objektů, mezi kterými materiálový tok probíhá, základními elementy použitého simulačního SW (Plant Simulation) s důrazem na minimální složitost (tedy mj. minimální počet použitých elementů) znázorňuje zjednodušeně Obr. 16. V prvku „In“ (vstupní EB) jsou generovány vstupní průchody elementů materiálového toku (na základě načtených a zpracovaných vstupních dat). Tyto elementy s časovým zpožděním (zprostředkovaným vloženým prvkem obecně neomezené kapacity) vstupují do prvku „Out“ – výstupního EB. Toto časové zpoždění lze (např. s přihlédnutím k analýze doby průchodu mezi vstupním a výstupním EB ve výchozím systému) určit jako konstantu, rozptylem (histogramem), příp. konstantami pro jednotlivé typy elementů. Aby byla zajištěna kontinuita materiálového toku, je nutné „spárování“ elementů, které již dosáhly bod „Out“ s elementy generovanými (podle vstupních dat) na prvku „Out – originál“. Při každém takovém „spárování“ je element z oblasti mezi „In“ a „Out“ odebrán. Pro zajištění kontinuity materiálového toku je tedy třeba nastavit takovou počáteční obsazenost prvku „Out“, při které v dalším průběhu simulace nedojde k vygenerování elementu na prvku „Out – originál“ v okamžiku, kdy na prvku „Out“ není žádný element pro „spárování“. V navrženém *Generátoru průchodů evidenčními body* by takové elementy z prvku „Out – originál“ byly zaznamenány jako „Neshodné průchody“. Naopak jako „Počáteční průchody“ jsou zaznamenány ty elementy z prvku „Out – originál“, které jsou na výstupu registrovány ještě před dosažením „Počáteční obsazenosti“ prvku „Out“.



Obr. 16 Princip navržené metodiky pro generování materiálového toku mezi dvěma různými EB (zdroj: autor)

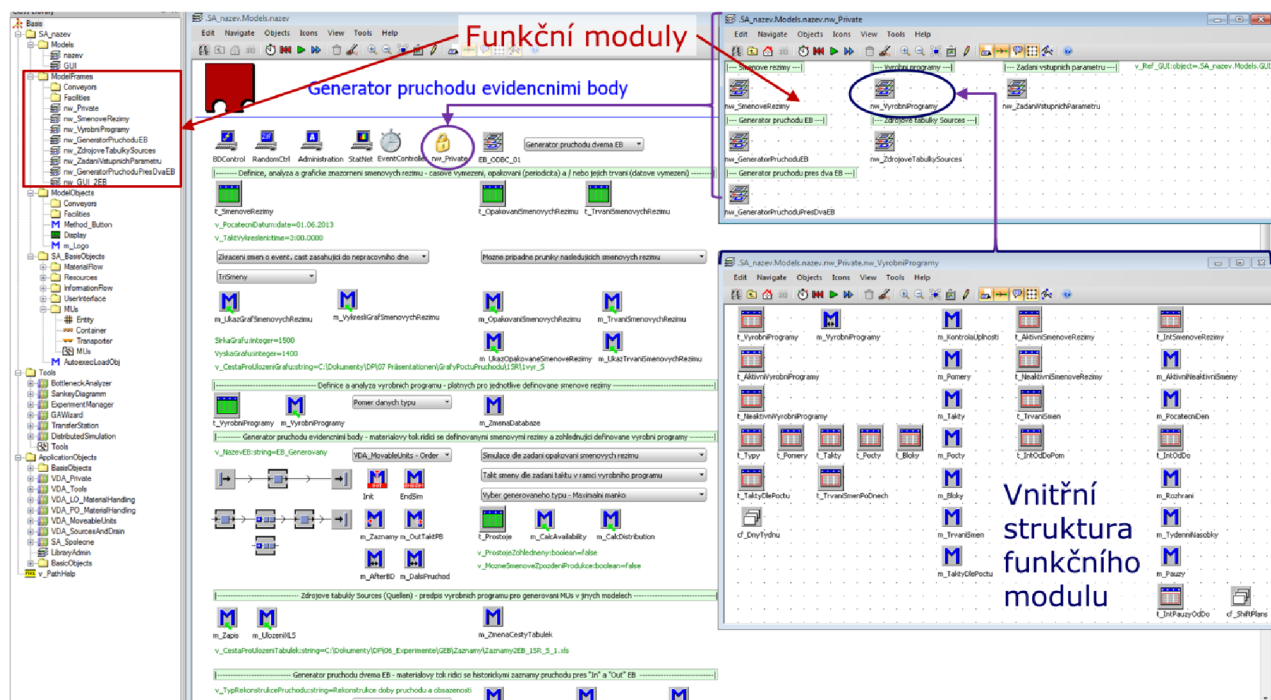
Z praktického hlediska existuje řada požadavků na generátor průchodů evidenčními body, které obecně vycházejí z potřeby komfortního uživatelského ovládání a omezení možnosti chybné obsluhy. Souhrn všech požadavků a z nich vyplývající funkcionality vytvořeného generátoru znázorňuje Obr. 19. Součástí generátoru (který byl pro ověření navržené metodiky vytvořen pomocí simulačního SW Plant Simulation verze 10.0) je tedy **uživatelské rozhraní** (GUI) umožňující volat veškeré funkce generátoru pomocí zabudovaných ovládacích prvků. Toto GUI je zachyceno na Obr. 17 (v horní části pro definici, validaci a generování průchodů materiálového toku přes jeden EB, ve spodní části pro rekonstrukci průchodů materiálovým tokem mezi dvěma různými EB) a jak je vidět, jsou obě GUI prostorově rozdělena na tři části – oblast pro zadání vstupních parametrů, oblast pro analýzu vstupních parametrů a oblast pro ovládání běhu simulace, pomocí které jsou průchody rekonstruovány (zleva doprava). V porovnání s GUI *Metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* (viz Obr. 17) se jeví z programátorského hlediska přístup k vytvoření GUI použitý v případě *Generátoru průchodů evidenčními body* snazší. Jednotlivé ovládací prvky jsou zde volně vkládány do pracovní plochy pro simulační model a lze je tedy snadno přeskupit a doplnit. Analogické úpravy v případě GUI *Metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* naopak vyžadují změnu řady parametrů příslušného prvku pro tvorbu dialogových oken.



Obr. 17 Navržené grafické uživatelské rozhraní Generátoru průchodů evidencních bodů (zdroj: autor)

Z hlediska obsluhy je kromě **uživatelského rozhraní** důležitá také možnost exportu a importu dat (v tabulární a grafické formě) a **interoperabilita**, tj. umožnění obecného použití nezávisle na řešeném simulačním projektu, resp. použitém simulačním nástroji pomocí **rozhraní pro jiné aplikace**. V tomto smyslu do jisté míry protichůdný je požadavek na **soulad s mezinárodními standardy**, kde minimálně v evropském měřítku je prosazována knihovna prvků *VDA Bausteinkasten* (zmíněná v kapitole 4.6), čímž je určeno také použité SW vybavení. V případě vytvořeného generátoru bylo také s ohledem na dostupnost SW nástroje upřednostněno toto hledisko. Z architektury *Generátoru průchodů evidencními body* je důležitá také jeho **modularita**, díky které může jeho další vývoj probíhat v týmové spolupráci a díky které nebude ohroženo korektní fungování již existujících funkcí (modulů). Modulární architekturu generátoru přibližuje jeho snímek na Obr. 18, kde jsou v pravé části v tzv. knihovně tříd použitého simulačního SW

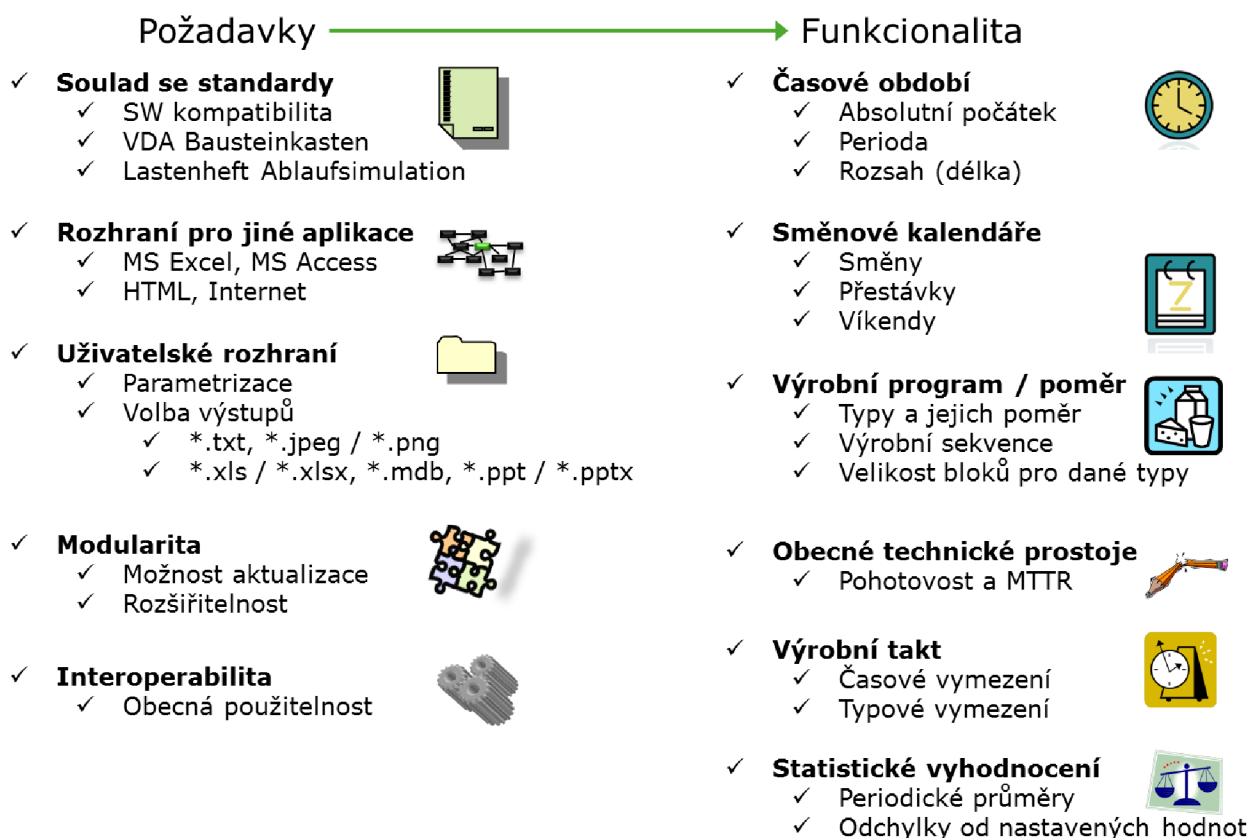
vyznačeny jednotlivé funkční moduly zajišťující možnost zadání a analýzy vstupních dat a simulace pro generování záznamů průchodů EB a kde v hlavní části snímku je samotný *Generátor průchodů evidenčními body*, který je možné ovládat pomocí GUI (viz Obr. 17). Právě v ohledu modularity je nutností dodržení výše zmíněných standardů. Použitý SW pak umožňuje export/import modulů do/z jiných simulačních modelů, ve kterých je event. možné provádět další vývoj těchto modulů nezávisle na generátoru.



Obr. 18 Modulární struktura Generátoru evidenčních bodů (zdroj: autor)

Z hlediska požadavků na funkce generátoru je kromě již zmíněného **zadání datových množin** včetně vyhodnocení jejich vzájemné konzistence a správnosti klíčový modul zajišťující samotné **generování průchodů** zvoleným EB na základě takto definovaných dat. Pro účely validace generátoru (ve fázi jeho vývoje), ale zejména pro účely statistického vyhodnocení charakteristik generovaného materiálového toku umožňuje generátor provést potřebné analýzy, a to prostřednictvím **rozhraní ke statisticko-analytickým aplikacím** určeným k tomuto účelu (zejména aplikace APP).

Generátor průchodů evidenčními body



Obr. 19 Požadavky a z nich plynoucí funkcionalita generátoru průchodů evidenčními body (zdroj: autor)

S ohledem na funkční rozdělení *Generátoru průchodů evidenčními body* na dvě části (v souladu s metodikami generování materiálového toku dle definovaných datových množin z jednoho EB, resp. mezi dvěma různými EB) byla také validace *Generátoru průchodů evidenčními body* provedena ve dvou fázích.

První fáze validace ověřila korektní realizaci metodiky rekonstrukce materiálového toku z jednoho EB podle definovaných datových množin. Kromě správného rozpoznání (případně nekorektně zadaných dat a odpovídající výstupní informace o porušení konzistence (viz jedna z možných vývojových větví v grafu na Obr. 14) byly ověřovány grafické výstupy časového vymezení jednotlivých směnových režimů a jejich definovaného trvání/periodicity. Dále s vydefinovaným směnovým režimem a odpovídajícím výrobním programem byl v každé sérii generován materiálový tok odpovídající nastaveným pravidlům. Generátor průchodů evidenčními body pořizuje během generování toku také jeho záznamy (ty mohou sloužit kupříkladu jako vstup definující materiálový tok v jiném simulačním modelu). Tyto záznamy byly analyzovány pomocí nástroje APP s cílem ověření shody generovaného materiálového toku a definovaných pravidel. Příklad definice směnových režimů, jejich periodicity a odpovídajících výrobních programů, uvádí Obr. 20. Odpovídající grafické zobrazení takto definovaných směnových režimů, které je jedním z výstupů *Generátoru průchodů evidenčními body*, uvádí pro jednotlivá možná uživatelská nastavení Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23.

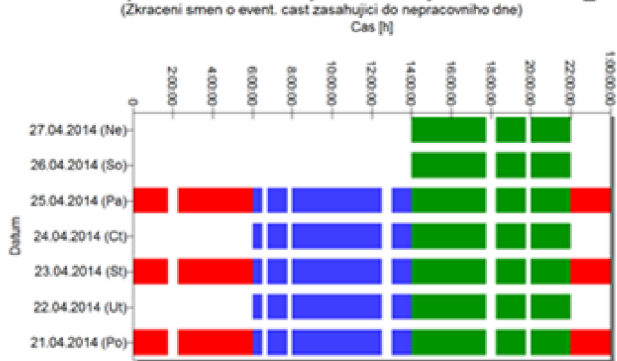
ShiftPlan	Opakovani
SR_1	2
SR_2	1
SR_1	2
SR_2	1
SR_3	1

ShiftName	Den v tydnu	Typy	Pomer	Takty [s]	Pocet
ranni 1	Mon	ranni_SR1	100	30	1824
	Tue	ranni_SR1	100	30	1824
	Wed	ranni_SR1	100	30	1824
	Thu	ranni_SR1	100	30	1824
	Fri	ranni_SR1	100	30	1824
	Sat	ranni_SR1	100	60	912
	Sun	ranni_SR1	100	60	912
odpoledni 1	Mon	odpoledni_SR1	100	50	1384
	Tue	odpoledni_SR1	100	50	1384
	Wed	odpoledni_SR1	100	50	1384
	Thu	odpoledni_SR1	100	50	1384
	Fri	odpoledni_SR1	100	50	1384
	Sat	odpoledni_SR1	100	100	696
	Sun	odpoledni_SR1	100	100	696
nocni 1	Mon	nocni_SR1	100	60	912
	Tue	nocni_SR1	100	60	912
	Wed	nocni_SR1	100	60	912
	Thu	nocni_SR1	100	60	912
	Fri	nocni_SR1	100	60	912
	Sat	nocni_SR1	100	120	576
	Sun	nocni_SR1	100	120	576
ranni 2	Mon	ranni_SR2	100	30	1824
	Tue	ranni_SR2	100	30	1824
	Wed	ranni_SR2	100	30	1824
	Thu	ranni_SR2	100	30	1824
	Fri	ranni_SR2	100	30	1824
	Sat	ranni_SR2	100	60	912
	Sun	ranni_SR2	100	60	912
odpoledni 2	Mon	odpoledni_SR2	100	50	1384
	Tue	odpoledni_SR2	100	50	1384
	Wed	odpoledni_SR2	100	50	1384
	Thu	odpoledni_SR2	100	50	1384
	Fri	odpoledni_SR2	100	50	1384
	Sat	odpoledni_SR2	100	100	696
	Sun	odpoledni_SR2	100	100	696
nocni 2	Mon	nocni_SR2	100	60	912
	Tue	nocni_SR2	100	60	912
	Wed	nocni_SR2	100	60	912
	Thu	nocni_SR2	100	60	912
	Fri	nocni_SR2	100	60	912
	Sat	nocni_SR2	100	120	576
	Sun	nocni_SR2	100	120	576
non-stop	Mon	non_stop_SR3	100	15	4608
	Tue	non_stop_SR3	100	15	4608
	Wed	non_stop_SR3	100	15	4608
	Thu	non_stop_SR3	100	15	4608
	Fri	non_stop_SR3	100	15	4608
	Sat	non_stop_SR3	100	15	4608
	Sun	non_stop_SR3	100	15	4608

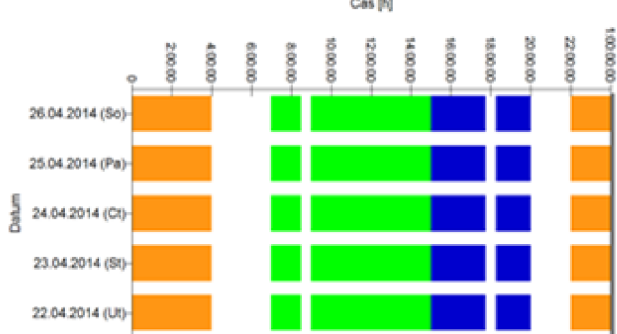
ShiftPlan	ShiftName	From	Till	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Breaks
SR_1	ranni 1	6:00:00	14:00:00	true	true	true	true	true	false	false	06:30-06:45; 07:45-08:00; 12:30-13:00
	odpoledni 1	14:00:00	22:00:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15; 19:45-20:00
	nocni 1	22:00:00	6:00:00	true	false	true	false	true	false	false	01:45-02:15
SR_2	ranni 2	7:00:00	15:00:00	false	true	true	true	true	true	false	08:30-09:00
	odpoledni 2	15:00:00	20:00:00	false	true	true	true	true	true	false	17:45-18:15
	nocni 2	22:00:00	4:00:00	false	true	true	true	true	true	false	00:00-00:30; 02:15-02:30
SR_3	non-stop	0:00:00	24:00:00	true	true	true	true	true	true	true	11:00-13:00

Obr. 20 Směnové režimy (vlevo dole), jejich periodicita (vlevo nahoře) a výrobní program (vpravo) definující generovaný materiálový tok (zdroj: autor)

Casove vymezení definovaných smenových režimu - SR₁



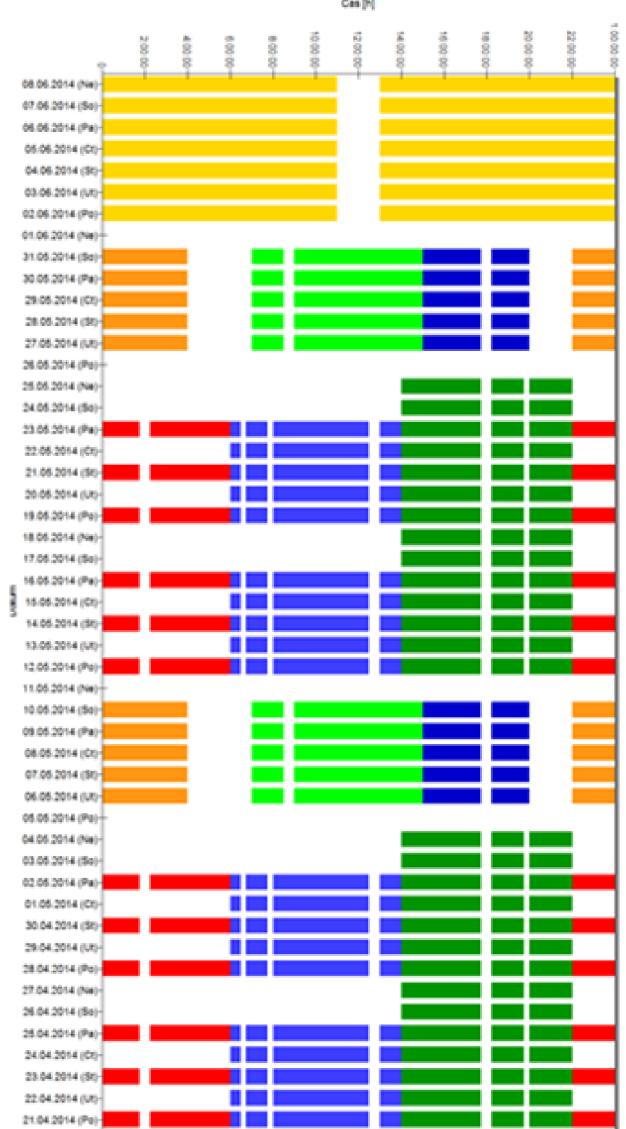
Casove vymezení definovaných smenových režimu - SR₂



Casove vymezení definovaných smenových režimu - SR₃

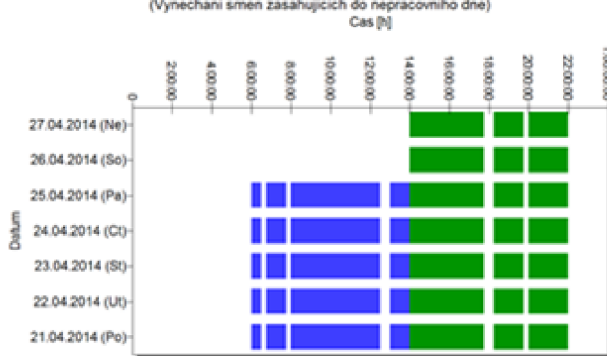


Casove vymezení opakovaných smenových režimu

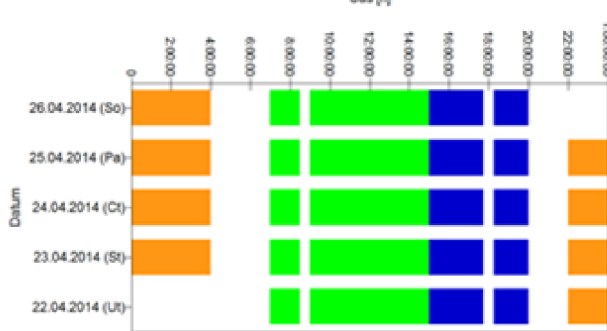


Obr. 21 Grafický výstup Generátoru průchodů evidenčními body znázorňující definované směnové režimy a jejich periodicitu, volba vynechání částí směn zasahujících do nepracovních dnů (zdroj: autor)

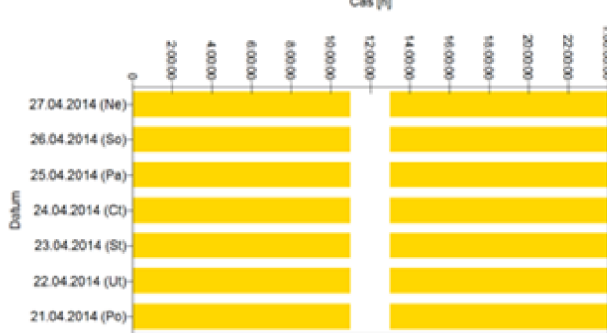
Casove vymezení definovaných směnových režimu - SR_1



Casove vymezení definovaných směnových režimu - SR_2



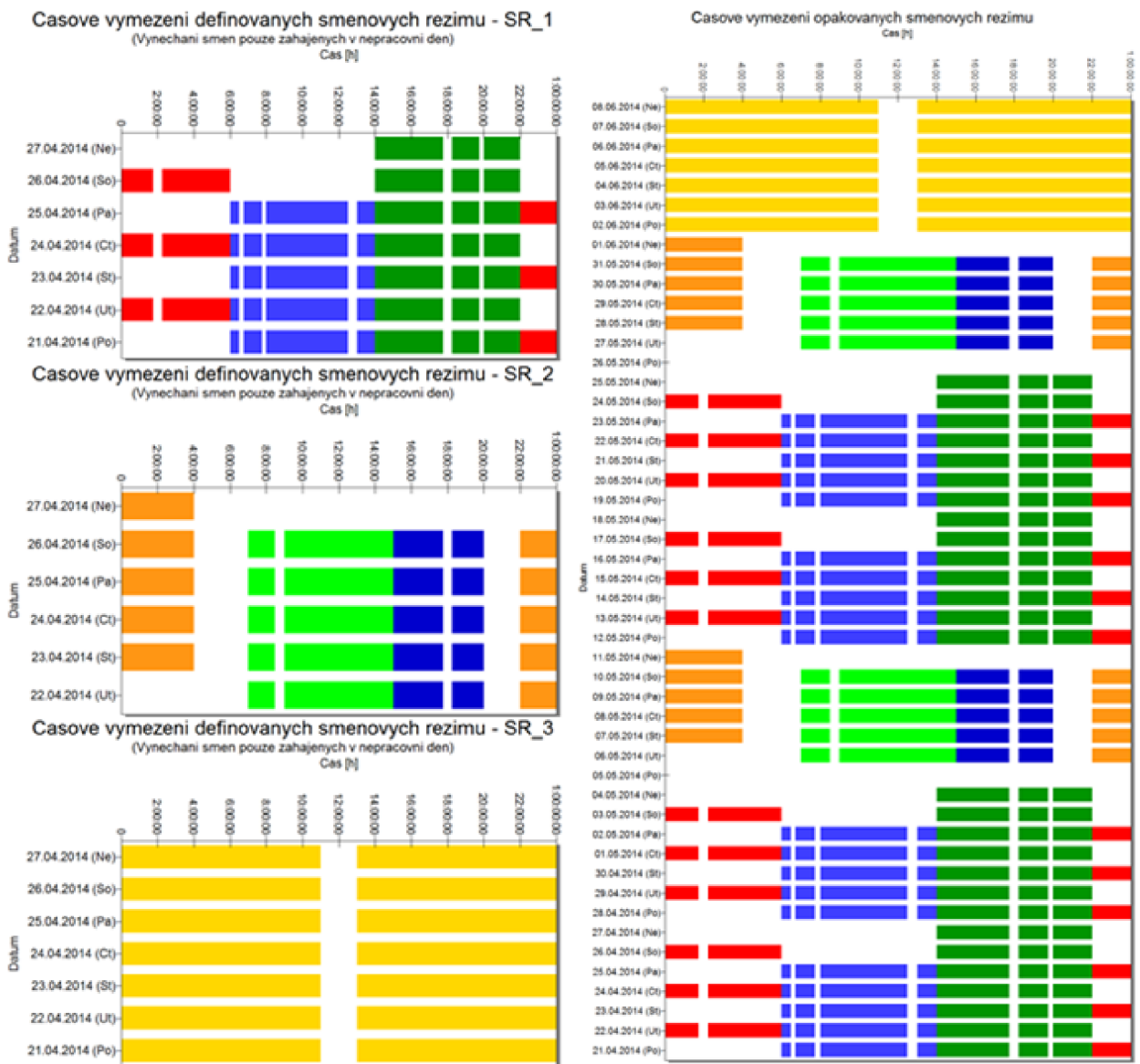
Casove vymezení definovaných směnových režimu - SR_3



Casove vymezení opakovaných směnových režimu



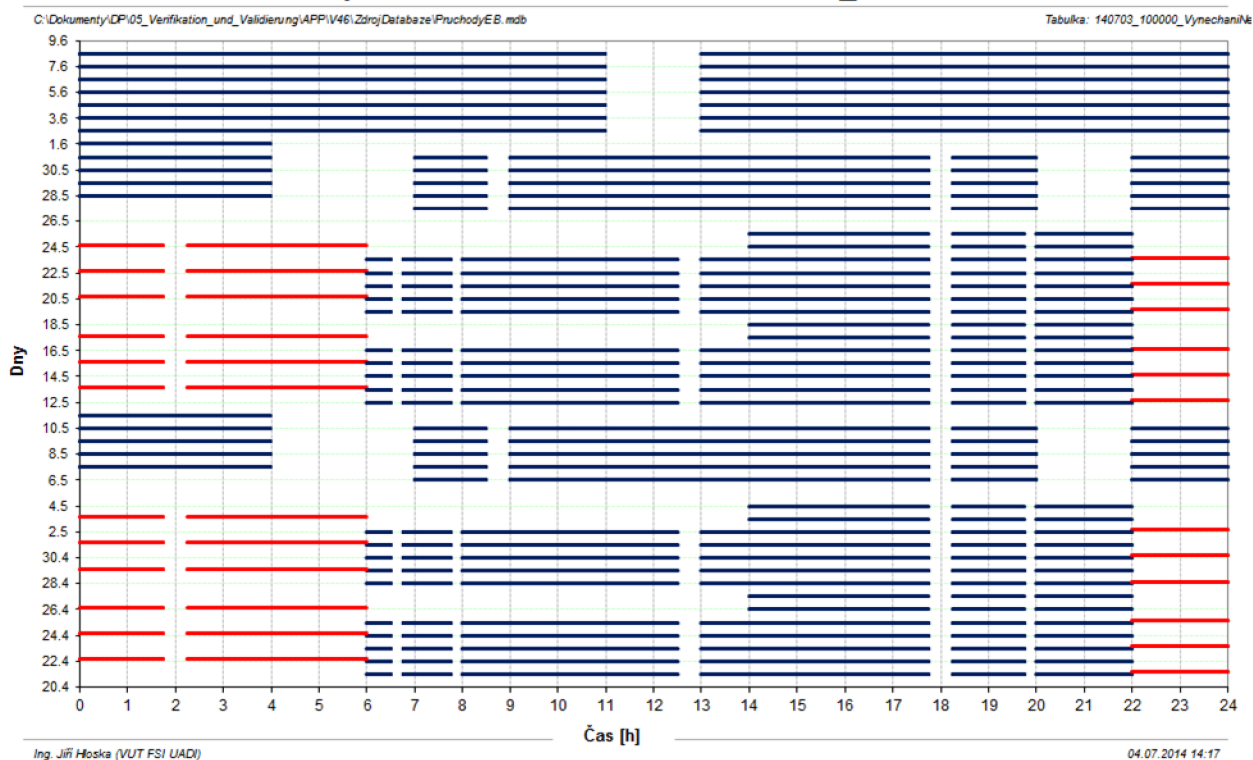
Obr. 22 Grafický výstup Generátoru průchodů evidenčními body znázorňující definované směnové režimy a jejich periodicitu, volba vynechání celých směn zasahujících do nepracovních dnů (zdroj: autor)



Obr. 23 Grafický výstup Generátoru průchodu evidenčními body znázorňující definované směnové režimy a jejich periodicitu, volba vynechání směn začínajících v nepracovní dny (zdroj: autor)

Pro variantu nastavení směnových režimů a jejich periodicity tak, jak je graficky znázorněno na Obr. 23, jsou dále uvedeny grafické výstupy analýz (provedených nástrojem APP) záznamů rekonstruovaného materiálového toku, který se definovanými pravidly řídí. Na Obr. 24 je přehled průchodů elementů rekonstruovaného materiálového toku. Na vodorovné ose grafu je vyneseno čas v rozsahu jednoho dne, tj. 0 až 24 hod, na svislé ose datum. Každý bod odpovídá průchodu konkrétního elementu materiálového toku, souřadnice bodu určují čas a datum průchodu. Červenou barvou jsou v grafu odlišeny záznamy průchodů elementů generovaných v rámci noční směny směnového režimu SR1.

Přehled průchodů evidenčním bodem >> v_NazevEB <<



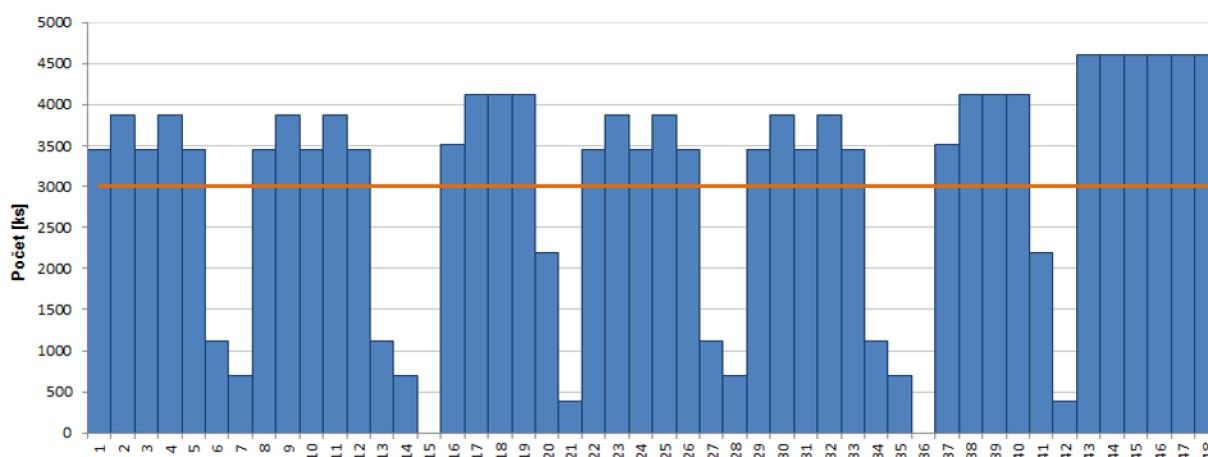
Obr. 24 Přehled průchodů rekonstruovaných Generátorem evidenčních bodů na základě zadaných pravidel pro materiálový tok (zdroj: autor)

Generátor průchodů evidenčními body dále umožňuje volit, zda má v rámci zadaného výrobního programu být dodržen takt (tedy doba mezi okamžiky generování po sobě následujících elementů materiálového toku), nebo počet elementů, které mají být v dané směně generovány. Výsledky analýzy záznamů generovaných průchodů pro obě varianty ukazují Obr. 25 a Obr. 26. Na Obr. 25 je grafický výstup aplikace APP, kde kromě statistik počtu průchodů zaznamenaných v rámci definovaných časových období (volena byla období s jednodenní periodou začínající, resp. končící v 0:00:00 hod) jsou vidět dosažené počty vygenerovaných průchodů v tato jednotlivá období. Vyhodnocované časové období zde záměrně nebylo filtrováno tak, aby zahrnovalo pouze pracovní časové intervaly (vzhledem k rekonstruovanému směnovému režimu) s cílem znázornit také období mimo směnový režim, kdy byla dosažená četnost průchodů nulová. Na Obr. 26 je vždy v pravé části grafického výstupu analýzy doby mezi průchody přehled hodnot doby mezi průchody (taktu) v dané datum (vynesené na vodorovné ose grafu), díky čemuž je možné ověřit dodržení taktů daných zadáním výrobního programu příslušnému dané směně, která v konkrétní datum probíhala. Pravá část grafického výstupu analýzy doby mezi průchody uvádí histogram zjištěných hodnot doby mezi průchody (taktu).

Popisná statistika četnosti průchodů EB >> v_NazevEB <<

C:\Dokumenty\DP\05_Verifikation_und_Validierung\APPI\146\ZdrojDatabase\PruchodyEB.mdb

Tabulka: 140703_100000_VynechaniNe



Časové rozpětí

Průměrná hodnota = 3004,77

Medián = 3453,00

Modus = 3453

Směr.odchylka = 1462,96

Počet = 48

Součet = 144229

1. kvartil = 1917,5

3. kvartil = 3937

Rozpětí (max.;min.) = 4609

Minimum = 0

Maximum = 4608

Nejmenší(10) = 1118

Největší(10) = 4120

Vyhodnocované období: (21.04.2014 00:00; 23.06.2014 00:00>

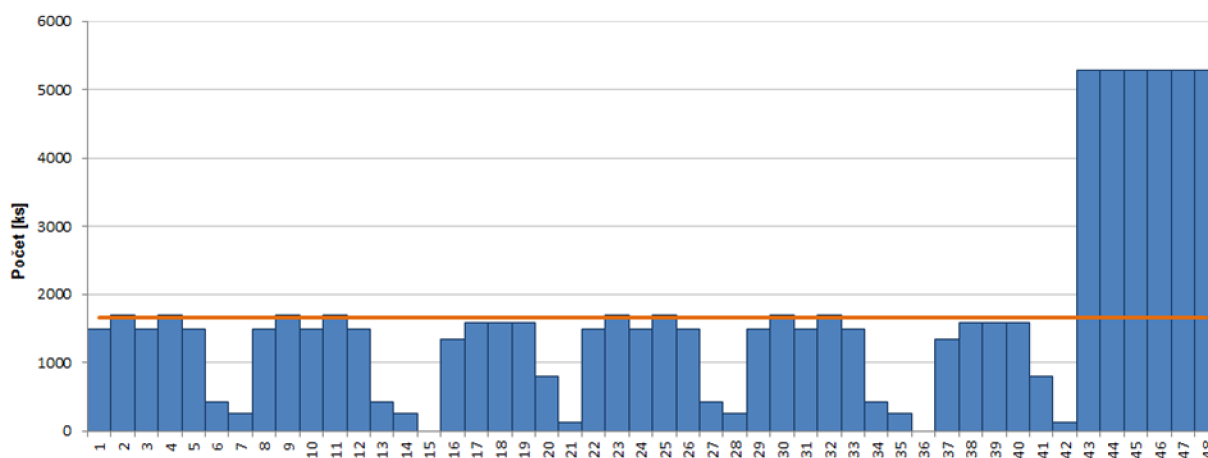
Ing. Jiří Hoska (VUT FSI UADI)

04.07.2014 14:28

Popisná statistika četnosti průchodů EB >> v_NazevEB <<

C:\Dokumenty\DP\05_Verifikation_und_Validierung\APPI\146\ZdrojDatabase\PruchodyEB.mdb

Tabulka: 140703_100000_VynechaniNe



Časové rozpětí

Průměrná hodnota = 1661,85

Medián = 1483,00

Modus = 1483

Směr.odchylka = 1494,15

Počet = 48

Součet = 79769

1. kvartil = 700,5

3. kvartil = 1691

Rozpětí (max.;min.) = 5281

Minimum = 0

Maximum = 5280

Nejmenší(10) = 426

Největší(10) = 1691

Vyhodnocované období: (21.04.2014 00:00; 23.06.2014 00:00>

Ing. Jiří Hoska (VUT FSI UADI)

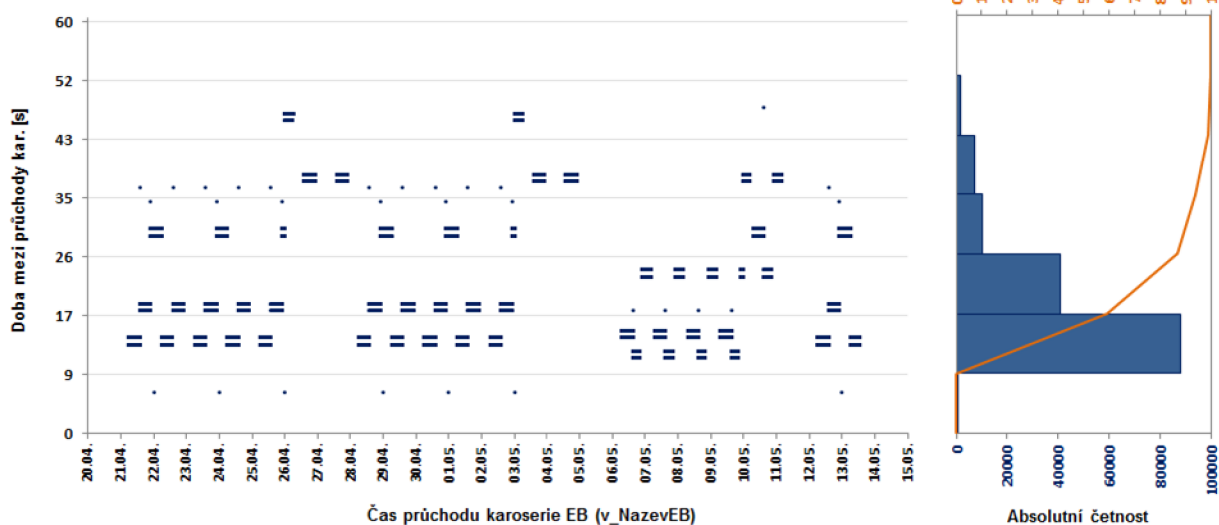
04.07.2014 14:38

Obr. 25 Výsledek analýzy četnosti generovaných průchodů při dodržení zadaného počtu elementů pro každou směnu (nahore), resp. taktu v každé směně (dole) (zdroj: autor)

Analyza doby mezi průchody objektů EB >> v_NazevEB << za dané období

C:\Dokumenty\DP\05_Verifikation_und_Validierung\APP\IV46\Zdroj\Database\PruchodyEB.mdb

Tabulka: 140703_100000_VymechaniNe



Průměrná hodnota [s] = 28
 Medián [s] = 17
 Modus [s] = 14
 Směr.odchylka [s] = 682

Počet = 148835
 Součet [s] = 4211982
 1. kvartil [s] = 14
 3. kvartil [s] = 19

Rozpětí (max.;min.) [s] = 118832
 Minimum [s] = 06
 Maximum [s] = 118838
 Nejmenší(10) [s] = 06
 Největší(10) [s] = 28847

Vyhodnocované období: <21.04.2014 06:00; 08.06.2014 23:59>

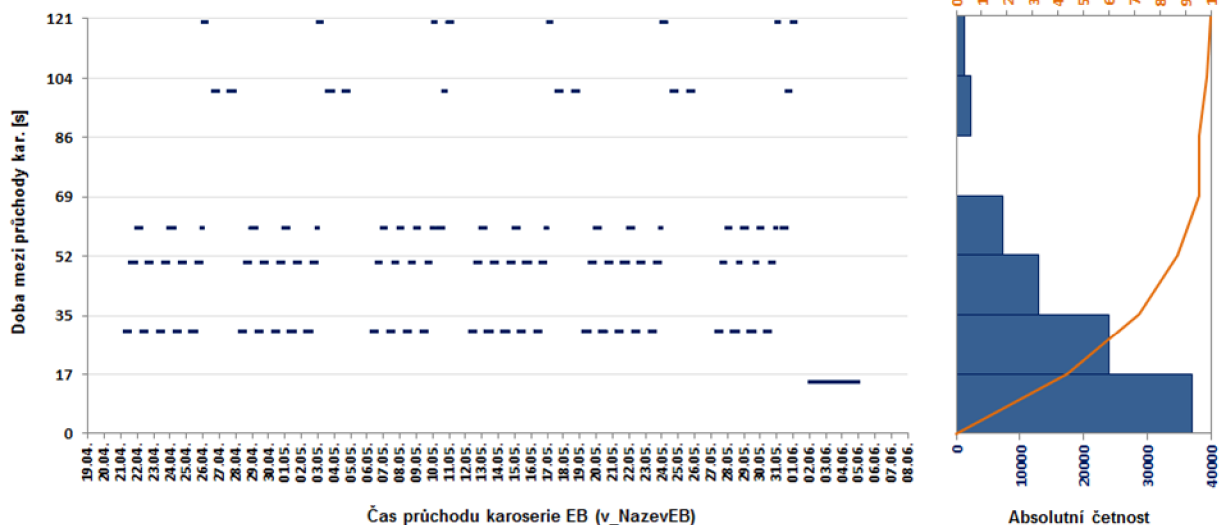
Ing. Jiří Hoska (VUT FSI UADI)

4.7.2014 14:26

Analyza doby mezi průchody objektů EB >> v_NazevEB << za dané období

C:\Dokumenty\DP\05_Verifikation_und_Validierung\APP\IV46\Zdroj\Database\PruchodyEB.mdb

Tabulka: 140703_100000_VymechaniNe



Průměrná hodnota [s] = 50
 Medián [s] = 30
 Modus [s] = 15
 Směr.odchylka [s] = 903

Počet = 85047
 Součet [s] = 4211985
 1. kvartil [s] = 15
 3. kvartil [s] = 50

Rozpětí (max.;min.) [s] = 118885
 Minimum [s] = 15
 Maximum [s] = 118900
 Nejmenší(10) [s] = 15
 Největší(10) [s] = 28900

Vyhodnocované období: <21.04.2014 06:00; 08.06.2014 23:59>

Ing. Jiří Hoska (VUT FSI UADI)

4.7.2014 14:39

Obr. 26 Výsledek analýzy doby mezi průchody generovaných elementů materiálového toku při dodržení zadaného počtu elementů pro každou směnu (nahore), resp. taktu v každé směně (dole) (zdroj: autor)

Druhá fáze validace *Generátoru průchodů evidenčními body* ověřila konkrétní realizaci metodiky rekonstrukce materiálového toku mezi dvěma různými EB. Jako vstupní data zde byly použity záznamy o průchodu EB, které byly získány na základě zadaných datových množin pro

materiálový tok přes určitý (jeden) EB. Tyto datové množiny byly zpracovány a příslušný materiálový tok byl rekonstruován a zaznamenán právě *Generátorem průchodů evidenčními body* (poté, co byla jeho odpovídající modulární část validována). Cílem následujících simulačních experimentů bylo nalezení minimální „Počáteční obsazenosti“ (viz Obr. 16), při kterém je dodržena kontinuita materiálového toku mezi oběma EB, tedy při kterém nejsou zaznamenány „Neshodné průchody“ (viz Obr. 16).

Při stejném výchozím nastavení („Počáteční obsazenost“ a iterační krok) byly validovány tři způsoby hledání optima (minimální, tj. nejvyšší nutné „Počáteční obsazenosti“) – vždy od okamžiku nalezení první takové hodnoty (v rámci zvoleného iteračního kroku), při které byl materiálový tok mezi oběma EB kontinuální:

- změna „Počáteční obsazenosti“ s krokem 10,
- změna „Počáteční obsazenosti“ daná půlením intervalu mezi dočasně nejlepší (nejnovější) vyhovující a nejmenší – z hlediska „Počáteční obsazenosti“ (poslední) nevyhovující hodnotou,
- změna „Počáteční obsazenosti“ daná počtem zaznamenaných „Neshodných průchodů“ – rozdíl „Počáteční obsazenosti“ v další iteraci je roven počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“.

Všechny tři způsoby byly testovány se stejnými vstupními daty. Vstupní data byla získána rekonstrukcí definovaných datových množin určujících směnové režimy a výrobní programy. Byly uvažovány čtyři sady datových množin:

- jeden směnový režim, jeden typ výrobku,
- jeden směnový režim, více typů výrobku,
- dva (střídající se) směnové režimy, jeden typ výrobku,
- dva (střídající se) směnové režimy, více typů výrobku.

Testy byly provedeny v těchto variantách zadání doby průchodu mezi vstupním a výstupním EB:

- konstantní doba průchodu (pro všechny typy elementů materiálového toku),
- doba průchodu daná rozptylem (histogramem) společným pro všechny typy elementů materiálového toku,
- doba průchodu daná konstantou různou pro jednotlivé typy elementů materiálového toku.

Pro jednotlivé varianty byly směnové režimy a jejich periodičita, a dále příslušný výrobní program definován tak, jak ukazují následující snímky – Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29 a Obr. 30.

ShiftPlan	ShiftName	From	Till	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Breaks
TriSmeny	Smena_1	6:30:00	14:30:00	true	true	true	true	true	true	true	07:30-08:45; 12:45-13:15
	Smena_2	14:30:00	22:30:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15; 19:45-20:00
	Smena_3	22:30:00	6:30:00	true	true	true	true	true	true	true	01:45-02:30

ShiftPlan	Opakovani
TriSmeny	4

ShiftName	Den v tydnu	Typy	Pomer	Takty [s]	Pocet
Smena_1	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Smena_2	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Smena_3	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500

ShiftName	Den v tydnu	Typy	Pomer	Takty [s]	Pocet
Smena_1	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700
Smena_2	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700
Smena_3	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700

Obr. 27 Směnový režim (vlevo nahoře), jeho periodičita (vlevo dole) a výrobní program pro jeden (vpravo nahoře) a dva různé výrobky (vpravo dole) definovaný pro validační testy (zdroj: autor)

ShiftPlan	ShiftName	From	Till	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Breaks
TriSmeny	Smena_1	6:00:00	14:00:00	true	true	true	true	true	true	true	06:30-06:45; 12:30-13:00
	Smena_2	14:00:00	22:00:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15; 19:45-20:00
	Smena_3	22:00:00	6:00:00	true	true	true	true	true	true	true	01:45-02:30
DveSmeny	Rano	7:00:00	15:00:00	true	true	true	true	true	true	true	08:30-09:00
	Odpoledne	15:00:00	20:00:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15

ShiftName	Den v tydnu	Typy	Pomer	Takty [s]	Pocet
Smena_1	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Smena_2	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Smena_3	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Rano	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500
Odpoledne	Mon	A	100	60	1500
	Tue	A	100	60	1500
	Wed	A	100	60	1500
	Thu	A	100	60	1500
	Fri	A	100	60	1500
	Sat	A	100	60	1500
	Sun	A	100	60	1500

ShiftPlan	Opakovani
TriSmeny	1
DveSmeny	1
TriSmeny	1
DveSmeny	1

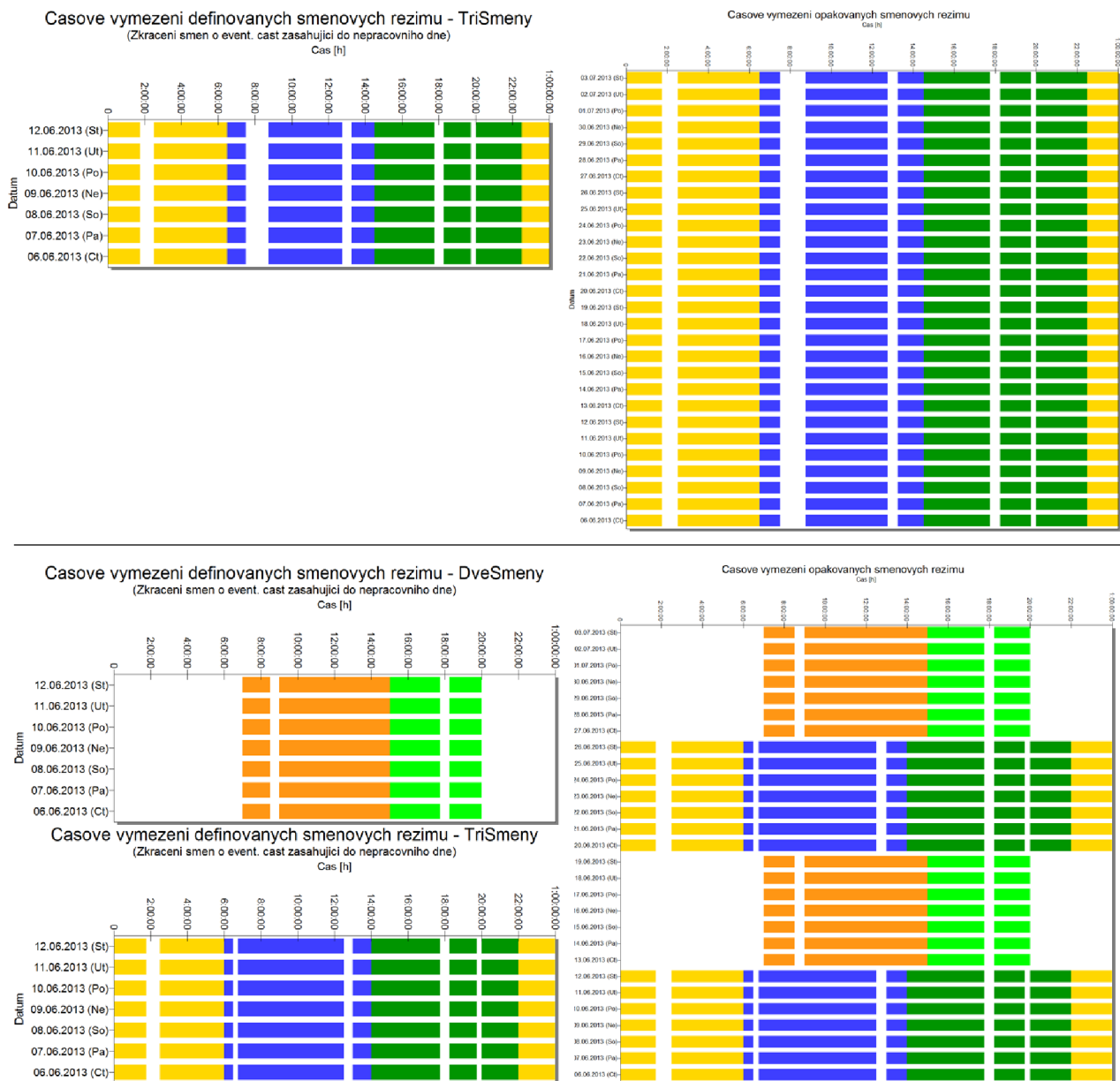
Obr. 28 Dva různé směnové režimy (vlevo), jejich periodicitu (dole) a výrobní program pro jeden výrobek pro oba režimy (vpravo) definovaný pro validační testy (zdroj: autor)

ShiftPlan	ShiftName	From	Till	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Breaks
TriSmeny	Smena_1	6:00:00	14:00:00	true	true	true	true	true	true	true	06:30-06:45; 12:30-13:00
	Smena_2	14:00:00	22:00:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15; 19:45-20:00
	Smena_3	22:00:00	6:00:00	true	true	true	true	true	true	true	01:45-02:30
DveSmeny	Rano	7:00:00	15:00:00	true	true	true	true	true	true	true	08:30-09:00
	Odpoledne	15:00:00	20:00:00	true	true	true	true	true	true	true	17:45-18:15

ShiftName	Den v tydnu	Typy	Pomer	Takty [s]	Pocet
Smena_1	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700
Smena_2	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700
Smena_3	Mon	A;B	65:35	40;60	800;700
	Tue	A;B	65:35	40;60	800;700
	Wed	A;B	65:35	40;60	800;700
	Thu	A;B	65:35	40;60	800;700
	Fri	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sat	A;B	65:35	40;60	800;700
	Sun	A;B	65:35	40;60	800;700
Rano	Mon	A;C	40:60	70;30	650;750
	Tue	A;C	40:60	70;30	650;750
	Wed	A;C	40:60	70;30	650;750
	Thu	A;C	40:60	70;30	650;750
	Fri	A;C	40:60	70;30	650;750
	Sat	A;C	40:60	70;30	650;750
	Sun	A;C	40:60	70;30	650;750
Odpoledne	Mon	B;C	50:50	60;60	700;700
	Tue	B;C	50:50	60;60	700;700
	Wed	B;C	50:50	60;60	700;700
	Thu	B;C	50:50	60;60	700;700
	Fri	B;C	50:50	60;60	700;700
	Sat	B;C	50:50	60;60	700;700
	Sun	B;C	50:50	60;60	700;700

ShiftPlan	Opakovani
TriSmeny	1
DveSmeny	1
TriSmeny	1
DveSmeny	1

Obr. 29 Dva různé směnové režimy (vlevo), jejich periodicitu (dole) a výrobní program pro více různých výrobků (vpravo) definovaný pro validační testy (zdroj: autor)



Obr. 30 Grafický výstup Generátoru průchodů evidenčními body znázorňující definovaný jediný směnový režim a jeho periodicitu (horní část) a více směnových režimů a jejich periodicitu (spodní část) pro validační testy (zdroj: autor)

Pro všechny prováděné experimenty byly zvoleny stejné počáteční podmínky, tedy „Počáteční obsazenost“ při spuštění iteračního procesu hledání optimální „Počáteční obsazenosti“ mezi dvěma různými EB (tak, aby byla zachována podmínka kontinuity materiálového toku), konkrétně „Počáteční obsazenost“ rovna 20 elementům materiálového toku.

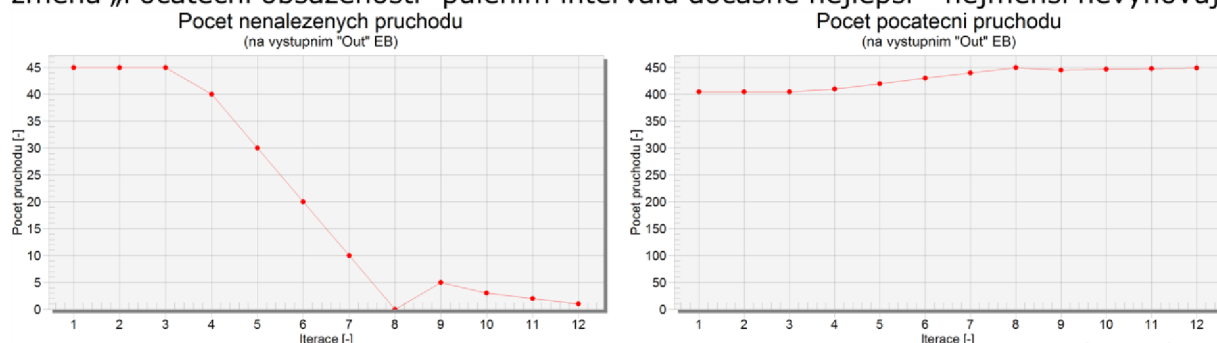
Pro ilustraci výsledků simulačních experimentů je na Obr. 31 zachyceno srovnání nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ pro tři výše zmíněné algoritmy - změna „Počáteční obsazenosti“ s krokem 1, změna „Počáteční obsazenosti“ daná půlením intervalu mezi dočasně nejlepší (nejnovější) vyhovující a nejmenší, změna „Počáteční obsazenosti“ daná počtem zaznamenaných „Neshodných průchodů“. Grafy na levé straně zachycují, jak klesal počet „Neshodných průchodů“ (viz Obr. 16) v jednotlivých iteracích podle zvoleného algoritmu hledání optimální „Počáteční obsazenosti“ (která zaručí nulový počet „Neshodných průchodů“ a tedy kontinuální materiálový tok mezi dvěma EB – samozřejmě v závislosti na nastavené době

průchodu a definovaných směnových režimech). Grafy na pravé straně zachycují, jak rostl počet „Počátečních průchodů“ (viz Obr. 16), tedy průchodů zachycených dříve na výstupním EB než na vstupním EB, které je tedy třeba odfiltrout (nelze je uvažovat pro příp. další simulační experimenty, resp. analýzy). Také zde konkrétní hodnoty zřejmě závisí na nastavených parametrech, zejména době průchodu mezi oběma EB a směnových režimech (včetně jejich periodicity).

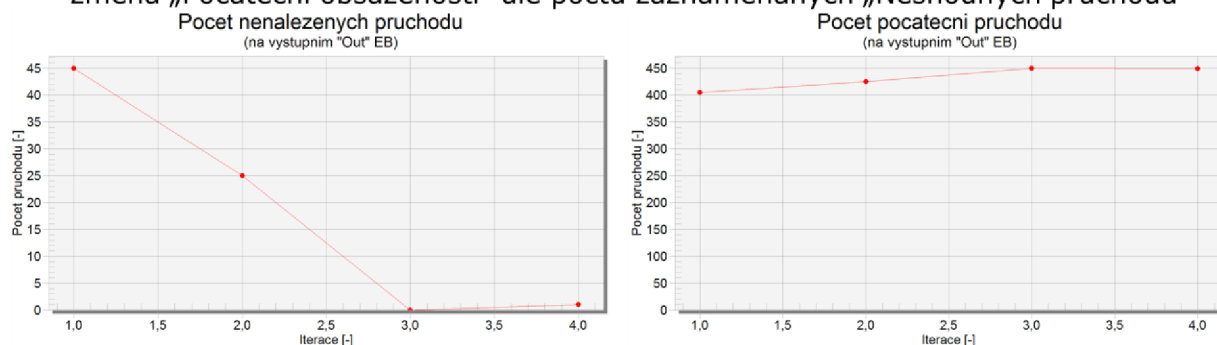
Analogicky je dále na Obr. 32 znázorněna série výsledků stejných simulačních experimentů. Jediný rozdíl je, že zde na vodorovné ose grafů není vyneseno pořadí iterace, nýbrž hledaná „Počáteční obsazenost“ pro zaručení plynulé návaznosti materiálového toku. Porovnáním obou sérií grafů je patrný také princip porovnávaných optimalizačních algoritmů.



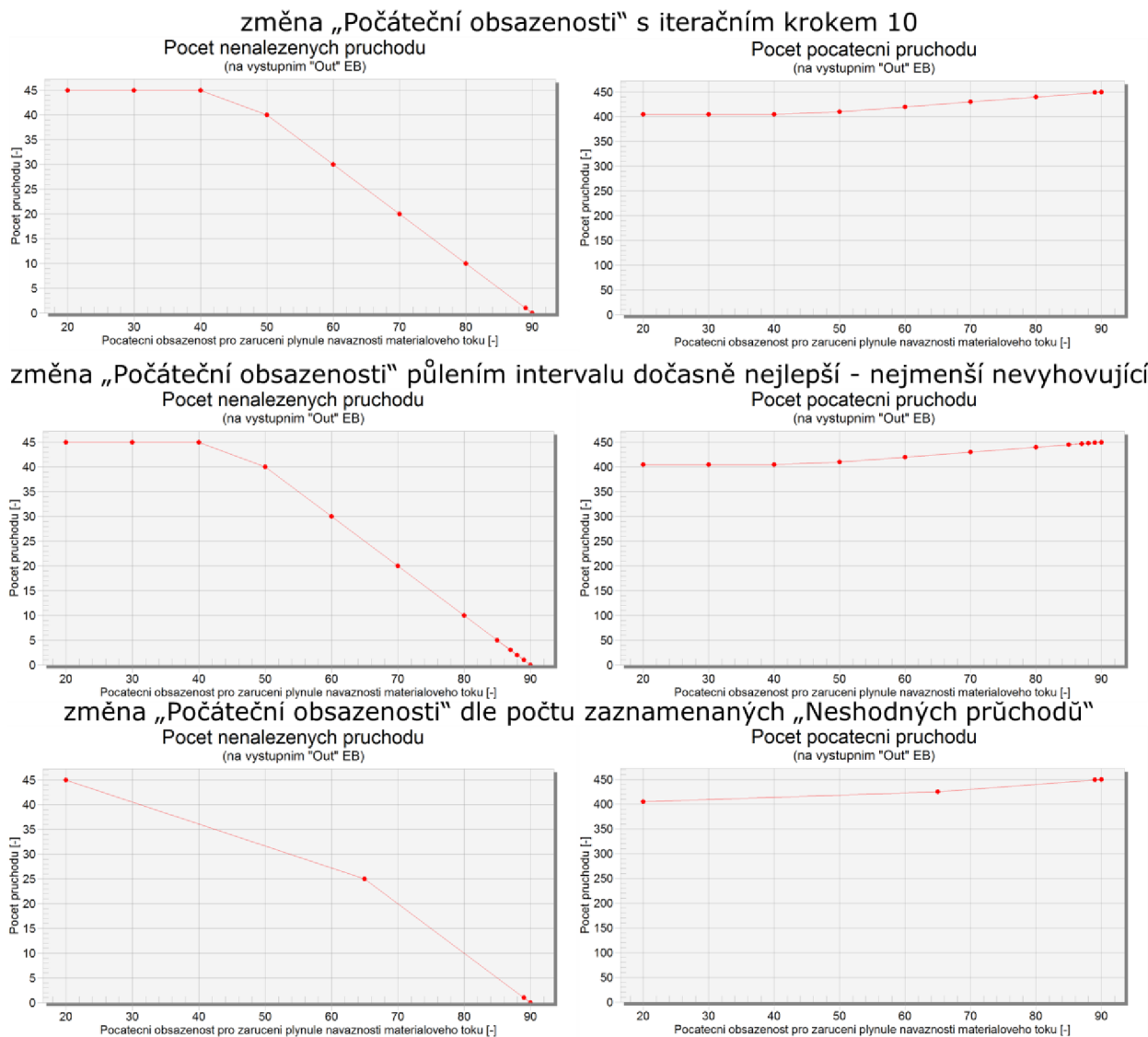
změna „Počáteční obsazenosti“ půlením intervalu dočasně nejlepší - nejmenší nevyhovující



změna „Počáteční obsazenosti“ dle počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“



Obr. 31 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – porovnání algoritmů, vztaženo na pořadí iterací (zdroj: autor)



Obr. 32 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – porovnání algoritmů, vztaheno na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)

Další grafy s výsledky hledání nejnižší možné „Počáteční obsazenosti“ pro dodržení kontinuity materiálového toku vychází z definice jednoho, resp. dvou různých směnových režimů a výrobního programu příslušného těmto směnovým režimům s více různými výrobky (kde je možné využít definice typově závislých dob průchodu mezi EB). Tyto grafy jsou uvedeny v přílohové části práce.

5.2 DALŠÍ MOŽNÝ VÝVOJ

Další potenciální vývoj navržené metodiky lze konkrétně navrhnout, ověřit a tím tedy realizovat výhodně pomocí výše popsaných metamodelů, které byly k tomuto účelu vytvořeny.

V případě *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* je možné doplnit tento metamodel o databázi hodnot prostojů (jejich četnosti a doby trvání) typických pro jednotlivé provozy velkosériových výrobních podniků (lisovna, svařovna, lakovna, montáž, distribuční sklad, atd.). Propojením analyzátoru záznamů s touto (znalostní) databází by bylo možné na základě

rozboru dat se záznamy materiálového toku (s jistou pravděpodobností/mírou jistoty) rozhodnout o povaze provozu, z jakého data pocházejí.

V případě *Generátoru průchodů evidenčními body* je díky modulární architektuře modelu možný (předpokládaný) další vývoj tohoto metamodelu. Těžiště tohoto vývoje bude spočívat v návrhu a porovnání různých algoritmů zohledňujících poměr více typů elementů materiálového toku (výrobků/polotovarů) v rámci definice výrobního programu. Dalším potenciálem je zohlednění zadané pohotovosti (nižší než 100%), aby metamodel generoval materiálový tok blízký podmínkám reálných provozů.

Konečně je vhodné využít možné závislosti mezi souvisejícími charakteristikami materiálového toku a generovat tak materiálový tok více (souvisejícími) evidenčními body se zohledněním obsazenosti (počtu elementů materiálového toku) mezi těmito body, dobou průchodu atd. Tímto směrem je zaměřena částečně následující kapitola, která popisuje výsledky testovaných závislostí různých charakteristik materiálového toku.

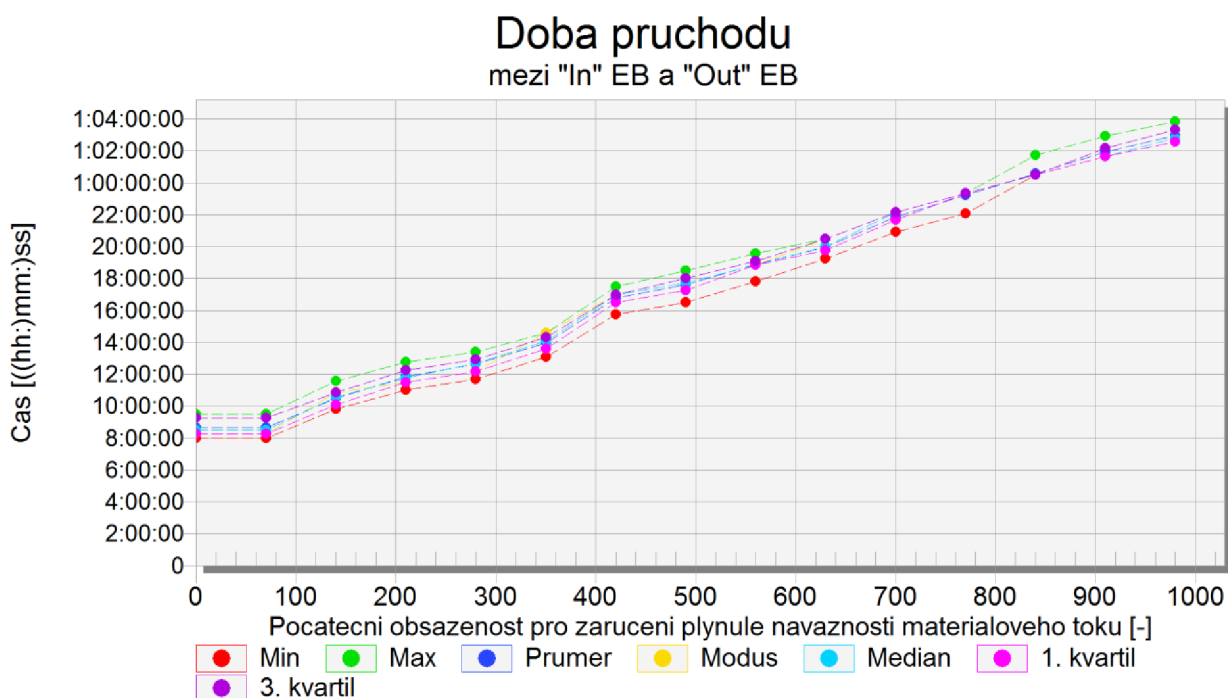
6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

V rámci experimentálního ověření navržených metodik rekonstrukce, resp. generování materiálového toku bylo postupováno v několika na sebe navazujících krocích. V každém z těchto kroků byla provedena série simulačních experimentů pomocí k tomuto účelu speciálně vytvořených simulačních modelů. Kromě toho ve fázi validace vytvořených modelů popsanych v předchozí kapitole (simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů a generátor průchodů evidenčními body) byly tyto modely testovány pomocí sady dat.

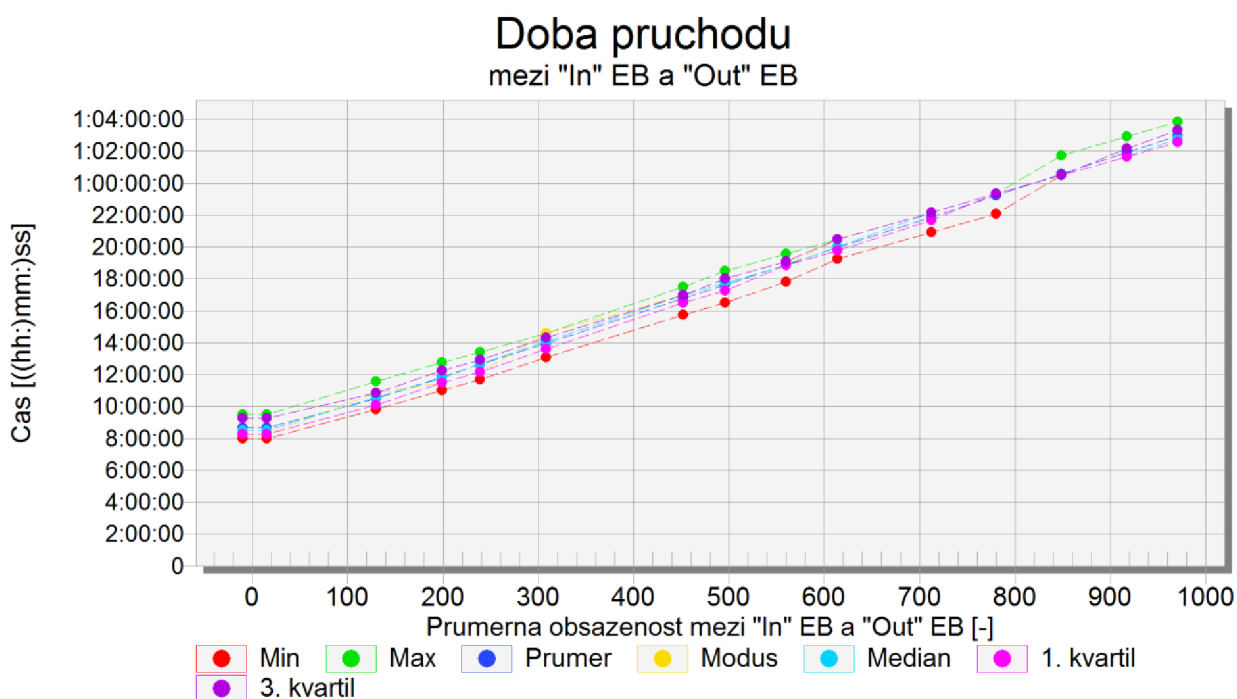
V případě *Metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* to byly záznamy o průchodech elementů materiálového toku evidenčními body. Tyto záznamy pocházely jednak z detailních simulačních modelů vybraných provozních úseků podniku zaměřeného na velkosériovou výrobu, a také částečně přímo z těch provozů, kde jsou elektronickým systémem průchody elementů materiálového toku přes EB zaznamenávány.

V případě *Generátoru průchodů evidenčními body* byly provedeny validační experimenty ve dvou fázích – v souladu s rozlišením metodiky do oblasti generování materiálového toku z jednoho EB a generování materiálového toku mezi dvěma EB (toto rozlišení bylo zavedeno v kapitole 5.1.2).

Pokud jde o experimenty týkající se druhé části metodiky, tedy generování materiálového toku mezi dvěma různými EB, kromě již uvedených experimentů spočívajících v hledání nejnižší možné „Počáteční obsazenosti“ pro zachování kontinuity materiálového toku mezi těmito EB (viz kapitola 5.1.2) byla dále sledována závislost doby průchodu mezi EB na nastavené „Počáteční obsazenosti“, resp. s ní související výsledné průměrné obsazenosti mezi vstupním a výstupním EB. Výsledky těchto experimentů pro konkrétní příklad počátečního nastavení (jeden směnový režim a výrobní program s jediným výrobkem – viz Obr. 27 a Obr. 30 horní část) ukazují Obr. 33 a Obr. 34:



Obr. 33 Závislost doby průchodu na nastavené počáteční obsazenosti pro zaručení plynulé návaznosti materiálového toku mezi EB (zdroj: autor)



Obr. 34 Závislost doby průchodu na průměrné obsazenosti pro zaručení plynulé návaznosti materiálového toku mezi EB (zdroj: autor)

Oba grafy naznačují, že zde existuje těsná závislost (blízká přímé úměrnosti) mezi porovnávanými charakteristikami. Jak je uvedeno dále, tato teze byla předmětem dalšího zkoumání.

Kromě simulačních experimentů prováděných s *Metamodelem pro rekonstrukci logistických procesů* a s *Generátorem průchodů evidenčními body* byl dále navržen *testovací simulační model* ověřující možnou existenci vzájemné závislosti hodnot charakteristik materiálového toku. Prvním krokem zde bylo vytipování signifikantních charakteristik materiálového toku, a to z pohledu jejich souvislosti s nejčastěji volenými cílovými funkcemi při řešení simulačních studií. Těmito funkcemi jsou:

- **Produkce vztážená na zvolené časové období** – nejčastěji denní či hodinová produkce, resp. produkce za směnu. Jde o funkci související s charakteristikami průchodnost [$\text{ks}\cdot\text{s}^{-1}$], resp. četnost průchodů EB za sledované období [$\text{ks}\cdot\text{s}^{-1}$], kde zvolený EB je z pohledu směru materiálového toku výstupním bodem sledovaného systému (viz kapitola 4.1.1). Při řešení simulačních studií je tato funkce obvykle maximalizační.
- **Nutná kapacita/obsazenost** (navrhovaného zásobníku či jiné logistické oblasti) – při zohlednění dynamického chování hladiny zásob, resp. počtu elementů materiálového toku vyskytujících se v hranicích vymezujících navrhovaný zásobník (oblast) je určena rozdíl maximální a minimální zjištěné obsazenosti zásobníku (oblasti) s event. přičtením pojistných zásob. Jde o funkci související s charakteristikou obsazenost objektů mezi dvěma EB [ks] (viz kapitola 4.1.1). Při řešení simulačních studií je tato funkce obvykle minimalizační.
- **Doba průchodu** – v některých případech bývá sledována i tato charakteristika, obvykle se pak jedná o funkci minimalizační (kdy je cílem urychlit příslušný logistický/výrobní proces). Význam má také v případě řízení dodávek pro montážní linku v režimu JIT, kdy je

třeba znám čas příchodu polotovaru (podsestavy hotového výrobku) k určenému místu zástavby, na kterém musí být ve správný čas (a správném množství a obvykle také ve správné sekvenci – poté se jedná o režim JIS) připraven příslušný montážní díl.

Dalším krokem bylo navrhnout sérii experimentů realizovaných následně pomocí *testovacího simulačního modelu* s cílem ověření možné vzájemné závislosti hodnot vytipovaných charakteristik. V této fázi tedy byla navržena matice experimentů, v rámci kterých byly měněny ve stanovených rozmezích vstupní proměnné, jejichž hodnoty určovaly charakter logistického systému (obecně SHO) reprezentovaného *testovacím simulačním modelem*. Ten změnu všech těchto parametrů stejně jako automatické provedení simulačních experimentů a export výsledných hodnot sledovaných veličin mimo použitý simulační SW Plant Simulation (verze 10.0) pro účely dalšího statistického vyhodnocení umožňuje. Jeho struktura, která je zachycená na Obr. 35, přitom odpovídá obecnému uzavřenému SHO typu $A|B|1|K|1|FIFO$ (viz Kendallova klasifikace SHO zmíněná v kapitole 4.1.2 a obecné označení SHO viz rovnice (12)). Právě povaha vstupů požadavků A (hodnota charakteristiky „intenzita vstupů“, resp. „doba mezi příchody požadavků“) do fronty před obslužnou stanicí, povaha obsluhy B (doba mezi průchody požadavků obslužnou stanicí) stejně jako počet požadavků v systému K (tedy max. délka fronty před obslužnou stanicí) jsou parametry, jejichž hodnoty byly v rámci navržené matice experimentů měněny. Obslužnou stanicí zde představuje prvek „CycleTime_Out“, ze kterého mohou odcházet požadavky buď v přímém směru materiálového toku (tedy v rámci hlavní smyčky), nebo do zpětné smyčky, ze které se po definovatelném zdržení zařazují přednostně opět do fronty požadavků před obslužnou stanicí. Takto je simulován proces obvyklý ve výrobních systémech u mnoha technologických procesů (strojů a zařízení / pracovníkem pro kontrolou kvality), kdy výstupy příslušné operace mohou kvalitativně podléhat náhodným vlivům a vznikat tak neshodné díly (polotovary), u kterých je nutné příslušný technologický proces opakovat.

Ovladač simulačních experimentů obsahující matici experimentů

Záznam simuloovaných průchodů elementů mat. toku EB pro externí analýzu

Export zaznamenaných hodnot sledovaných charakteristik

The screenshot displays a simulation environment with several key components:

- Control Panel (Top Left):** Includes buttons for 'EventController', 'Reset', 'Init', 'EndSim', and 'ExperimentManager'.
- Process Flow Diagram (Center):** A network of nodes and connections representing material flow. Nodes include 'Source', 'CycleTime_In', 'InEB', 'PlaceBuffer_In', 'PlaceBuffer_Out', 'FlowControl', 'PlaceBuffer_Between', 'OutEB', 'CycleTime_Out', 'Drain', 'In', 'Out', 'n_InCT', 'm_InRecord', 'In_ShiftCalendar', 'n_OutRecord', 'm_OutCT', 'Out_ShiftCalendar', and 'CycleTime_Dummy'.
- Mat. flow records (Top Middle):** A window for setting the .mdb file and table name for data collection (EB_ODBC_01).
- Results Save (Top Right):** A window for saving results to a file (v_Path: string=C:\Dokumenty\DP\06_Experimente\Results_CC).
- Input parameters settings (Middle):** A window for configuring various simulation parameters, including:
 - v_ReturnRatio:real=0.5
 - v_Capacity_In:integer=1
 - v_Capacity_In_Out:integer=20
 - v_Capacity_Out:integer=20
 - v_FIFO:boolean=true
 - v_ThroughputTime_In_Out:time=1:00.0000
 - v_ThroughputTime_Out_In:time=2:00.0000
 - v_In_ShiftCalendarUsed:boolean=false
 - v_Out_ShiftCalendarUsed:boolean=false
 - v_In_BreakDownsActive:boolean=false
 - v_Out_BreakDownsActive:boolean=false
 - v_In_Out_BreakDownsActive:boolean=false
 - v_In_Takt:time=1:00.0000
 - v_Out_Takt:time=30.0000
 - v_NumberOfObjects:integer=1
 - v_NumberOfObjects1:integer=10
- Parametrizace testovacího simulačního modelu (Bottom Right):** A section for configuring distribution types (Erlang, Uniform) and takt times for 'In' and 'Out' stages.

Simulace materiálového toku a záznam hodnot sledovaných charakteristik

Obr. 35 Struktura testovacího simulačního modelu (zdroj: autor)

V rámci výše zmíněné matice experimentů je možné nastavovat následující parametry:

- Počet elementů materiálového toku v systému – tedy celkový počet požadavků v systému (parametr K). Musí samozřejmě platit, že zvolená hodnota je nižší než kapacita systému (součet kapacity obslužné stanice, front před obslužnou stanicí a ve zpětné větvi – je-li voleno směřování jistého podílu materiálového toku do zpětné větve). V opačném případě dojde k zablokování materiálového toku.
- Podíl materiálového toku směřovaného zpětnou větví z obslužné stanice opět na začátek fronty před stanicí. Je možné volit hodnoty z rozsahu $< 0\%; 100\%$). Hodnota 100% by znamenala, že veškerý materiálový tok bude cirkulovat zpětnou větví. Hodnota 0% a 100% bude mít při daném uspořádání materiálového toku následek mj. 100% dodržení sekvence objektů.
- Kapacita vstupní fronty²⁸ – tedy maximální délka fronty požadavků před obslužnou stanicí.
- Kapacita zpětné větve – tedy maximální délka fronty požadavků ve zpětné větvi (které jsou přednostně řazeny na konec fronty před obslužnou stanicí).

²⁸ Na Obr. 35 znázorňujícím strukturu testovacího simulačního modelu je možné si povšimnout ještě prvku představujícího frontu před místem sloučení zpětné a hlavní vstupní větve materiálového toku před frontu požadavků. Tento prvek je záměrně v modelu pro větší flexibilitu jeho nastavení použit, jeho kapacita však byla ve všech dále popisovaných simulačních experimentech nastavena na hodnotu 1 (představoval tedy pouze kapacitu cesty uzavírající smyčku materiálového toku).

- Povaha vstupů požadavků do SHO – tedy rozdělení pravděpodobnosti hodnot taktu [s] na vstupním bodě (před začátkem fronty požadavků před obslužnou stanicí) včetně příslušných parametrů zvoleného rozdělení.
- Povaha obsluhy požadavků na stanici SHO – tedy rozdělení pravděpodobnosti hodnot taktu [s] na výstupním bodě (obslužná stanice) včetně příslušných parametrů zvoleného rozdělení.

Pro dva posledně jmenované parametry byla uvažována tato možná rozdělení pravděpodobnosti (a jim odpovídající typy SHO, resp. jejich parametry A , B v souladu s Kendallovou notací):

- Exponenciální, tj. $A = M$, resp. $B = M$
- Erlangovo, tj. $A = E_K$, resp. $B = E_K$
- Obecné (\sim rovnoměrné), tj. $A = G$, resp. $B = G$
- Diracovo (konstantní hodnota), $A = D$, resp. $B = D$

Samotná volba typů rozdělení pravděpodobnosti určující povahu vstupů požadavků do SHO a obsluhy těchto požadavků dává $2^4 = 16$ možností zadání. Protože další parametry jsou z oboru reálných, resp. přirozených čísel, je celkový počet variant (teoreticky) nekonečný (což platí i s přihlédnutím k výše uvedeným omezením vzájemných kombinací, zejména pokud jde o kapacity front). V provedených simulačních experimentech, jejichž postup a výsledky jsou diskutovány dále, byly voleny takové parametry rozdělení pravděpodobnosti povahy vstupů požadavků do SHO a obsluhy těchto požadavků, které splňovaly podmínku rovnosti středních hodnot těchto rozdělení. To znamená, že v ustáleném stavu není doba obsluhy ani doba čekání požadavků ve frontě (resp. související ukazatele produkce vztažené na zvolené časové období, nutná kapacita/obsazenost, ani doba průchodu) ovlivněna vzájemnou interakcí fronty požadavků a obslužné stanice danou tím, že se jedná o uzavřený SHO. Pro simulační experimenty byla zvolena střední hodnota těchto parametrů o velikosti 60 s, avšak jak je vysvětleno v následujícím odstavci, díky zavedení vztahů pro transformaci sledovaných hodnot signifikantních charakteristik na relativní je vliv konkrétní hodnoty tohoto parametru na výsledky simulačních experimentů eliminován.

Zbývající parametry, které byly v rámci simulačních experimentů měněny, byly voleny v následujícím rozsahu:

- Počet elementů materiálového toku v systému ...v hodnotách {1, ..., 20}
- Podíl materiálového toku směřovaného zpětnou větví z obslužné stanice ...v hodnotách {0%, 2%, ..., 50%}
- Kapacita vstupní fronty ...nastavena na neměnné hodnotě 20 ks
- Kapacita zpětné větve ...nastavena na neměnné hodnotě 20 ks

Pro vyhodnocení výstupů simulačních experimentů, tedy hodnot sledovaných signifikantních charakteristik materiálového toku, byla navržena šablona a související datové listy (v MS Excel 2010), díky kterým je možné v grafické podobě znázornit míru vzájemné závislosti a vybrané statistiky těchto charakteristik. (Absolutní) hodnoty signifikantních charakteristik pochopitelně závisí na zvolených hodnotách vstupních parametrů (kterými jsou počet elementů

materiálu v systému, kapacita vstupní fronty a zpětné větve a také parametry rozdělení pravděpodobnosti hodnot určujících povahu vstupů požadavků a jejich obsluhy). Z tohoto důvodu byly v rámci zmíněných datových listů veškeré hodnoty sledovaných signifikantních charakteristik převedeny na relativní podle následujících vztahů (68), (74) a (75):

Nutná kapacita (obsazenost) → Celková relativní obsazenost

$$CRO_i = 100 \cdot \frac{RO_i / \max_{i=1, \dots, n_p} RO_i}{\max_{i=1, \dots, n_p} RO_i} [\%] \quad (68)$$

kde:

- CRO_i [%] je celková relativní obsazenost (celého simulovaného SHO, tj. fronty požadavků a obslužné stanice) zjištěná při i -tém pozorování (celkem byly provedeny 3 replikace pro každou posuzovanou alternativu / variantu kombinace hodnot vstupních parametrů),
- i je číslo pozorování ($i = \{1, \dots, n_p\}$, kde pozorováním je zde myšlena jedna z replikací konkrétní posuzované alternativy/varianty kombinace hodnot vstupních parametrů),
- n_p je celkový počet pozorování (tedy dle výše uvedeného platí $i = 3 \cdot m_K$ pro m_K kombinací hodnot vstupních parametrů, v rámci simulačních experimentů byly pro každou kombinaci opakovány 3 replikace),
- RO_i [%] je relativní obsazenost simulovaného SHO bez (obslužné stanice) zjištěná při i -tém pozorování; pro RO_i platí:

$$RO_i = \frac{\sum_{j=1}^{p_{TSM}} RO_{sj} \cdot K_j}{\sum_{j=1}^{p_{TSM}} K_j} [-] \quad (69)$$

kde

- p_{TSM} [-] je počet prvků v *testovacím simulačním modelu*, na kterých je relativní obsazenost výše uvedeným způsobem v rámci simulačních experimentů zjišťována ($p = 2$, neboť relativní obsazenost byla sledována na dvou prvcích – prvek simulující frontu požadavků před obslužnou stanicí a prvek simulující samotnou obslužnou stanicí),
- RO_{sj} [%] je relativní obsazenost (j -tého prvku) zjištěná v rámci simulačních experimentů *testovacím simulačním modelem* (jako hodnota atributu *statoccupiedportion* sledovaných prvků v modelu),
- K_j [-] je kapacita prvků *testovacího simulačního modelu*, na kterých byla tímto způsobem sledována jejich relativní obsazenost.

Relativní obsazenost sledovaného (j -tého) prvku zjištěná v rámci simulačních experimentů *testovacím simulačním modelem* (jako návratová hodnota sledovaného atributu daných prvků podporovaného použitým SW Plant Simulation) je (interně použitým simulačním SW) počítána dle vztahu:

$$RO_{sj} = \frac{\sum_{t=1}^l (\Delta t_t)_j \cdot (pp_t)_j}{K_j \cdot T_o} [-] \quad (70)$$

kde

- $(\Delta t_t)_j$ [s] je délka t -tého časového intervalu, po který byl j -tý prvek zaplněn (obsazen) $(pp_t)_j$ elementy materiálového toku, přičemž I je celkový počet intervalů v rámci sledovaného období (jejich počet závisí kromě délky sledovaného období také na četnosti, s jakou se mění aktuální počet elementů materiálového toku ve sledovaném prvku),
- $(pp_t)_j$ [-] je počet elementů materiálového toku vyskytujících se v daném prvku po čas trvání intervalu Δt_{t_j} ,
- K_j [-] je celková kapacita sledovaného prvku,
- T_o [s] je sledované období (zřejmě platí $T_o = \sum_{t=1}^I \Delta t_t$).

V případě sledované hodnoty relativní obsazenosti je výstupem simulačního modelu tedy vždy relativní obsazenost konkrétního prvku (zjištěná na základě výše uvedeného vztahu), nikoliv relativní obsazenost systému sestávajícího z více prvků. Vztah pro určení relativní obsazenosti systému (zde SHO) je dán rovnicí (69). Obecnou platnost tohoto vztahu lze dokázat následovně (pomocí důkazu přímého, který spočívá v odvození série platných implikací, které vychází z úvodního elementárního pravdivého tvrzení/výroku a které končí pravdivou implikací výroku, který chceme dokázat):

- 1) Mějme p prvků simulačního modelu, z nichž každý má zjištěnou (známou) hodnotu relativní obsazenosti RO_{s_j} ($j = 1, \dots, p$). Pro tuto relativní obsazenost platí vztah (70) uvedený výše.
- 2) Časový průběh obsazenosti každého prvku je obdélníková funkce vyjadřující aktuální počet prvků pp_{t_j} vyskytujících se v j -tém prvku po dobu intervalu Δt_{t_j} (délka intervalu Δt_{t_j} je základnou obdélníku o výšce pp_{t_j} , ze kterých se daná funkce skládá. Časový průběh obsazenosti systému sestávajícího ze všech p_{TSM} prvků je rovněž obdélníková funkce, která je rovna součtu funkcí časového průběhu obsazenosti jednotlivých prvků. To naznačuje Obr. 36, ve kterém je schematicky zachycen příklad časového průběhu hladiny zásob (počtu elementů materiálového toku) j prvků a časového průběhu hladiny zásob systému, který se z těchto prvků skládá (grafy nejsou v měřítku, jde pouze o schematické znázornění). Jak bylo uvedeno výše a jak je uvedeno rovněž na obrázku, hladina zásob systému jako funkce času, tedy $pp_s(t)$ je rovna součtu funkcí času zachycujících aktuální hladinu zásob jednotlivých prvků, neboli

$$pp_s(t) = \sum_{j=1}^p pp_j(t) \quad (71)$$

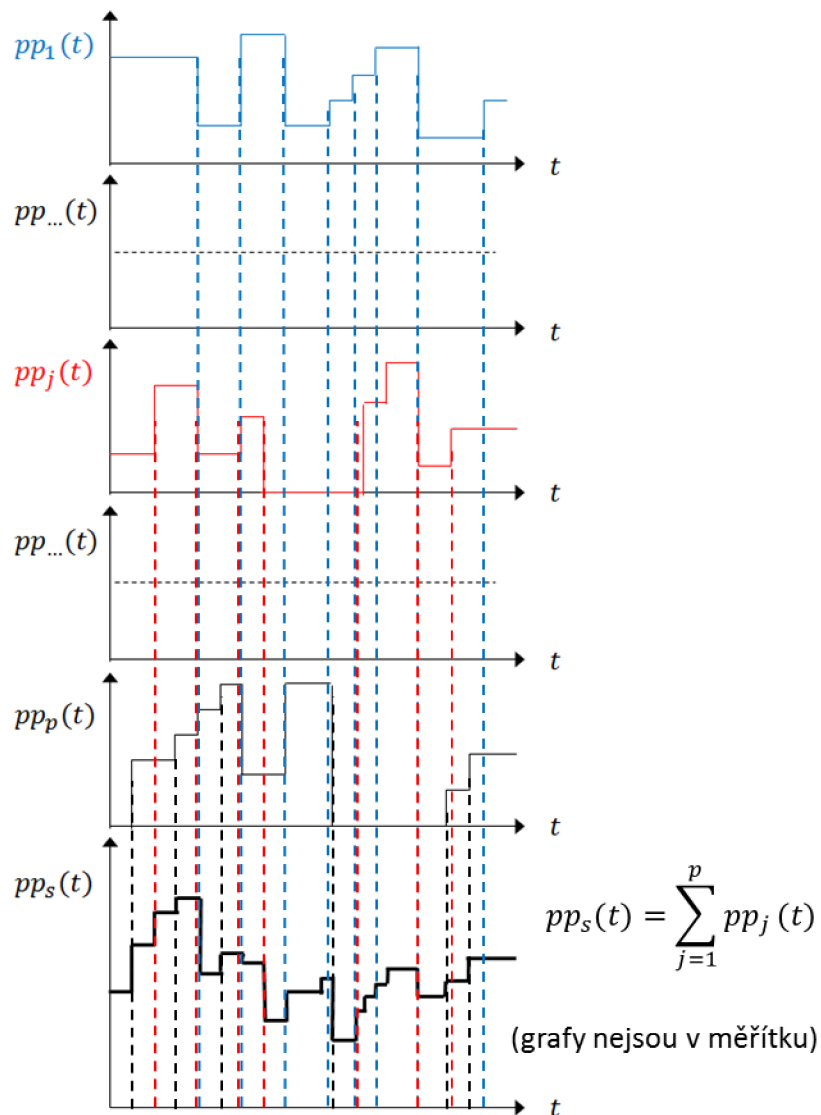
- 3) Vyjdeme-li dále z rovnice (70) pro relativní obsazenost (jednotlivých) sledovaných prvků, musí analogicky platit pro celý systém (těchto prvků) vztah:

$$RO = \frac{\sum_{t=1}^I (\Delta t_t)_s \cdot (pp_t)_s}{K \cdot T_o} = \frac{\sum_{t=1}^I \left((\Delta t_t)_s \cdot \left(\sum_{j=1}^p (pp_t)_j \right) \right)}{K \cdot T_o} \quad (72)$$

$$RO = \sum_{j=1}^p \frac{\sum_{t=1}^I (\Delta t_t)_s \cdot (pp_t)_j}{K \cdot T_O}$$

kde

$(\Delta t_t)_s [s]$ je délka t -tého časového intervalu, po který byl celý systém (obsazen) $(pp_t)_s$ elementy materiálového toku, přičemž I je celkový počet intervalů v rámci. Jak je vidět na Obr. 36, pro každý interval $(\Delta t_t)_s$ platí, že vymezuje období, ve kterém neproběhla změna počtu elementů v žádném prvku systému. Opět samozřejmě platí $T_O = \sum_{t=1}^I (\Delta t_t)_s$,
 $K [-]$ je celková kapacita systému, tj. $K = \sum_{j=1}^p K_j$.



Obr. 36 Časový průběh zásob více prvků a systému složeného z těchto prvků (zdroj: autor)

- 4) Pokud do konečné úpravy pro relativní obsazenost systému dle vztahu (72) dosadíme za člen $(\Delta t_t)_s \cdot (pp_t)_j$ z rovnice (70), dostaneme:

$$RO = \sum_{j=1}^p \frac{RO_{sj} \cdot K_j \cdot T}{K \cdot T} = \sum_{j=1}^p \frac{RO_{sj} \cdot K_j}{K} = \sum_{j=1}^p \frac{RO_{sj} \cdot K_j}{\sum_{j=1}^p K_j} \quad (73)$$

Což je stejný vztah, jako vztah v rovnici (69). Jeho platnost je tím dokázána.

Produkce vztažená na zvolené časové období → relativní průchodnost

$$RP_i = 100 \cdot \frac{P_i / \max_{i=1, \dots, n} P_i}{\max_{i=1, \dots, n} P_i} [\%] \quad (74)$$

kde:

RP_i [%] je relativní průchodnost zjištěná při i -tém pozorování (celkem byla provedena 3 pozorování pro každou posuzovanou alternativu / variantu kombinace hodnot vstupních parametrů),

P_i [ks/s] je průchodnost vztažená na časovou jednotku (často místo sekundy je použita jednotka 1 den nebo 1 hod) zjištěná při i -tém pozorování (celkem byla provedena 3 pozorování pro každou posuzovanou alternativu/variantu kombinace hodnot vstupních parametrů).

Doba průchodu → relativní doba průchodu

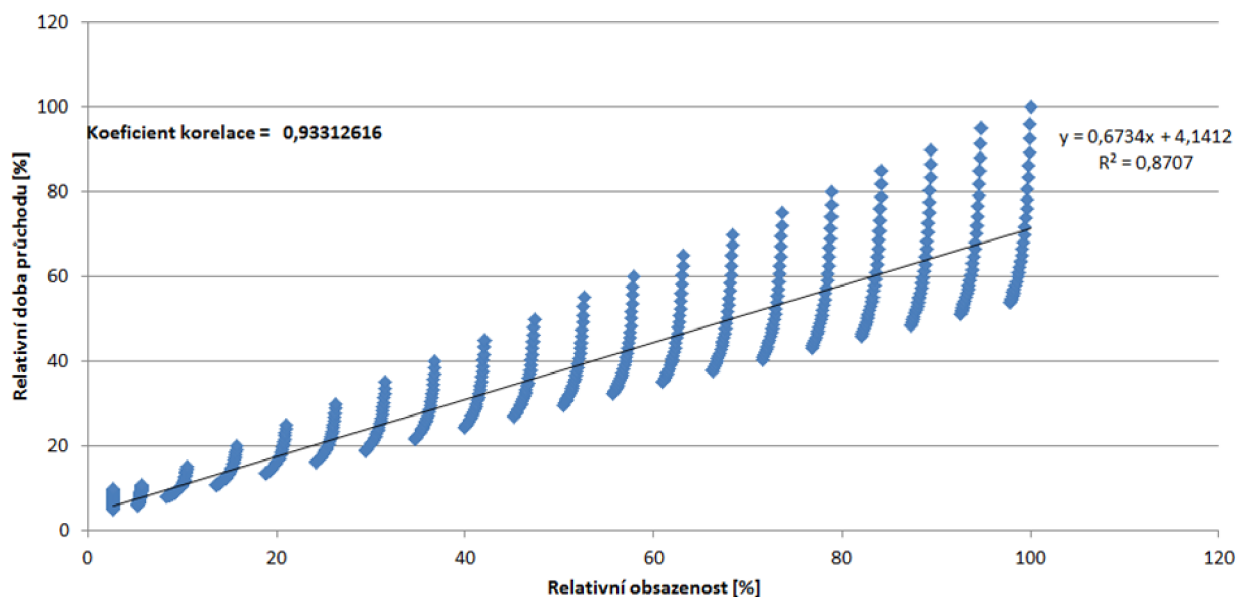
$$RDP_i = 100 \cdot \frac{DP_i / \max_{i=1, \dots, n} DP_i}{\max_{i=1, \dots, n} DP_i} [\%] \quad (75)$$

kde:

DP_i [s] je doba průchodu zjištěná v rámci simulačních experimentů testovacím simulačním modelem při i -tém pozorování

Cílem simulačních experimentů bylo prověřit možnou vzájemnou závislost výše uvedených relativních veličin při různých variantách kombinace parametrů testovaného SHO (vstupních hodnot parametrů testovacího simulačního modelu). Právě pro toto posouzení byla použita zmíněná tabelární a grafická šablona. Ukázka grafického výstupu, na kterém je patrné jeho uspořádání a informační obsah, je pro případ exponenciálně rozloženého taktu vstupu požadavků do fronty před obslužnou stanicí a konstantní doby obsluhy uvedena na Obr. 37 a na Obr. 38. V případě grafu na Obr. 37 je zdrojem dat sekvence hodnot sledovaných výstupních veličin pro jednotlivé alternativy / kombinace vstupních hodnot parametrů. Byly provedeny tři replikace pro každé pozorování, tedy celkový počet hodnot v každé z porovnávaných datových řad byl 1560 (jak je uvedeno ve spodní části grafu, kde jsou shrnuty vybrané statistiky porovnávaných ukazatelů). Naopak v případě grafu na Obr. 38 jde o interpolaci průměrných hodnot přes provedené replikace v jednotlivých bodech návrhového prostoru (tedy 6x 20 průměrných hodnot získaných vždy ze tří replikací). Souřadnice těchto bodů jsou dány (průměrnou) relativní obsazeností a (průměrnou) relativní průchodností. Separovány byly hodnoty pro odlišná nastavení podílu materiálového toku směřovaného zpětnou větví z obslužné stanice opět na začátek fronty před stanicí (coby jednoho ze vstupních parametrů měněného v rámci navržené matice experimentů).

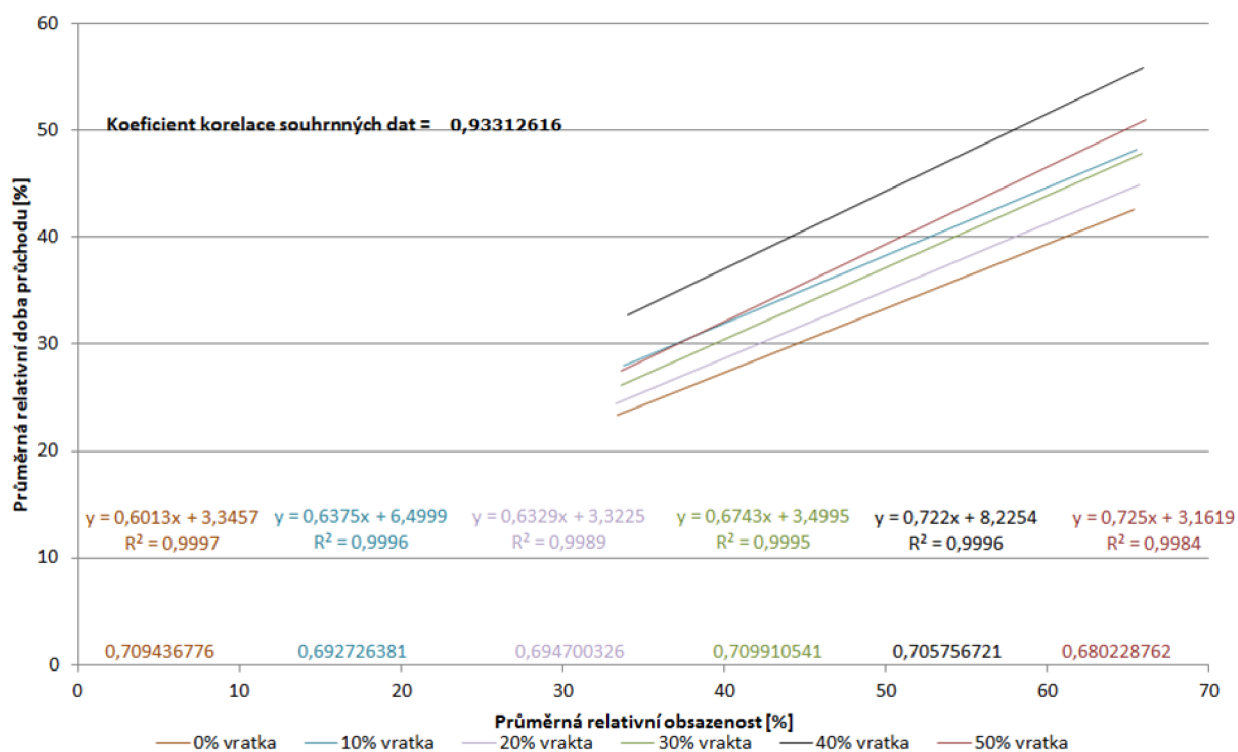
Závislost relativní doby průchodu na relativní obsazenosti



Relativní obsazenost - statistiky			Relativní doba průchodu - statistiky		
{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 23,35		{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 18,95	
{Minimum}: 2,63	{3. kvartil}: 74,45		{Minimum}: 4,99	{3. kvartil}: 52,97	
{Maximum}: 100,00	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI		{Maximum}: 100,00	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI	
{Průměr}: 49,30	{Medián}: 48,90		{Průměr}: 37,34	{Medián}: 35,81	
{Sm.odch.}: 29,99	{Prům.abs.odch.}: 26,08		{Sm.odch.}: 21,64	{Prům.abs.odch.}: 18,14	

Obr. 37 Grafický výstup šablony pro posouzení závislosti relativní průchodnosti na relativní obsazenosti (zdroj: autor)

Vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti



Obr. 38 Grafický výstup šablony pro posouzení průměrné závislosti relativní průchodnosti na průměrné relativní obsazenosti (zdroj: autor)

Další výsledky simulačních experimentů platné pro vybrané kombinace typů rozdělení pravděpodobnosti povahy vstupů požadavků do SHO a povahy jejich obsluhy jsou uvedeny v přílohách.

6.1 VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

Výsledky simulačních experimentů posuzujících vzájemnou závislost vybraných signifikantních charakteristik materiálového toku ukazují, že je možné uvažovat velmi těsnou lineární závislost mezi relativní dobou průchodu a relativní obsazeností v uzavřeném SHO (při uvažování transformačních vztahů pro převod absolutních hodnot sledovaných přímo v použitém *testovacím simulačním modelu* na relativní hodnoty nezávislé na volbě hodnot dalších vstupních parametrů podle vztahů (68), (74) a (75) uvedených v předchozí kapitole). Těsnou lineární závislost lze uvažovat na základě hodnot koeficientu korelace uvedených v jednotlivých grafech (viz přílohová část práce) znázorňujících závislost mezi těmito charakteristikami materiálového toku. Také hodnota koeficientu determinace R^2 (rovněž uvedená v grafech pro jednotlivé interpolační přímky) ve všech případech posuzovaných variant/kombinací typů rozdělení pravděpodobnosti povahy vstupů požadavků do SHO, resp. obsluhy požadavků/podílu materiálového toku směřovaného zpětnou větví ukazuje, že lze vysoké procento simulačními experimenty zjištěných hodnot vysvětlit lineární závislostí mezi posuzovanými hodnotami charakteristik.

Z tohoto poznatku lze vyvodit dvě následující úvahy. První se týká Littleova vztahu diskutovaného v kapitole 4.1.2 (viz vztahy (31) a (32) v této kapitole). Podle tohoto vztahu existuje lineární závislost mezi střední dobou setrvání požadavků v SHO a středním počtem požadavků v SHO, tedy obecně $t_s \approx N_s$. Tomu skutečně odpovídají vysoké hodnoty korelačních koeficientů mezi posuzovanou relativní dobou průchodu a relativní obsazeností SHO, které s hodnotami t_s a N_s souvisí (dle transformačních vztahů (75) a (68)). Byla tak experimentálně ověřena platnost Littleova zákona pro SHO s různými kombinacemi standardně se vyskytujících typů rozdělení doby mezi vstupy požadavků a doby obsluhy, navíc díky zmíněným transformačním vztahům nezávisle na konkrétních hodnotách parametrů těchto rozdělení.

Druhá úvaha předpokládá problém, kdy je řešen návrh zásobníku (např. skladu) oddělujícího dvě technologické oblasti, ve kterých probíhá materiálový tok, přičemž tento prochází navrhovaným zásobníkem či analogickou plánovanou oblastí (podobně, jako je to schematicky znázorněno na Obr. 12). Za předpokladu lineární závislosti obsazenosti příslušné oblasti a doby průchodu přes tuto oblast lze nastavit časové zpoždění průchodů EB na výstupu zásobníku oproti průchodům EB na vstupu do zásobníku, kdy záznamy z obou EB získáváme pomocí *Generátoru průchodů evidenčních bodů*. Přípustnost této úvahy je dána podmínkou vnitřní struktury zásobníku, resp. jím procházejícího materiálového toku, která musí splňovat podobnost (trajektorie i časových charakteristik) s tokem požadavků v SHO.

7 OVĚŘENÍ NAVRHOVANÉHO PŘÍSTUPU ŘEŠENÍ V PRAXI

Pro účely ověření poznatků týkajících se vzájemné závislosti vybraných signifikantních charakteristik materiálového toku, které byly na teoretické bázi diskutovány na základě výsledků získaných simulačními experimenty provedenými pomocí *testovacího simulačního modelu* v kapitole 6.1, byl zvolen provozní úsek velkosériového výrobce, který splňuje podmínky podobnosti s (obecným) SHO a reprezentativnosti vzhledem k dalším možným průmyslovým provozům. Nejprve byla provedena systémová analýza zvoleného provozního úseku, která shrnuje veškeré podstatné technické a provozní parametry ovlivňující předmětný materiálový tok. Na základě tohoto rozboru byl v další fázi vytvořen simulační model provozního úseku a provedena verifikace a validace modelu. Následovala definice matice experimentů analogická té, která byla použita s experimenty prováděnými pomocí *testovacího simulačního modelu*, a provedení příslušných simulačních experimentů. Konečně pomocí již v kapitole 6.1 zmíněné tabelární a grafické šablony byly výstupy provedených simulačních experimentů vyhodnoceny a porovnány s výstupy a poznatky získanými *testovacím simulačním modelem*, který zobrazuje obecný SHO.

Zvoleným provozním úsekem byla výrobní oblast zahrnující několik technologických zařízení, pomocí kterých jsou vyráběny hřídele do převodovek osobních automobilů. V rámci plánovaných úprav mají být tato zařízení propojena (zřetězena) pomocí dopravníku, na kterém se budou pohybovat nosné elementy (označované zadavatelem simulační studie jako paletky – toto označení je v dalším textu dodržováno). Každá paletka nese jednu hřídel (resp. její polotovár) a ten je na ní pomocí dopravníku přemísťován mezi jednotlivými technologickými operacemi.

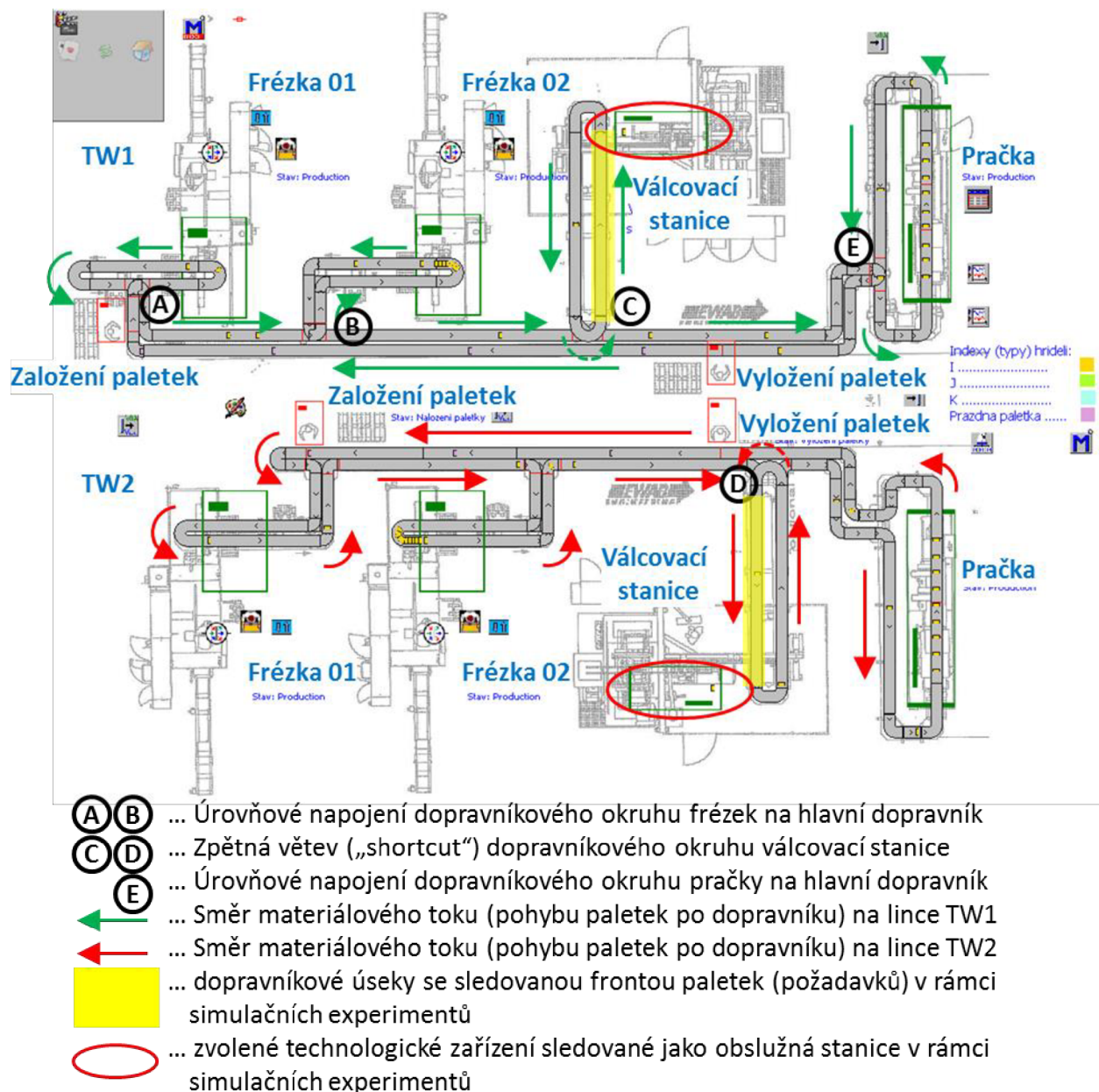
Jedním z cílů simulační studie realizované v praxi bylo posoudit více variant prostorového uspořádání technologických zařízení (a souvisejících obslužných stanovišť) pro personál po jejich zřetězení pomocí dopravníku stejně jako způsob vzájemného propojení dopravníkových úseků. Z důvodu utajení vycházejí dále prezentovaná systémová analýza a simulační model z jedné z variant, která nakonec nebyla realizována. Tímto není nikterak dotčena kvalita a přesnost výsledků zde prezentovaných simulačních experimentů.

7.1 SYSTÉMOVÁ ANALÝZA ZVOLENÉHO VÝROBNÍHO ÚSEKU

V rámci systémové analýzy byl proveden popis prostorového uspořádání zřetězení technologických pracovišť a rozmístění dalších obslužných stanovišť pro personál, stejně jako rozbor vzájemného propojení úseků dopravníkové tratě s ohledem na logiku řízení materiálového toku v místě křížení jednotlivých drah. Kromě toho byl sestaven souhrn všech podstatných technických a organizačních parametrů a pravidel (mj. logiky řízení materiálového toku, nutných zásahů u strojů atd.), které byly podstatné pro materiálový tok hřídelí na paletkách pohybujících se po dopravníku.

Prezentovaná varianta zřetězení uvažuje dvě výrobní linky (TW1 a TW2), kde každá sestává ze dvou frézek, jedné rovnací stanice a jedné pračky. Kromě těchto strojů je dopravník vybaven senzory ovládajícími zarážky pro zastavení paletek na daném místě – zejména místo nakládky hřídelí do paletek, vykládky hřídelí z paletek a místa křížení drah dopravníkových úseků (díky nízkému součiniteli tření mezi pásem dopravníku a paletkou je možný jeho prokluz). Navržené uspořádání stejně jako místa osazení dopravníku zmíněnými senzory zachycuje Obr. 39, ve kterém jsou na pozadí hlavní části vytvořeného simulačního modelu označena technologická zařízení,

místa pro manipulaci s hřídelemi (naložení do paletků a vyložení z paletků) a směr materiálového toku (pohyb paletků po úsecích dopravníkového systému – včetně míst úrovnových křížení jeho úseků).



Obr. 39 Návrh uspořádání zřetězení technologických stanišť pomocí dopravníkové techniky (zdroj: autor)

Jak je vidět, obě linky vytvářejí dva uzavřené dopravníkové okruhy. Materiálový tok na těchto dopravnících je vzájemně ovlivněn způsobem organizace obsluhy strojů při omezené personální kapacitě. Vytvořený simulační model však umožňuje testovat také variantu uvažující nezávislost materiálových toků obou linek, kdy nejsou do simulace zahrnuty časy docházky a reakční doba související s charakterem (manuální) obsluhy příslušných strojů a stanišť. Experimenty provedené s vytvořeným simulačním modelem vycházely z této varianty (která odpovídá plně automatickému provozu), proto v rámci systémové analýzy není o organizaci obsluhy strojů a dalších stanišť detailně pojednáno.

Technické parametry strojních zařízení včetně dopravníkové techniky shrnuje Tab. 1. Organizační parametry (výrobní program a směnový režim) dále shrnuje Tab. 2. Další technické údaje týkající se parametrů dopravníkové techniky, rozměrů paletok (elementů materiálového toku) apod. shrnuje Tab. 3.

Tab. 1 Technické parametry strojů a pozic výrobních linek TW1, TW2 (vlastní zpracování)

Stroj / Pozice	Parametr	Hodnota	Poznámka
Frézka	Takt	60 s	Bez rozdílu typu obráběné hřídele
	Četnost výskytu neshodných dílů	2,0 %	Neshodné obrobky jsou na frézce zpracovány opakovaně
	Výměna nástroje	Trvání 15 min	Po 1 500 pracovních cyklech
	Seřízení	Při přechodu z/na typ „K“ trvá 15 min, u ostatních typů 30 min	Probíhá po obrobení poslední hřídele daného typu
	Spolehlivost	99,5 %	Pohotovost
	MTTR	10 min	Střední délka trvání technického prostoje (doba do opravy)
Válcovací stanice	Takt	29 s	Bez rozdílu typu obráběné hřídele
	Četnost výskytu neshodných dílů	0,0 %	Event. neshodný díl je vyřazen až po vyložení z paletky
	Výměna nástroje	Trvání 60 min	Po 100 000 pracovních cyklech
	Seřízení	Neprobíhá	Při přechodu produkce na jiný typ hřídele není třeba seřizovat stroj
	Spolehlivost	99,5 %	Pohotovost
	MTTR	10 min	Střední délka trvání technického prostoje (doba do opravy)
Pračka	Takt	~24 s	Určen nepřímo měřením doby zastavení na interních technologických pozicích příslušných senzorů
	Četnost výskytu neshodných dílů	0,0 %	Event. neshodný díl je vyřazen až po vyložení z paletky
	Spolehlivost	99,5 %	Pohotovost
	MTTR	1 min	Střední délka trvání technického prostoje (doba do opravy)
Místo naložení hřídelí do paletek	Takt	2 s	Za 2 s je možné naložit 2 hřídele (do 2 paletek)
	Fronta	0 paletek	Ve zde uvažované variantě je okamžitě po příjezdu paletky k přísl. senzoru v místě nakládky provedeno její naložení hřídelí
Místo vyložení hřídelí z paletek	Takt	2 s	Za 2 s je možné vyložit 2 hřídele (do 2 paletek)
	Fronta	0 paletek	Okamžitě po příjezdu paletky k přísl. senzoru v místě vykládky je provedeno její vyložení

Tab. 2 Organizační parametry provozu výrobních linek TW1, TW2 (vlastní zpracování)

Výrobní program	Typy vyráběných hřídelů	„I“, „J“, „K“ (celkem 3 typy)
	Četnost změny vyráběného typu	2x/den (pravidelně), tj. perioda změny 12 hod
Směnový režim	Pracovní dny	7 dní / týden (včetně víkendů)
	Směny	Ranní, Odpolední, Noční
	Ranní (Od-Do)	06:00 – 14:00
	Odpolední (Od-Do)	14:00 – 22:00
	Noční (Od-Do)	22:00 – 06:00
	Ranní – přestávky (Od-Do)	09:45 – 10:15
	Odpolední – přestávky (Od-Do)	17:45 – 18:15
	Noční – přestávky (Od-Do)	01:45 – 02:15

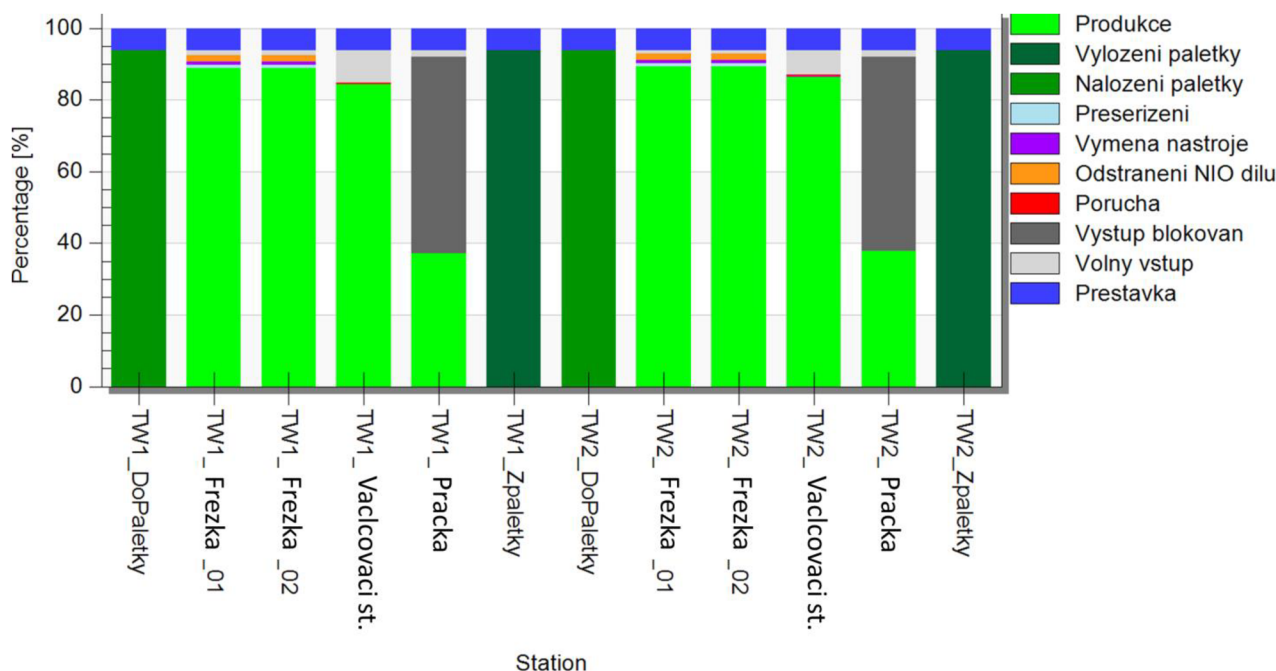
Tab. 3 Parametry dopravníkové techniky a rozměry paletek (vlastní zpracování)

Paletky	Délka	0,100 m	
	Šířka	0,193 m	
Dopravníkové úseky	Rychlost	0,142 m/s	Kromě samostatného úseku dopravníku pračky
	Kapacita	Akumulační dopravník (kapacita dána poměrem délky úseku a rozměrů paletek)	Kromě samostatného úseku dopravníku pračky a míst křížení více úseků dopravníku
	Rychlost – úsek dopravníku pračky	0,015 m/s	Hodnota vypočítaná měřením doby průchodu paletky
	Kapacita – úsek dopravníku pračky	14 paletek	Po délce dopravníku pračky jsou osazeny 2 senzory zajišťující svou funkcí zastavení paletek na 10 s a 14 s
Logika řízení materiálového toku	Úrovňová křížení A, B, E – přednosti paletek	Nájezd paletky do místa křížení	Je možný až po uvolnění úseku křížení předchozí paletkou (max. kapacita úseku 1 paletka)
		Výjezd paletky z místa křížení	Uvolňuje následující paletku, přednost má paletka opouštějící dopravníkový okruh frézky (pračky)
	Úrovňová křížení C, D – přednosti paletek	Jisté % paletek opakuje vjezd na úsek dopravníku rovnací stanice	Přednost při vjezdu má paletka opakující vjezd (před paletkou z hlavního dopravníkového okruhu)
	Šířka	0,193 m	

7.2 SIMULAČNÍ MODEL ZVOLENÉHO VÝROBNÍHO ÚSEKU

Simulační model byl vytvořen v souladu s celoevropským standardem s využitím knihovny prvků VDA-Powertrain (verze 10.0-03.080), která je k dispozici v rámci rodiny knihoven VDA Automotive pro simulační SW Plant Simulation (více viz kapitola 4.6). Použitým simulačním SW byl SW Plant Simulation verze 10.0.12.

Kromě výhod vyplývajících z dodržení standardizace (možnost využití a dalšího vývoje, aktualizace či úprav simulačního modelu nezávisle na jeho tvůrci) poskytuje tato knihovna další výhody, které lze využít zejména při validaci modelu a následně při provádění simulačních experimentů. Jedná se zejména o předdefinovaná statistická vyhodnocení (příklad grafického výstupu takového vyhodnocení ukazuje Obr. 40) vytížení simulované výrobní techniky (a také personálu, je-li do simulace zahrnut jeho vliv) a také centralizovaná parametrizace s možností exportu veškerých vstupních dat do sešitu MS Excel a zpětného importu (nových dat) ze sešitu MS Excel do prostřední simulačního modelu.



Obr. 40 Vyhodnocení vytížení pracovišť – grafický výstup (zdroj: autor)

Poté, co byl simulační model vytvořen, bylo třeba provést jeho verifikaci a validaci (vysvětlení těchto pojmů je uvedeno v kapitole 4.1.4). V rámci verifikace bylo provedeno ověření správnosti kódu (implementovaného v tzv. uživatelských metodách, které použítá knihovna VDA Powertrain poskytuje pro úpravu chování simulačního modelu nad rámec standardních funkcí nabízených samotnou knihovnou). V rámci validace pak byla ověřena shoda dosažené průměrné denní produkce vykazované simulačním modelem s hodnotou získanou pomocí statických (analytických) výpočtů. Statickým výpočtem, který neuvažuje vliv náhodných dějů (prostoje strojů, kongesce či vzájemné blokace paletek v místech křížení dopravníkových úseků a následné blokace výstupů nebo naopak prázdné/nezásobené vstupy strojů), lze zjistit přibližnou hodnotu veličiny použité pro účely validace modelu (zde dosažená průměrná denní produkce). V dlouhém období platí, že vliv některých stochastických vlivů lze ve statickém výpočtu zohlednit zahrnutím středních hodnot příslušných (časových) ztrát a z toho plynoucích ztrát sledované denní produkce

(v případě, kdy bude sledovanou veličinou například obsazenost jistého úseku dopravníku nebo obecně zásobníku, může se tento vliv projevit odpovídajícím navýšením příslušné hodnoty). V konkrétním případě byly použity následující statické propočty pro zjištění průměrné denní produkce (tj. průměru denní produkce sledované v dostatečně dlouhém období):

Průměrná denní produkce bez uvažování stochastických vlivů

$$PDP = Sp \cdot IO \cdot \frac{S\check{C}O - \check{C}OMP}{T_{BN}} - VN - SU \text{ [ks} \cdot \text{den}^{-1}] \quad (76)$$

kde:

$PDP \text{ [ks} \cdot \text{den}^{-1}]$	je průměrná denní produkce (tj. aritmetický průměr hodnot denní produkce sledovaných v dlouhém období),
$Sp \text{ [%]}$	je celková spolehlivost (pohotovost) systému,
$IO \text{ [%]}$	je procento shodných dílů vyskytujících se na konci výrobního procesu (za předpokladu, že neshodné díly jsou z výrobního procesu vyřazeny),
$\check{C}OMP \text{ [s]}$	je délka časového období, ve kterém nebyla plánována produkce, tj. součet časových období, ve kterých byla plánována směnová přestávka, a časových období mezi navazujícími provozními směnami,
$S\check{C}O \text{ [s]}$	je sledované (dostatečně dlouhé) časové období,
$T_{BN} \text{ [s]}$	je (průměrný) takt úzkého místa, kterým je stroj s nejvyšší hodnotou taktu (tj. nejméně výkonný stroj), případně jiný úsek dopravníkové techniky s nejvyšší hodnotou taktu (tj. časem mezi po sobě jdoucími průchody následujících elementů materiálového toku ²⁹),
$VN \text{ [ks} \cdot \text{den}^{-1}]$	je očekávaná ztráta (snížení) průměrné denní produkce z důvodu výměny nástroje, která s určitou periodou (po určitém počtu obroběných dílů) na frézce probíhá a která trvá stanovenou dobu (viz parametry v Tab. 1)
$SU \text{ [ks} \cdot \text{den}^{-1}]$	je očekávaná ztráta (snížení) průměrné denní produkce z důvodu seřízení při přechodu na jinou výrobní dávku (jiný index hřídeli), které probíhá s určitou periodou (intervalem mezi po sobě následujícími seřizeními) a které trvá stanovenou dobu (v závislosti na indexu hřídele, který byl aktuálně vyráběn a který má být nově vyráběn – viz parametry v Tab. 1).

Pro celkovou spolehlivost systému stejně jako pro výsledné procento shodných dílů na konci výrobního systému platí obecné vztahy zohledňující uspořádání výrobních zařízení (paralelní, sériové, kombinované). Z hlediska uspořádání strojů na linkách TW1 a TW2 nebylo nutné uvažovat obecné vztahy pro výslednou spolehlivost, resp. produkci shodných dílů při sériově, resp. paralelně řazených technologických zařízeních, neboť dle stanovené logiky řízení materiálového toku se produkce (a tedy tok palet s hřídelemi) dělí mezi oběma frézami v poměru 50:50 (což

²⁹ Obvykle musí být veškeré komponenty dopravníkové techniky rámci projektování výrobního systému navrženy tak, aby žádná z těchto komponenty netvořila úzké místo.

tedy odpovídá základnímu efektivnímu taktu 30 s, tedy polovině taktu jedné frézky – viz Tab. 1). Pro úplnost jsou zde vztahy pro výslednou spolehlivost a produkci shodných dílů při sériovém (rovnice (77) a (78)) a paralelním řazení strojů uvedeny.

Pro sériové řazení platí pro výslednou spolehlivost:

$$S_p^S = 100 \cdot \prod_{i=1}^{z_S} Sp_i [\%] \quad (77)$$

kde:

$Sp_i [-]$ je spolehlivost i -tého zařízení (vyjádřená absolutním číslem v rozsahu $\langle 0; 1 \rangle$),

$z_S [-]$ je celkový počet sériově zapojených (zřetězených) zařízení.

A pro výslednou produkci shodných dílů:

$$IO^S = 100 \cdot \prod_{i=1}^{z_S} IO_i [\%] \quad (78)$$

kde:

$IO_i [-]$ je podíl shodných dílů vyrobených na i -tém zařízení

Pro paralelní řazení z_P zařízení platí pro výslednou spolehlivost:

$$S_p^P = 1 - 100 \cdot \prod_{i=1}^{z_P} Sp_i [\%] \quad (79)$$

A pro výslednou produkci shodných dílů analogicky:

$$IO^P = 1 - 100 \cdot \prod_{i=1}^{z_P} IO_i [\%] \quad (80)$$

Výsledky validace simulačního modelu uvádí graf na Obr. 41. Na něm je procentuálně vyjádřena dosažená průměrná denní produkce (dlouhodobý průměr) při postupném zahrnutí organizačních a technických (stochastických) prostojů, které na frézách probíhají. Ověření denní produkce bylo provedeno pro frézky, protože tyto stroje ve srovnání s ostatními technologickými zařízeními (viz technické parametry strojů v Tab. 1) představují úzké místo, které tak určuje maximálně dosažitelnou (průměrnou) denní produkci následně celé linky. Na grafu na Obr. 41 jsou vyneseny procentuální hodnoty průměrné denní produkce při zahrnutí vlivu jednotlivých organizačních a technických prostojů (sloupcový graf) a také dosažená průměrná (dlouhodobá) denní produkce pro výrobní linky TW1 a TW2 se zahrnutím všech těchto prostojů za předpokladu, že je k dispozici na každé lince 80 palet (nesoucích polotovary, resp. hřídele pro obrobení).

Ověření správnosti dosažených hodnot:

$$Vliv\ směnového\ režimu \quad (81)$$

$$VSR = 100 \cdot \frac{P\check{C}O}{S\check{C}O} = 100 \cdot \frac{120 \cdot (24 - 1,5)}{120 \cdot 24} = 93,75 \%$$

kde:

$P\check{C}O$ [hod] je délka produktivního časového období (v celé délce vyhodnocovaného období, tj. v rámci vyhodnocených 120 dní provozu) – hodnota vypočítaná na základě definovaného směnového kalendáře (údaje viz Tab. 2).

Výsledná hodnota odpovídá přesně údaji uvedenému v grafu na Obr. 41

$$\begin{aligned} & \text{Vliv NIO produkce (produkce neshodných dílů)} \\ & VNIOP = VSR - NIO = 93,75 - 2,00 = 91,75\% \end{aligned} \quad (82)$$

kde:

NIO [%] je podíl produkce neshodných dílů (údaje viz Tab. 2).

Výsledná hodnota odpovídá přibližně údaji uvedenému v grafu na Obr. 41. Rozdíl je způsobený stochastickou povahou příslušného vlivu (v průběhu simulace lze pozorovat kolísání hodnoty aktuální a tím i průměrné denní produkce). Příslušný rozdíl je v mezích obvykle stanovené tolerance $\pm 1,00$ %.

$$\begin{aligned} & \text{Vliv technických prostojů} \\ & VTP = VNIOP - TP = 91,75 - 0,05 = 91,70 \% \end{aligned} \quad (83)$$

kde:

TP [%] je poruchovost frézek vyplývající z údaje o jejich spolehlivosti (viz Tab. 1). Rozdíl hodnot získaných výpočtem a uvedených v grafu na Obr. 41 (tedy $91,88 - 91,46 = 0,42$ %) je nižší než $\pm 1,00$ %, což je obvykle stanovená tolerance.

$$\begin{aligned} & \text{Vliv výměny nástroje} \\ & VN_p = 100 \cdot \frac{TVN}{PVN \cdot T_{BN}^{TOZ}} = 100 \cdot \frac{TVN}{PVN \cdot \frac{T_{BN}}{VTP}} \\ & VN_p = 100 \cdot \frac{15 \cdot 60}{1500 \cdot \frac{30}{0,9170}} = 1,83 \% \\ & VVN = VTP - VN_p = 91,70 - 1,83 = 89,87 \% \end{aligned} \quad (84)$$

kde:

VN_p [%] je procentuální ztráta dosažené průměrné denní produkce z titulu výměny nástroje,

TVN [s] je trvání výměny nástroje (viz Tab. 1),

PVN [–] je perioda výměny nástroje vyjádřená jako počet obrobených kusů, po kterém nastává další výměna nástroje (viz Tab. 1),

T_{BN}^{TOZ} [s] je efektivní takt úzkého místa (frézek), tedy takt při uvažování již v předchozích výpočtech zohledněných technických a organizačních ztrát.

Rozdíl hodnot získaných výpočtem a uvedených v grafu na Obr. 41 (tedy $90,56 - 89,87 = 0,69$ %) je nižší než $\pm 1,00$ %, což je obvykle stanovená tolerance.

Vliv přeseřizení

$$SU_p = 100 \cdot \frac{PSU}{PS\check{C}O} = 100 \cdot \frac{S\check{C}O \cdot \frac{SU_p^D}{TD} \cdot \frac{SU_T}{T_{BN}^{VVN}}}{S\check{C}O \cdot \frac{TD}{T_{BN}^{VVN}}} \quad (85)$$

$$SU_p = 100 \cdot \frac{120 \cdot \frac{12}{24} \cdot \frac{25 \cdot 60}{30/0,8987}}{120 \cdot \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{30/0,8987}} \doteq 0,86 \%$$

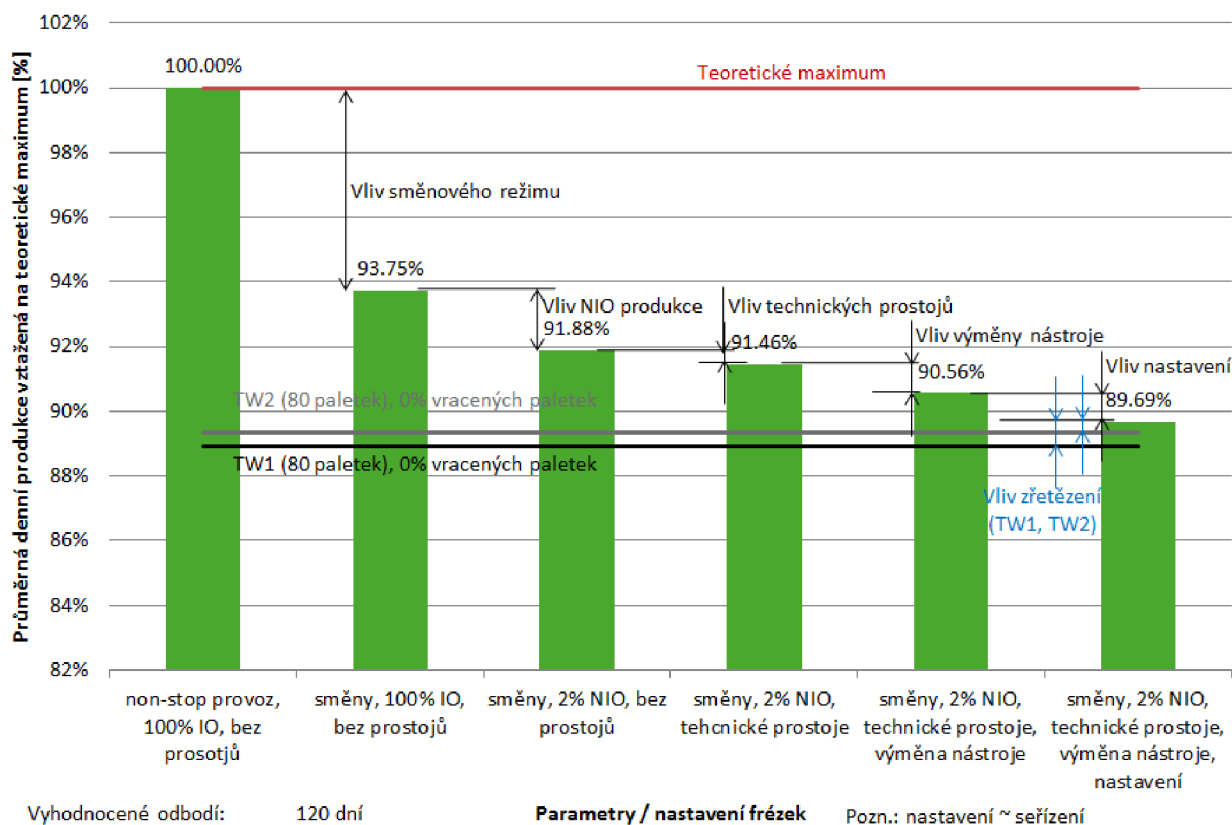
$$VSU = VVN - SU_p = 89,87 - 0,96 = 89,01 \%$$

kde:

- SU_p [%] je procentuální ztráta dosažené průměrné denní produkce z titulu seřizení,
 PSU [ks] je neuskutečněná produkce odpovídající souhrnu doby, po kterou byly v rámci sledovaného časového období $S\check{C}O$ stroje (frézky) seřizovány,
 $PS\check{C}O$ [ks] je celková produkce odpovídající efektivnímu taktu strojů (frézek) zjištěnému na základě příslušného technického parametru a procentuální úrovni produkce se zahrnutím všech doposud uvažovaných vlivů organizačních a technických prostojů (hodnota VVN),
 SU_p^D [hod] je perioda v rámci jednoho dne, s jakou probíhá seřizování frézek, tedy také změna vyráběného indexu hřidelí (viz Tab. 1),
 TD [hod] je délka časového období, vůči kterému je vyhodnocena perioda seřizování frézek,
 SU_T [s] je střední délka trvání seřizení frézek (hodnota viz Tab. 1),
 T_{BN}^{VVN} [s] je efektivní takt úzkého místa (frézek), tedy takt při uvažování již v předchozích výpočtech zohledněných technických a organizačních ztrát
Rozdíl hodnot získaných výpočtem a uvedených v grafu na Obr. 41 (tedy $89,69 - 89,01 \%$ = $0,68 \%$) je nižší než $\pm 1,00 \%$, což je obvykle stanovená tolerance.

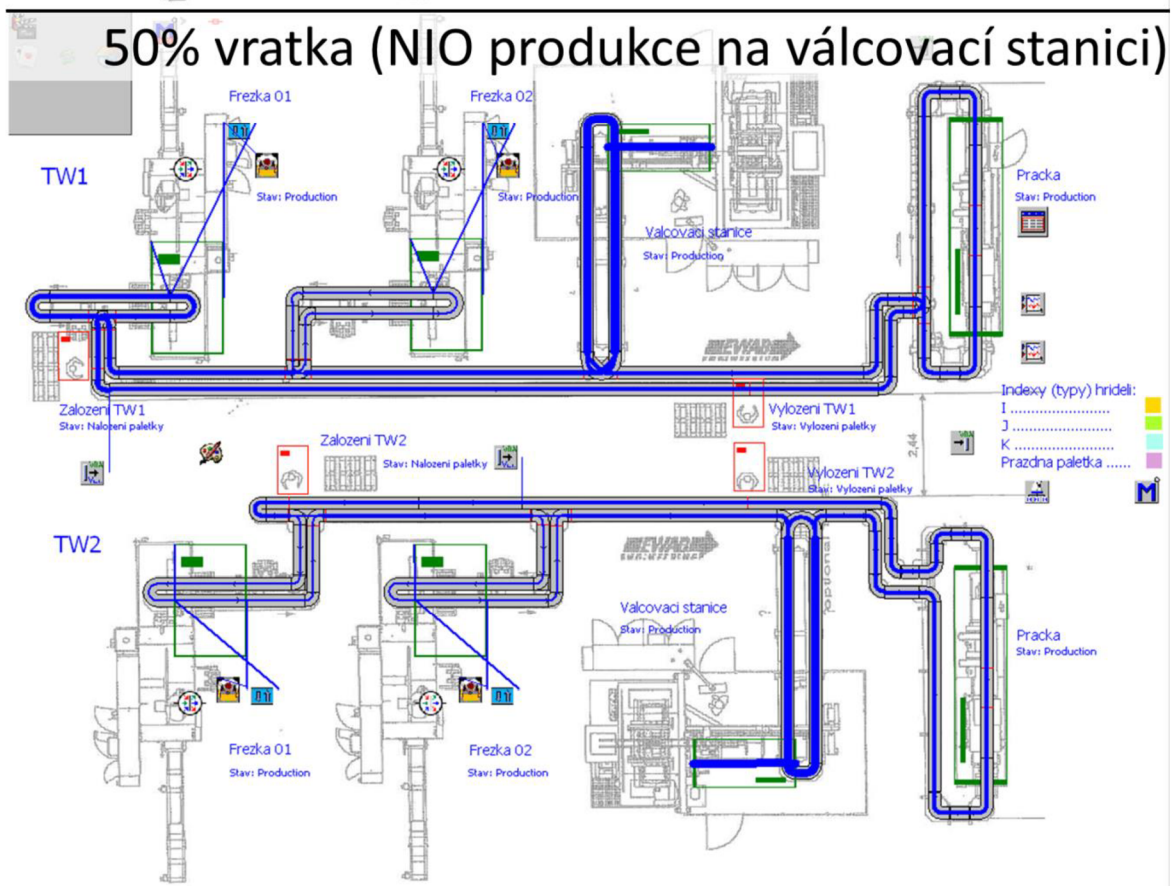
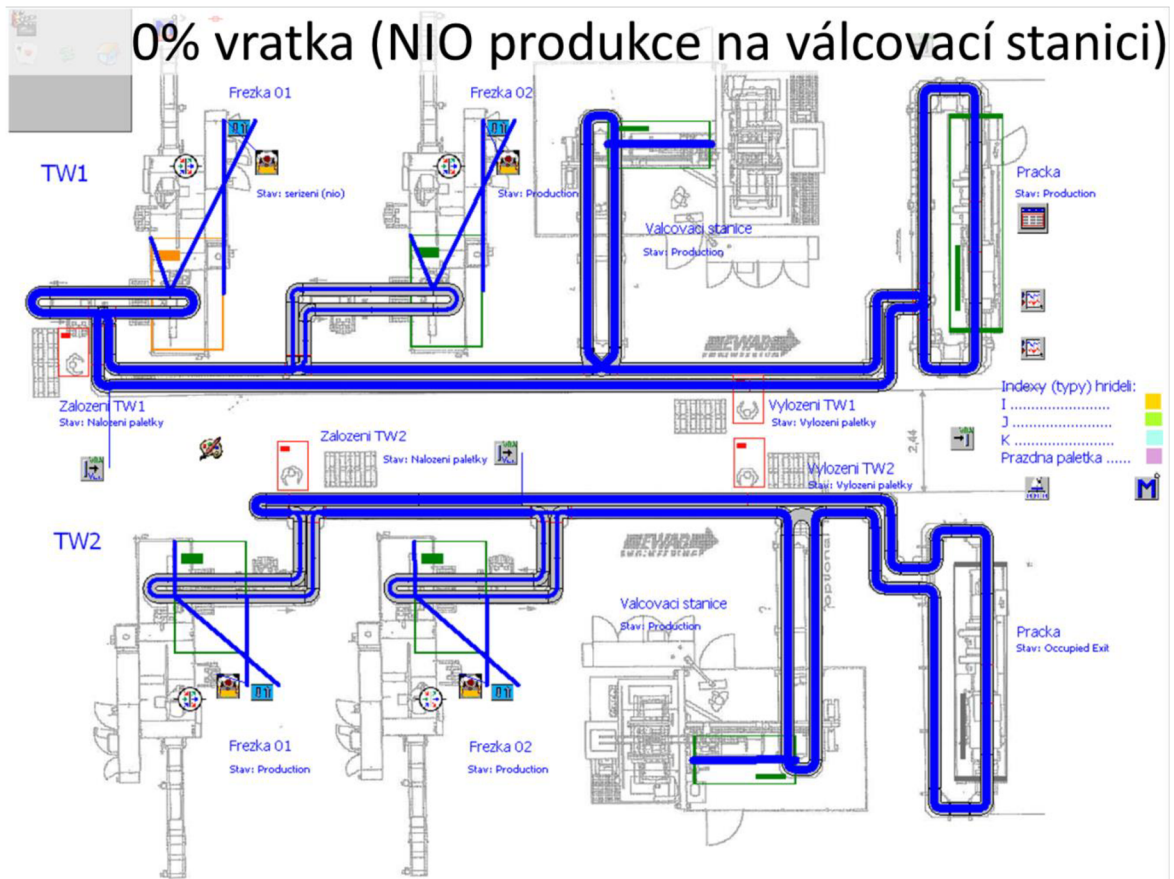
Jak je dále na grafu na Obr. 41 patrné, dosažená průměrná denní produkce je dále nižší po zřetězení všech technologických operací v porovnání s úrovní odpovídající samostatně stojícím frézám (které se dělí o produkci v poměru 50:50) se zohledněním veškerých organizačních a technických prostojů. Důvodem dalšího snížení produkce jsou (výjimečné) blokace paletek v místech úrovnového křížení úseků dopravníkové techniky a dále vzdálenost mezi jednotlivými technologickými operacemi, která musí být paletkami na dopravníku překonána. V závislosti na počtu paletek a tedy na zaplnění dopravníku dochází totiž k situacím, kdy je vstup do příslušné technologické operace/stroje volný (viz graf vytížení pracovišť na Obr. 40). Je možné ukázat, že počet paletek obíhajících po obou linkách má vliv na dosažnou produkci. Konkrétní výpočet pro zvolený SHO lze nalézt např. v [17]. Z důvodu rozdílné délky jednotlivých úseků i celkové délky dopravníkových okruhů, které obě linky (TW1 a TW2) tvoří, lze také pozorovat rozdíl v průměrně dosažené produkci na obou linkách.

Dvě paralelně řazené frézky - vliv organizačních a technických prostojů



Obr. 41 Validace simulačního modelu – průměrná denní produkce vztážená na teoretické maximum (zdroj: autor)

Kromě takto provedené verifikace a validace založené na porovnání výstupů simulačního modelu s výsledky statických (analytických) propočtů byla při tvorbě simulačního modelu uplatněna také metoda vizuálního ověření správnosti chování modelů (tedy *face validity*, *Validierung im Dialog* – viz oddíl 4.1.4). Jedním z dalších podpůrných důkazů validity modelu byl graf vytížení jednotlivých technologických stanovišť (viz Obr. 40), resp. přesněji vypovídající zdrojová (tabelární) data tohoto grafu, který v ustálené fázi běhu simulace (za dostatečně dlouhé časové období) ukazuje, že produkce (obrábění hřídelí) je mezi oběma frézky na lince TW1 i TW2 skutečně dělena v požadovaném poměru 50:50. A stejně tak ukazuje další stochastické jevy implementované do simulačního modelu (technické prostoje, výměna nástroje, výskyt neshodných dílů) odpovídají statickým (analytickým) propočtům jejich četnosti. Dále byla ověřena správná funkce vratné větve na obou linkách, kdy dle nastaveného poměru je část paletek na konci výstupní větve příslušné válcovací stanice směřována zpět k této stanici (což simuluje proces repase). Toto ověření bylo provedeno pomocí Sankeyova diagramu znázorňujícího intenzitu materiálového toku v jednotlivých úsecích dopravníkové techniky simulovaných linek – viz Obr. 42. Ze Sankeyova diagramu mimo jiné vyplývá jeden z podstatných rozdílů logiky řízení materiálového toku obou linek – v případě linky TW1 obíhají všechny paletky dopravníkovým okruhem první frézky, zatímco na lince TW2 je díky jiné poloze místa pro zakládání hřídelí do paletek možné pomocí dopravníkové výhybky směřovat ke každé z frézek pouze 50% paletek s hřídelemi.



Obr. 42 Sankeyův diagram pro různé podíly NIO dílů na válcovací stanici (zdroj: autor)

Další analýzy materiálového toku simulovaného v popisovaném modelu byly provedeny pomocí nástroje APP (viz kapitola 4.6). Byla provedena analýza na základě průchodů jedním EB, kterým byla právě válcovací stanice (na lince TW1, resp. TW2). Za tento EB byla zvolena válcovací stanice (linky TW1, resp. TW2), která byla v rámci následně prováděných simulačních experimentů považována za obslužnou stanici (viz dále kapitola 7.3). Dále uvedené grafické výstupy analýz vychází z nastavení simulačního modelu, kdy po každé z linek obíhá 40 paletků a podíl NIO hřídelí vracejících se zpětnou větví byl na každé lince 50%. Zde jsou uvedeny analýzy průchodů paletků rovnací stanicí linky TW1. V případě rovnací stanice linky TW2 byly získány obdobné výsledky. Obr. 43 uvádí přehled průchodů rovnací stanicí na lince TW1, kde každý záznam se do grafu promítne na základě času (vodorovná osa) a data (svislá osa) průchodu paletky strojem. Barevně jsou odlišeny záznamy podle typu hřídele, který paletky nesly. Je vidět, jak při přechodu na nový typ paletků díky zpětné větvi, před kterou se 50% paletků (s hřídelemi předchozího typu, kterým v grafu odpovídá červená barva) dochází k promíchání s paletkami nesoucími nový typ hřídelí (záznamy jejich průchodů jsou v grafu vyznačeny modrými body). Touto analýzou bylo ověřeno správné zohlednění směnového režimu, kdy je ve všech dnech patrná prodleva v materiálovém toku v časových intervalech:

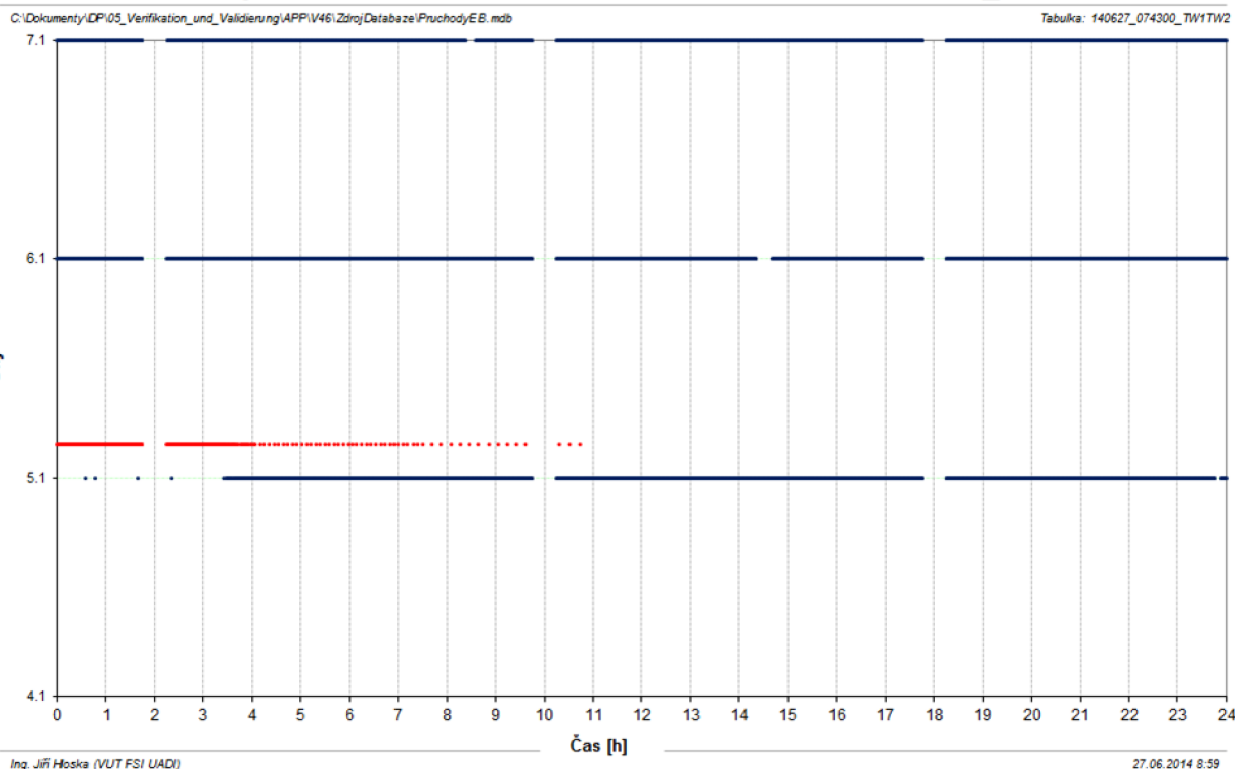
09: 45 – 10: 15 *hod*; 17: 45 – 18: 15 *hod*; 01: 45 – 02: 15 *hod*

(požadavek na směnový režim byl definován v Tab. 2), kterým odpovídají směnové přestávky.

Pro ověření správného zohlednění zadaných taktů pracovišť byla provedena analýza doby mezi průchody. Jak je vidět na Obr. 44, byl dodržen takt 29 s. Rozptyl hodnot je způsoben zohledněním stochastických jevů (výměna nástroje, technická závada). Hodnota minima (29 s) znamená, že nejkratší možné zpracování odpovídá právě taktu rovnací stanice, stejně tak medián (29 s) potvrzuje distribuční funkce odpovídající náhodné proměnné, kterou napodobuje rovněž histogram relativní četnosti naměřených hodnot (viz pravá část grafu).

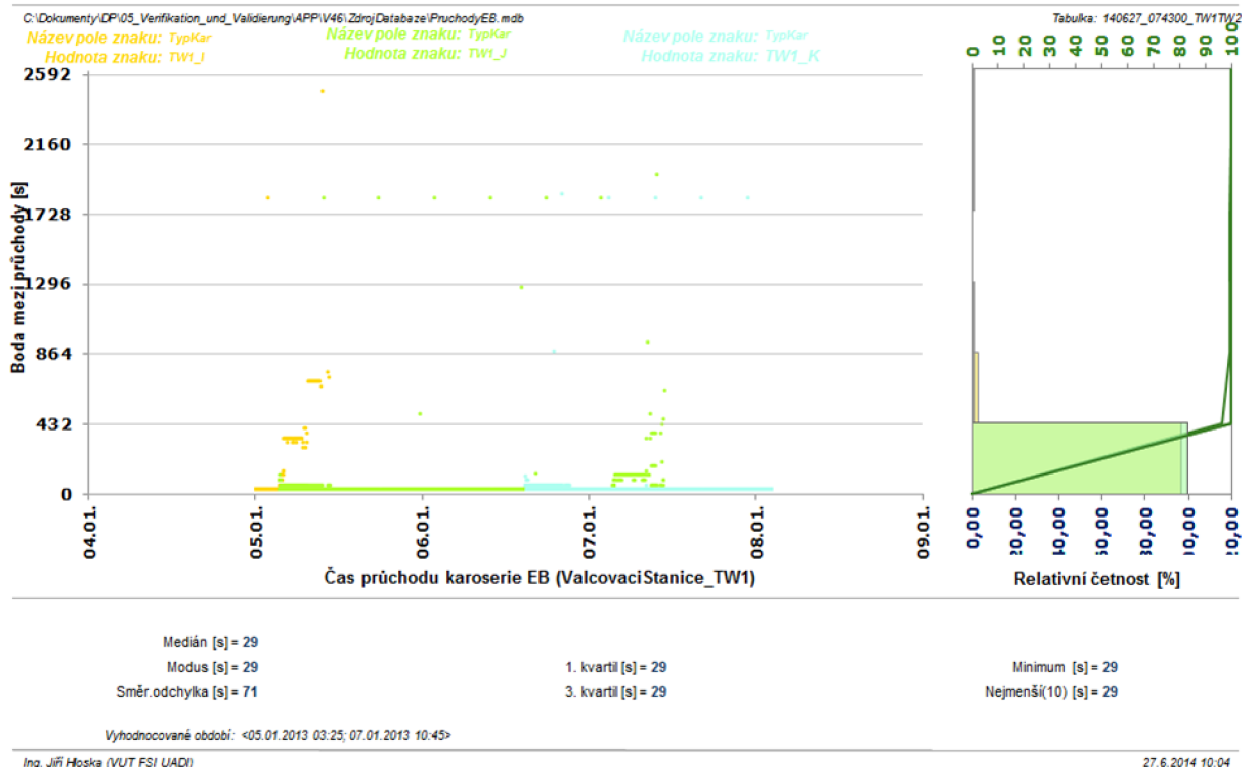
Duplicitní průchody (které jsou důsledkem simulované produkce 50% NIO dílů vracených po průchodu válcovací stanicí na paletkách zpět do vstupní větve stanice – viz body C, resp. D vyznačené v dispozici linek na Obr. 39) byly vyhodnoceny z hlediska četnosti jejich výskytu v průběhu času spolu s dobou mezi (opakovanými) průchody (stejně paletky nesoucí NIO díl). Tuto analýzu zachycuje Obr. 45. Doba mezi průchody samozřejmě závisí na obsazenosti vstupního dopravníku rovnací stanice. Je vidět, že většina hodnot je nižších, než 2 hod. Vyšší hodnoty jsou způsobeny dalšími vlivy (prostoje stanice, příp. vícenásobné vrácení paletky, kdy je do analýzy zahrnut pouze čas prvního a posledního průchodu).

Přehled průchodů evidenčním bodem >> ValcovaciStanice_TW1 <<



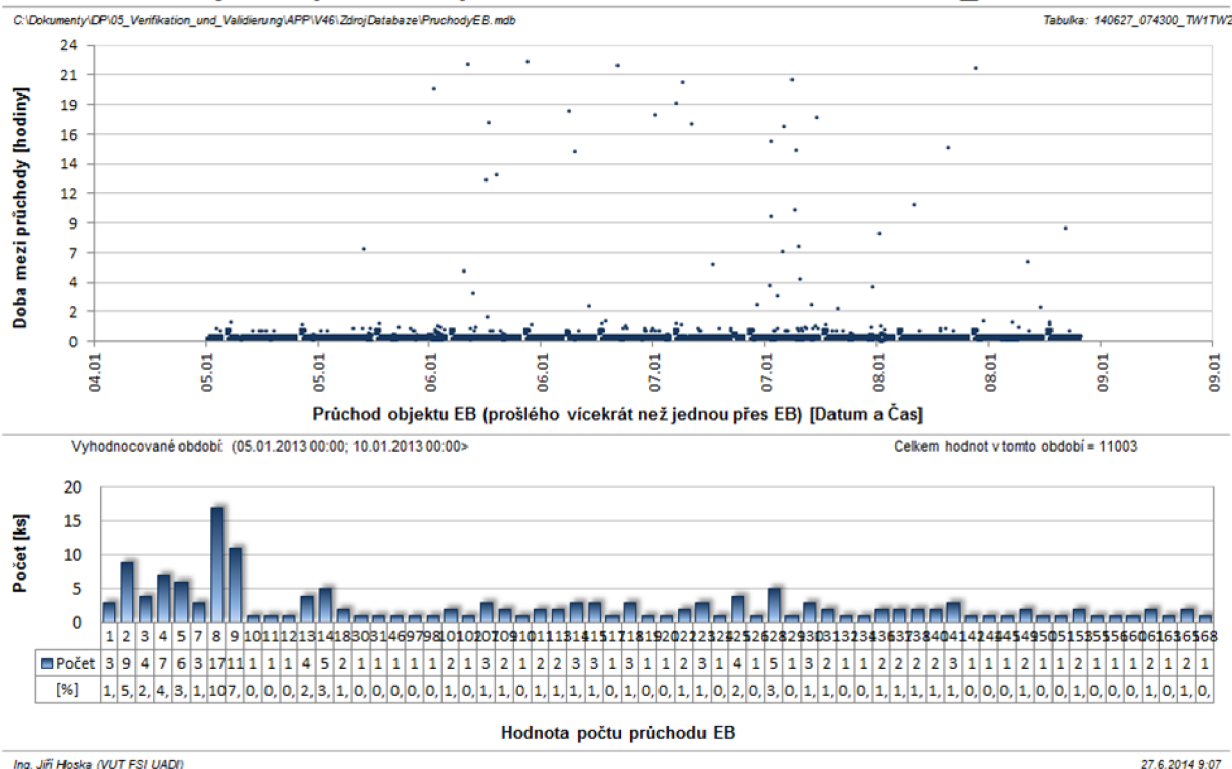
Obr. 43 Přehled průchodů paletků rovnací stanicí linky TW1 (zdroj: autor)

Analýza doby mezi průchody objektů EB >> ValcovaciStanice_TW1 << za dané období



Obr. 44 Analýza doby mezi průchody válcovací stanicí na lince TW1 (zdroj: autor)

Analyza duplicitních průchodů EB >> ValcovacíStanice_TW1 <<



Obr. 45 Analýza duplicitních průchodů rovnacích stanicí na lince TW1 (zdroj: autor)

7.3 SIMULAČNÍ EXPERIMENTY S MODELEM ZVOLENÉHO VÝROBNÍHO ÚSEKU

Před provedením samotných simulačních experimentů byla navržena jejich matice, jejíž struktura se v podstatné míře shoduje s maticí použitou v rámci simulačních experimentů s *testovacím simulačním modelem* (popsaných v kapitole 6.1).

V případě simulačního modelu daného výrobního úseku bylo třeba zvolit dopravníkový úsek, který bude považován za frontu požadavků (zde paletků s hřídelem) řadících se před obslužnou stanicí (příslušnou technologickou operací) a také tuto stanicí (tj. místo, na kterém odpovídající operace probíhá). Sledovanou obslužnou stanicí byla zvolena válcovací stanice a dopravníkový úsek před touto stanicí byl považován za kapacitní prvek umožňující frontu požadavků (paletků) před obslužnou stanicí (válcovací stanicí). Označení těchto úseků v rámci simulovaného zřetězení (viz Obr. 39).

Matice simulačních experimentů, které byly s modelem následně provedeny, uvažovala v porovnání s maticí použitou pro *testovací simulační model* (viz kapitola 6) pouze dva parametry:

- Celkový počet paletků na každém z dopravníkových okruhů (okruhů linek TW1 a TW2) ... v hodnotách {2, 4, ..., 40}.
- Podíl materiálového toku směřovaného zpětnou větví z obslužné stanice („shortcut“ C, resp. D pro linky TW1, resp. TW2 – viz Obr. 39)... v hodnotách {0%, 2%, ..., 50%}.

Parametry rozdělení pravděpodobnosti doby mezi příchody paletek do fronty před obslužnou stanicí stejně jako parametry rozdělení pravděpodobnosti doby obsluhy paletky (operace válcování) a kapacita dopravníkového úseku považovaného za místo pro tvorbu sledované fronty požadavků (paletky) byly dány v rámci technických parametrů příslušných zařízení, organizačních parametrů a parametrů dopravníkové techniky stanovených ve fázi provedení systémové analýzy simulovaného výrobního úseku (viz Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3). Počet testovaných kombinací hodnot vstupních parametrů byl 1560, vyhodnocované období 120 dní (doba náběhu / ustálení běhu simulačního modelu 1 den), tedy stejně jako v případě experimentů s *testovacím simulačním modelem*.

Sledovanými veličinami byly stejně jako v případě experimentů s *testovacím simulačním modelem*:

- Relativní průchodnost (resp. produkce) – definovaná rovnicí (74).
- Relativní doba průchodu (tedy doba oběhu paletky celým dopravníkovým okruhem linky TW1, resp. TW2) – viz rovnice (75).
- Relativní obsazenost (tedy relativní obsazenost dopravníkového úseku před válcovací stanicí včetně zahrnutí relativní obsazenosti samotné stanice dle vztahu (68)).

7.4 POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH POZNATKŮ S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Výsledky simulačních experimentů provedených s modelem zvoleného výrobního úseku opět posuzují vzájemnou závislost signifikantních charakteristik materiálového toku. Princip vyhodnocení je stejný jako v případě experimentů s testovacím simulačním modelem, který byl již popsán v kapitole 6.1.

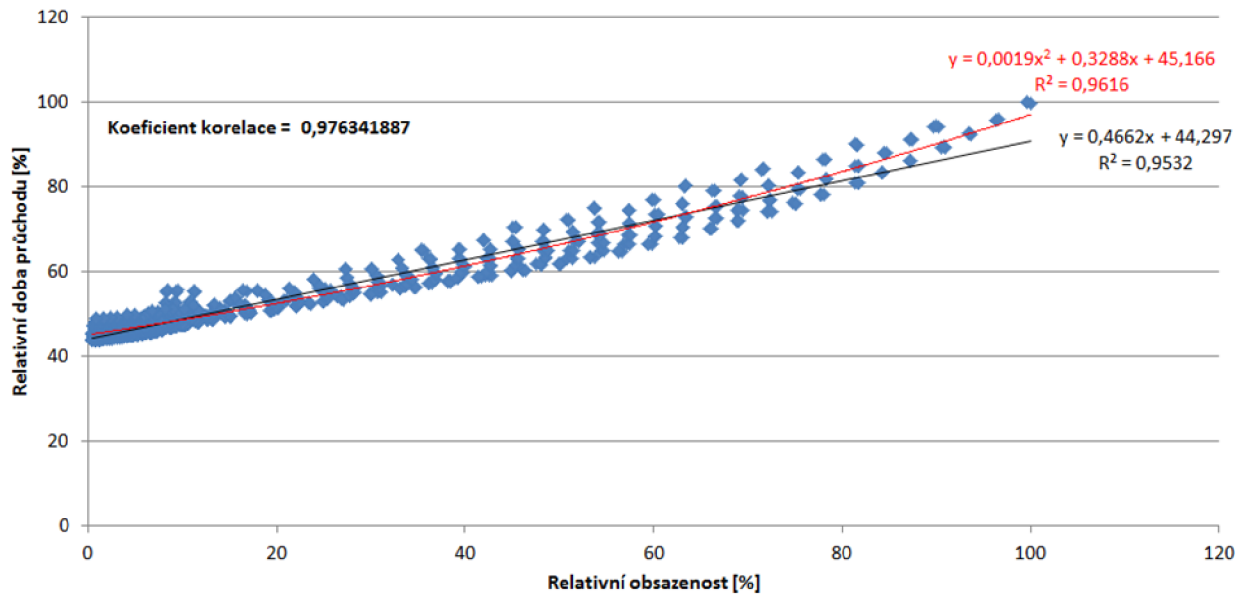
První z výsledků se zaměřuje na ověření možné závislosti mezi (relativní) dobou průchodu a (relativní) obsazeností. Simulační experimenty provedené s *testovacím simulačním modelem* naznačily možnou těsnou lineární závislost a jejich grafické výstupy (viz přílohová část práce) posuzující tuto závislost pro různé kombinace pravděpodobnostního rozdělení doby mezi příchody požadavků (do fronty před obslužnou stanicí) a doby obsluhy v uzavřeném SHO. Stejně jako v případě *testovacího simulačního modelu* i v případě modelu zvoleného výrobního úseku byla zvláště posouzena souhrnná data obsahující výsledky pro všechny varianty nastavení modelu v rámci simulačních experimentů a dále zvláště pro průměrné hodnoty (zjištěné ze tří replikací provedených pro každou testovanou variantu v rámci simulačních experimentů) příslušné jednotlivým hodnotám počtu elementů materiálového toku (v případě modelu zvoleného výrobního úseku počtu paletky obíhající po linkách TW1 a TW2). Výsledek pro linku TW1 ukazuje velmi těsnou lineární závislost mezi relativní dobou průchodu a relativní obsazeností. Uvažovat však lze v tomto případě také o závislosti kvadratické, jak ukazuje interpolace parabolou a vysoká hodnota koeficientu determinace R^2 (viz Obr. 46).

Dalším výsledkem je posouzení míry těsnosti lineární závislosti (relativní) doby průchodu a (relativní) obsazenosti. Lze konstatovat, že experimentálně zjištěná těsná lineární závislost mezi dobou průchodu elementů materiálového toku uzavřeným SHO (s vratnou větví) je pro reálný výrobní systém vykazující podobné vlastnosti jako uzavřený SHO (s vratnou větví) rovněž platná. Vliv intenzity materiálového toku vratnou větví však v případě reálného systému není

jednoznačný, zatímco u (teoretického) uzavřeného SHO je patrná (v závislosti na typu rozdělení pravděpodobnosti doby mezi vstupy požadavků a doby jejich obsluhy) rostoucí těsnost závislosti s klesající intenzitou toku požadavků vratnou větví.

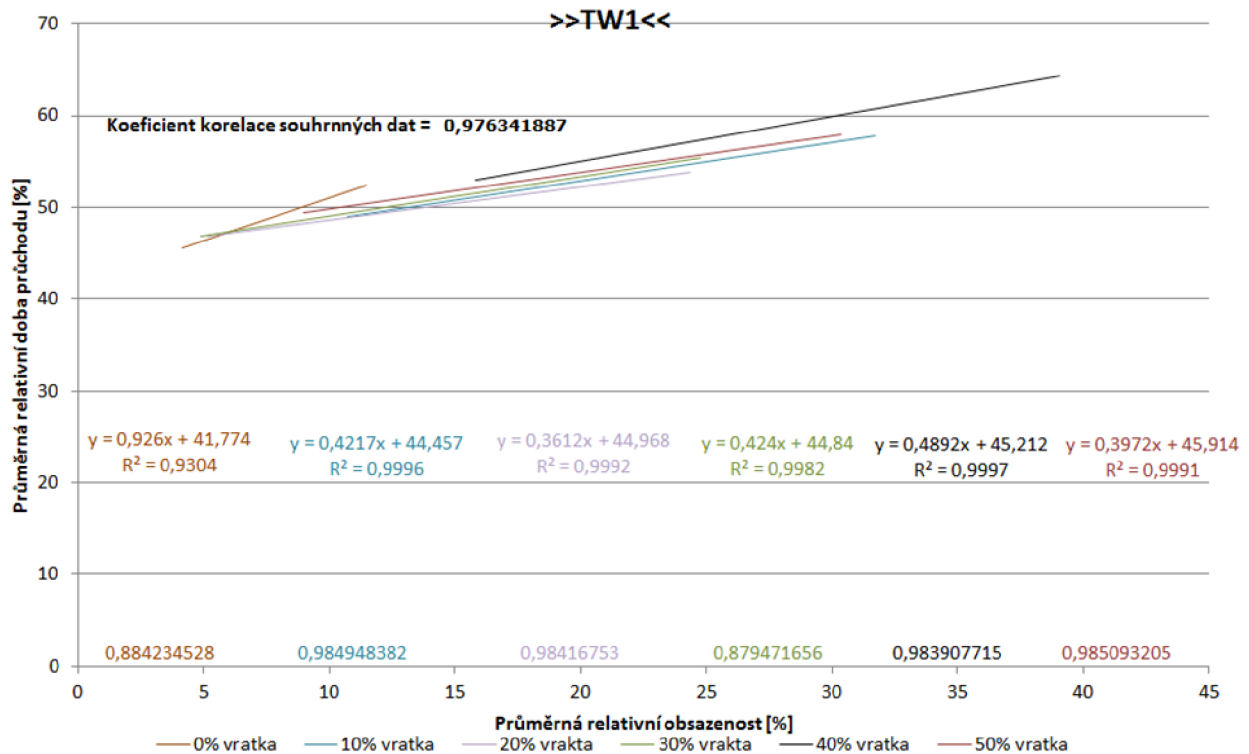
Na závěr byla vyhodnocena závislost mezi absolutními hodnotami diskutovaných signifikantních charakteristik materiálového toku. V případě, že nejsou použity vztahy (68) a (75) pro přepočet obsazenosti, resp. doby průchodu na relativní hodnotu (v rámci zjištěných hodnot), nýbrž je stejná závislost hledána přímo na základě zjištěných hodnot (tj. bez jejich vzájemného porovnání), jsou výsledky podobné, jak ukazuje Obr. 47.

Závislost relativní doby průchodu na relativní obsazenosti >>TW1<<



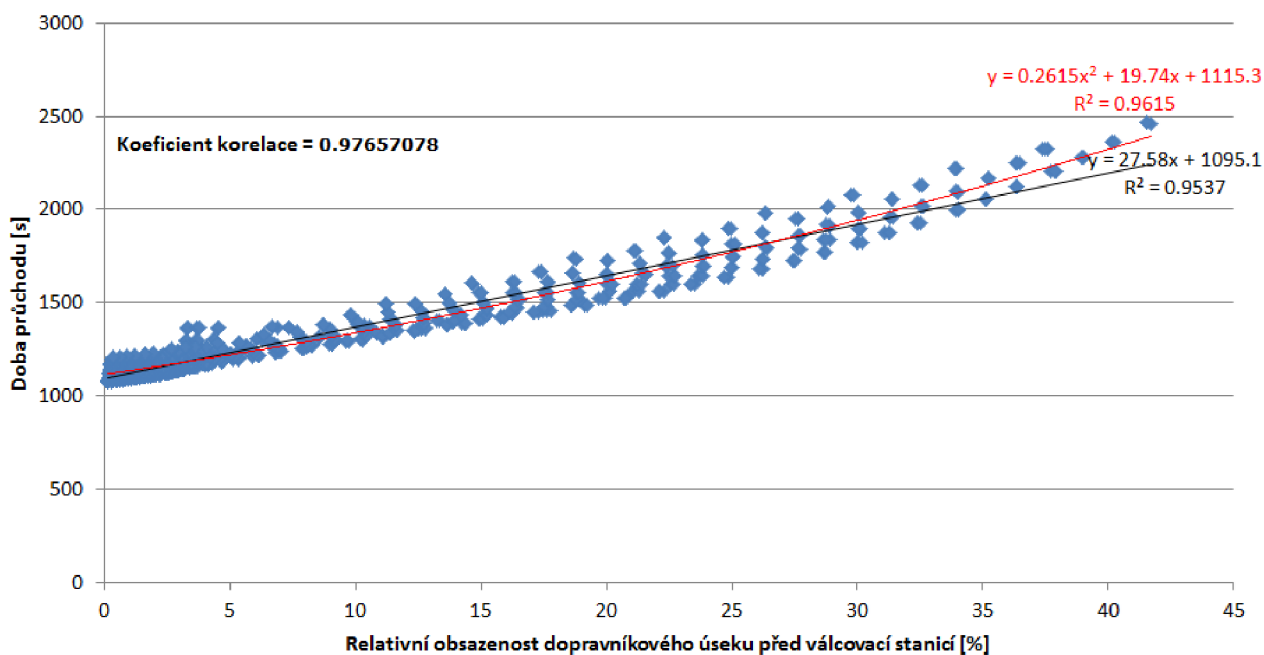
Relativní obsazenost - statistiky			Relativní doba průchodu - statistiky		
{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 3,34	{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 45,95		
{Minimum}: 0,37	{3. kvartil}: 19,55	{Minimum}: 43,67	{3. kvartil}: 53,17		
{Maximum}: 100,00	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI	{Maximum}: 100,00	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI		
{Průměr}: 16,50	{Medián}: 7,09	{Průměr}: 51,99	{Medián}: 47,70		
{Sm. odch.}: 21,49	{Prům. abs. odch.}: 16,20	{Sm. odch.}: 10,26	{Prům. abs. odch.}: 7,37		

Vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti >>TW1<<



Obr. 46 Závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti, vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti (zdroj: autor)

Závislost doby průchodu na obsazenosti >>TW1<<



Relativní obsazenost - statistiky

{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 1.31
{Minimum}: 0.14	{3. kvartil}: 8.00
{Maximum}: 41.68	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI
{Průměr}: 6.78	{Medián}: 2.83
{Sm. odch.}: 8.96	{Prům. abs. odch.}: 6.75

Relativní doba průchodu - statistiky

{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 1133.19
{Minimum}: 1076.96	{3. kvartil}: 1311.33
{Maximum}: 2466.23	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI
{Průměr}: 1282.14	{Medián}: 1176.35
{Sm. odch.}: 253.08	{Prům. abs. odch.}: 181.66

Obr. 47 Závislost doby průchodu linkou TW1 na obsazenosti úseku dopravníku před válcovací stanicí (zdroj: autor)

8 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU PRO TEORII A PRAXI

Výsledky dizertační práce lze rozdělit na část teoretickou a praktickou. Výsledky v teoretické oblasti vycházejí z popisu a rozboru materiálového toku (s důrazem na materiálový tok v logistických a výrobních systémech), způsobu jeho záznamu a sledování hodnot charakteristik materiálového toku. Dále je v teoretické rovině pojednáno o simulacích materiálového toku s důrazem na efektivitu provádění simulačních studií, který vede k popsanému konceptu simulačních metamodelů. Do teoretické části patří také uváděné principy validace simulačních (meta)modelů a statistického vyhodnocení výsledků simulačních experimentů.

Hlavním praktickým výsledkem dizertační práce je návrh metodiky pro generování materiálového toku v systému hromadné výroby pomocí simulačního (meta)modelu. V rámci ověření této metodiky byly navrženy dva koncepty simulačních metamodelů, které na sebe z hlediska zpracování či reprodukce záznamů materiálového toku volně navazují. *Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů* umožňuje na základě interně provedené analýzy záznamů materiálového toku tento rekonstruovat. *Generátor průchodů evidenčními body* umožňuje materiálový tok na základě zadaných požadavků na jeho charakteristiky simulovat.

V rámci návrhu metodiky je pozornost zaměřena na signifikantní charakteristiky materiálového toku, mezi které je zde zařazena produkce vztažená na zvolené časové období, nutná kapacita/obsazenost a doba průchodu. Experimenty provedené s *testovacím simulačním modelem* reprezentujícím uzavřený SHO se zpětnou větví je mezi (relativní) dobou průchodu a (relativní) obsazeností vysledována těsná lineární závislost. Platnost této korelace nezávisle na konceptu (teoretického) SHO s definovanými charakteristikami rozdělení doby mezi vstupy požadavků do systému a trvání obsluhy je experimentálně ověřena pomocí simulačního modelu vybraného výrobního úseku velkosériové produkce, který vykazuje s uzavřeným SHO podobnost.

8.1 PŘÍNOSY PRO TEORII

Jedním z přínosů dizertační práce pro teorii je shrnutí aktuálních poznatků z oblasti logistiky, materiálového toku, jeho (diskrétních) simulací a souvisejících (statistických) technik validace simulačních (meta)modelů a vyhodnocení výsledků simulačních experimentů do uceleného přehledu poukazujícího na souvislosti mezi příslušnými vědními disciplínami. Prostor je věnován také zmínce o významných tuzemských i mezinárodních konferencích a setkání v oboru diskrétních simulací logistických systémů. To může být využito jako odkaz na spolehlivý a aktuální zdroj informací, včetně možnosti aktivní účasti.

Kromě toho, že jsou v práci dány do souvislosti důležité charakteristiky materiálového toku, je zde uveden také stručný přehled technických řešení pro jeho sledování, jejich výhod a nevýhod.

Prostor pro další výzkum poskytuje prokázaná korelace mezi dobou průchodu a obsazeností (úseku materiálového toku). Potenciál je zejména ve zjištění závislosti těsnosti hodnot těchto charakteristik na dalších parametrech materiálového toku, jako např. podíl zpětného toku a opakování souvisejícího (technologického) procesu, eventuálně v hledání dalších závislostí a jejich kvantifikaci. Jedním z cílů zde může být určení explicitních vztahů mezi hodnotami závislých charakteristik, které budou moci být využity mj. v rámci simulačních metamodelů.

Informace týkající se teorie diskrétních simulací a související problematiky obsažené v dizertační práci spolu s využitím odkazů na další informační zdroje, oborová sdružení apod. je rovněž možné využít při odborné výuce zaměřené na logistiku, výrobní systémy a počítačové simulace a navrhování výrobních systémů a materiálového toku.

8.2 PŘÍNOSY PRO PRAXI

Stejně jako platí pro diskrétní simulace materiálového toku obecně, i v případě této práce lze největší přínosy pro praxi očekávat u podniků hromadné výroby, příp. u opakovaných procesů, kde má tedy využití simulace s cílem optimalizace příslušných procesů největší význam.

Pro podniky zabývající se simulací svých logistických, resp. výrobních procesů, ale také pro specializované společnosti nabízející mimo jiné návrh či optimalizaci logistických/výrobních procesů pomocí diskrétní simulace jako službu, je potenciálně přínosná v práci navržená metodika pro generování materiálového toku pomocí simulačního (meta)modelu. Zejména vytvořený *Generátor průchodů evidenčními* body je již v současném vývojovém stupni možné využít jako náhradu detailních simulačních modelů zohledňujících požadovaný výrobní program a směnový režim konkrétního technologického úseku. Díky modulární architektuře generátoru je do budoucna možné jeho funkce dále rozšířit, příp. upravit například pro potřeby konkrétní aplikace.

9 ZÁVĚR

Dizertační práce je zaměřena na problematiku simulací výrobních a obecně logistických systémů a souvisejících procesů. Jak bylo v jejím úvodu poznamenáno, jedná se o interdisciplinární obor, čemuž odpovídá také zaměření teoretické části práce. Ta shrnuje a posuzuje relevantní poznatky z oblastí logistiky a výrobních systémů, dále se zabývá obecně materiálovým tokem a teorií hromadné obsluhy a zahrnuje rovněž aktuální poznatky týkající se přímo diskretních simulací materiálového toku včetně tvorby metamodelů, principů a způsobů validace a verifikace simulačních modelů a statistického vyhodnocení výstupů simulačních experimentů.

Cílem dizertační práce bylo zpracovat návrh metodiky pro generování metamodelu systému hromadné výroby umožňujícího provést simulaci materiálového toku probíhajícího v tomto systému s využitím předpokládaných vzájemných závislostí charakteristik, resp. parametrů materiálového toku. V souladu s rozdělením tohoto cíle do dílčích kroků (cílů) umožňujících jeho dosažení (jak je popsáno v úvodu) obsahuje práce již ve své teoretické části přehled těchto charakteristik včetně stručného uvedení vhodnosti jejich použití v oboru diskretních simulací a také pojednání o možných způsobech určení jejich hodnot.

Příslušnému návrhu metodiky generování metamodelu systému hromadné obsluhy se věnuje další část práce. Kromě teoretických předpokladů týkajících se požadavků na tuto metodiku, resp. požadavků na simulační metamodel z ní vyplývajících, jsou v této části práce popsána dvě na sebe volně navazující řešení vytvořená ve zvoleném simulačním nástroji. Obě pracují s vytipovanými signifikantními charakteristikami materiálového toku, jejichž výběr s ohledem na možné zpětné určení povahy materiálového toku byl jedním z dílčích cílů práce. Prvním z navržených řešení je *Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů*, který umožňuje simulovat materiálový tok (probíhající konkrétním logistickým či výrobním systémem), jehož záznamy jsou v elektronické formě k dispozici. Druhé řešení představuje *Generátor průchodů evidenčními body*, který naopak umožňuje rychle získat záznamy materiálového toku, který vykazuje zadané parametry a vlastnosti. Tím toto řešení do jisté míry může nahradit jinak poměrně detailní simulační model odpovídajícího logistického (výrobního) systému. V této části práce jsou rovněž uvedeny okrajové podmínky nutné pro provedení příslušných analýz materiálového toku resp. jeho rekonstrukce pomocí navržených řešení.

V práci popsaná metodika byla experimentálně ověřena pomocí vybraného detailního simulačního modelu zvoleného velkosériového výrobního systému. Byla provedena verifikace a validace simulačního modelu tohoto systému, a s tímto modelem byly následně provedeny simulační experimenty. Jejich výsledky poukazují na charakteristiky simulovaného materiálového toku a jeho parametry. Vzájemný vztah charakteristik je pak porovnán s výstupy získanými ze série simulačních experimentů provedených s navrženým *testovacím simulačním modelem*. S přihlédnutím k těmto experimentům je vyhodnocena vzájemná závislost vytipovaných signifikantních charakteristik materiálového toku v obecném systému hromadné obsluhy. Na základě porovnání výsledků simulačních experimentů s detailním modelem výrobního systému a s *testovacím simulačním modelem* je navržen algoritmus využitelný dále v *Generátoru průchodů evidenčními body*, který tak jakožto metamodel může do jisté míry nahradit detailní simulační model obecného materiálového toku v typickém logistickém (výrobním) systému.

Přínos dizertační práce lze mimo jiné spatřovat i v provedení a uceleném přehledu výsledků simulačních experimentů zaměřených na vzájemnou závislost významných charakteristik materiálového toku, která je současně dána do souvislosti s obecnými poznatky a teoretickými vztahy pro systémy hromadné obsluhy. Zejména ve velkosériové výrobě vykazují příslušné provozy často podobnost s uzavřenými systémy hromadné obsluhy, a proto lze tyto poznatky využít v praxi např. ve fázi validace simulačních modelů nebo jejich náhrady zjednodušenými metamodely. S ohledem na potenciály pro další rozvoj dané problematiky jsou přínosná vytvořená řešení *Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů*, a zejména pak *Generátor průchodů evidenčními body*. Ten bude možné v praxi uplatnit zejména při řešení úloh kapacitního posouzení úseků mezi oddělenými výrobními oblastmi. Z hlediska teorie je možné díky modulární architektuře tohoto řešení pokračovat ve vývoji dalších funkčních bloků. Stejně tak je v teoretické rovině ponechán prostor návrhu alternativních algoritmů pro generování materiálového toku požadovaného chování, které mohou být následně do generátoru implementovány.

10 PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA SE VZTAHEM K PROBLEMATICE DIZERTAČNÍ PRÁCE

- [1] HLOSKA, Jiří. *Analýza vlivu uspořádání a charakteristik výrobní struktury na výrobní proces*. In: Mezinárodní konference Witness 2011. s. 25-54.
- [2] HLOSKA, Jiří. *Analýza a rekonstrukce logistických procesů pomocí simulačního metamodelu*. In *Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů: sborník přednášek : 14.-15. září 2011*. Brno: VUT Brno, 2011, s. 91-94. ISBN 978-80-214-4323-5.
- [3] HLOSKA, Jiří a Vojtěch PALETA. *MES - diskretní simulační model pro optimalizaci procesů*. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2012, roč. 18, č. 7, s. 24-28. ISSN 1210- 9592.
- [4] HLOSKA, Jiří. *Working with the Modular Library Automotive*. BANGSOW, Steffen. *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. s. 241-276. ISBN 9783642287763.
- [5] HLOSKA, Jiří. *Inovace výuky logistických procesů pomocí metody diskretní simulace*. In: *Západočeská univerzita v Plzni. XXXVIII. mezinárodní konference dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů - Sborník příspěvků*. Plzeň, 2012. s. 31-34. ISBN 978-80-261-0141-3.
- [6] HLOSKA, Jiří a Jiří ŠTOCEK. *Simulace zřetězení linky pro obrábění hřídelí*. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2013, roč. 19, č. 8-9, s. 16-19. ISSN 1210- 9592.
- [7] HLOSKA, Jiří a Jiří ŠTOCEK. *Aplikace standardu VDA Powertrain v rámci simulace zřetězení linky pro obrábění hřídelů*. In *Výrobní systémy dnes a zítra*. CD verze: 2013. s. 24-30. ISBN 978-80-7494-024-8.
- [8] HLOSKA, Jiří a Martin KUBÍN. *Virtual Commissioning of Mechatronics Systems with the Use of Simulation*. JABLOŇSKI, Ryszard a Tomáš BŘEZINA. *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. Mechatronics. Brno: Springer, 2013, s. 33-40. ISBN 978-3-319-02294-9.
- [9] HLOSKA, Jiří. *Kam směřuje simulace podnikových procesů a koncept digitální továrny?*. *Technik: měsíčník Hospodářských novin*. *Economia*, a. s.: Praha, 2013, roč. XXI, č. 6, s. 34-35. ISSN 1210- 616X.
- [10] HLOSKA, Jiří a Miroslav ŠKOPÁN. *Plánování a řízení provozu pivovaru s podporou počítačové simulace*. *Kvasný průmysl: odborný časopis pro výrobu nápojů a biochemické technologie*. Praha: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Praha ve spolupř. se Sahm, s. r. o., 2014, roč. 60, č. 6, s. 146-150. ISSN 0023- 5830.

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] **KÜHN, Wolfgang.** *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner.* Wien : Hanser Verlag, 2006. ISBN-10: 3-446-40619-0.
- [2] **VOTRUBA, Zdeněk, Jana KALIKOVÁ a Marek KALIKA.** *Systémová analýza.* Praha : České vysoké učení technické, 2008. str. 192. ISBN 978-80-10-0401-2.
- [3] **VDI-GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK.** VDI-Richtlinie 3633. *Simulation von Logistik-,Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen: Materialfluss.* Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2008.
- [4] **NOCHE, Bernd a Sigrid WENZEL.** *Marktspiegel in der Simulationstechnik in Produktion und Logistik.* Köln: TÜV Rheinland, 1991. 167 p. ISBN 3-88585-746-4.
- [5] **HLOSKA, Jiří a Martin KUBÍN.** Virtual Commissioning of Mechatronics Systems with the Use of Simulation. JABLOŇSKI Ryszard a Tomáš BŘEZINA. *Mechatronics: Recent Technological and Scientific Advances.* Brno : Springer International Publishing, 2013, s. 33-40. ISBN 978-3-319-02294-9.
- [6] **BANGSOW, Steffen.** *Fertigungssimulation mit Plant Simulation und SimTalk: Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen.* München: Carl Hanser Verlag, 2008. ISBN 978-3-446-41490-7.
- [7] **KLIEJNEN, Jack, P.** *Design and analysis of simulation experiments.* New York: Springer, 2008, xiii, 216 s. International series in operations reserasch. ISBN 978-0-387-71812-5.
- [8] **ŠTOČEK, Jiří.** *Optimalizace materiálového toku ve vybraném průmyslovém závodě: Material flow optimization in a certain manufacturing company : zkrácená verze Ph.D. thesis.* V Brně: Vysoké učení technické, 2005. 26 s. ISBN 80-214-2885-6.
- [9] **PERNICA, Petr.** *Logistický management. Teorie a podniková praxe.* 1. vyd. Praha: RADIX, 1998. 660 s. ISBN 80-860-3113-6.
- [10] **ŠTOČEK, Jiří.** *Optimalizace materiálového toku ve vybraném průmyslovém závodě.* Brno: VUT FSI, 2005. 110 s.
- [11] **ŠTOČEK, Jiří a Vladimír KARPETA.** Systémová analýza dat o průchodu zakázky viděnními body. *Automa: časopis pro automatizační techniku.* Praha: FCC Public, 2010, č. 6, s. 8-10. ISSN 1210- 9592
- [12] **SVOBODA, Vladimír a Patrik LATÝN.** *Logistika.* Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 159 s. ISBN 80-01-02735-X.
- [13] **DAVID, Petr a František ORAVA.** *Zasílatelství.* Vyd. 1. Praha : České vysoké učení technické, 2008, 115 s. ISBN 978-80-01-04035-5.
- [14] **PRECLÍK, Vratislav.** *Průmyslová logistika.* Vyd. 1. Prah: Vydavatelství ČVUT, 2000, 116 s. ISBN 80-01-02139-4.
- [15] **CHRISTOPHER, Martin.** *Logistics & Supply Chain Management.* fourth edition. New York: Financial Times Prentice Hall, 2011, ISBN 978-027-3731-122.
- [16] **HLOSKA, Jiří a Miroslav ŠKOPÁN.** Plánování a řízení provozu pivovaru s podporou počítačové simulace. *Kvasný průmysl: odborný časopis pro výrobu nápojů a biochemické technologie.* Praha.: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Praha ve spolupr. se Sahm, s. r. o, 2014, roč. 60, č. 6, s. 146-150. ISSN: 0023- 5830
- [17] **ARNOLD, Dieter a Kai FURMANS.** *Materialfluss in Logistiksystemen.* 6., erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer, 2009, xv, 397 s. ISBN 978-3-642-01404-8.

- [18] **EffizienzCluster Management, GmbH.** EffizienzCluster LogistikRuhr - Leitthemen und Projekte. *EffizienzCluster LogistikRuhr*. [Online] 2012. [Citace: 29. 3 2014.] http://www.effizienzcluster.de/de/leitthemen_projekte/projekt.php?proPid=44.
- [19] **ŠTOČEK, Jiří a Vladimír KARPETA.** *Uživatelský manuál Analyser of Production Processes (APP) (Analyzér výrobních procesů): část věnovaná analýze dat z evidenčních bodů*. [Dokument] 30. září 2010.
- [20] **HAMPL, Petr.** Kendallová klasifikace obsluhových systémů. *Access server*. [Online] České vysoké učení technické v Praze, FEL, 29. Prosinec 2005. [Citace: 29. 3 2014.] <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2005111601.1214-9675>.
- [21] **KOČÁRKOVÁ, Dagmar.** *Základy dopravního inženýrství*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-03022-9.
- [22] **HESSE, Stefan a Gerhard SCHNELL.** *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0471-6.
- [23] Startseite. *Tracing Intelligenter Logistikobjekte*. [Online] raduga, 2014. [Citace: 3. červenec 2014.] <http://www.tilo.uni-due.de/>.
- [24] **Agentur für Internet und Webdesign, Multimetia und Software Webdesign, bgp. e.media GmbH.** EffizienzCluster LogistikRuhr - Leitthemen und Projekte. *EffizienzCluster LogistikRuhr*. [Online] EffizienzCluster Management GmbH, 2012. [Citace: 3. červenec 2014.] http://www.effizienzcluster.de/de/leitthemen_projekte/projekt.php?proPid=44.
- [25] **LAW, Averill M.** *Simulation Modeling and Analysis*. fourth edition. Singapore: Mc Graw Hill, 2007. ISBN 978-007-125519-6.
- [26] **MÄRZ, Lothar, a další.** *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 987-3-642-14535-3.
- [27] **WENZEL, Sigrid, a další.** *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, s. 1-11. ISBN 978-3-540-53272-3.
- [28] **RABE, Markus, Sven SPIECKERMANN a Sigrid WENZEL.** *Verifikation und Validierung für Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-35281-5.
- [29] **WANG, Yufeil.** *Methode für die simulationsunterstützte Optimierung am Beispiel von Montagesystemen*. München: Carl Hanser Verlag, 1995. 3-446-18171-7.
- [30] **SARGENT, Robert G.** Validation and Verification of Simulation Models. In: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 2004..
- [31] **SARGENT, Robert G.** Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. 2004. s. 50-59.
- [32] **SARGENT, Robert G.** Simulation Model Verification and Validation. In: *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*. 1991, s. 37-47.
- [33] **SARGENT, Robert G.** Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 2007
- [34] **SARGENT, Robert G.** Verifying and Validating Simulation Models. In: *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*. 1996. s. 55-64.

- [35] **ROBINSON, Stewart.** Simulation Model Verification and Validation: Increasing the User's Confidence. In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. 1997
- [36] **BALCI, Osman.** Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification, and Testing. In: *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. 1995. s. 147-154.
- [37] **BALCI, Osman.** Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. 1997. s. 135-141.
- [38] **MAYER, Gottfried a Ulrich BURGES.** Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssteuerungssystemen in der Automobilindustrie mittels Emulation. ASIM 06. *ASIM 06 web*. [Online] 2006. [Citace: 21. Listopad 2010.]. <http://www.simplan.de/de/termine-medien/artikel/func-startdown/25/>.
- [39] **KUNCOVÁ, Martina, Michal MEDONOS a Martin, DLOUHÝ.** Využití simulačních modelů k analýze výrobního procesu. In *Výrobní systémy dnes a zítra* : Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. s. 13-14. ISBN 978-80-7372-669-0.
- [40] **VÁSZONDY, Alexander, Zdena KRÁLOVÁ a Branislav AMLAN.** Simulačná analýza linky Alfa-Porsche v a.s. Volkswagen Slovakia. In: *Mezinárodní konference WITNESS 2005 | Humusoft*. [Online] Květen 2005. [Citace: 30. říjen 2011.] <http://www2.humusoft.cz/www/papers/witkonf05/prispevky/PDF/Kralova2.pdf>.
- [41] **VEGNEROVÁ, Petra a Ivan GROSS.** Propojení optimalizačního a simulačního modelu pro plánování a řízení farmaceutické výroby. In: *Mezinárodní konference WITNESS 2005 | Humusoft*. [Online] 26-27. Květen 2005. [Citace: 30. Říjen 2010.] <http://www2.humusoft.cz/www/papers/witkonf05/prispevky/PDF/Vegnerova.pdf>.
- [42] **CORTÉS, Pablo, Luis ONIEVA a Chosé GUADIX.** Optimising and simulating the assembly line balancing problem in a motorcycle manufacturing company: a case study. In: *International Journal of Production Research*. No. 12, 15. June 2010, Sv. Vol. 48, s. 3637–3656.
- [43] **KUMAR, Sameer a Daniel A. NOTTESTAD.** Flexible capacity design for the Focus Factory – a case study. In: *International Journal of Production Research*, No. 5, místo neznámé: Taylor & Francis, 1. March 2009, Sv. Vol. 47, s. 1269-1286. ISSN 1366–588X.
- [44] **ŠTOČEK, Jiří a Vladimír KARPETA.** Projekt digitální továrny ve Škoda Auto. In: *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, červenec 2008, 7, s. 58-60. ISSN 1210- 9592
- [45] **HLOSKA, Jiří a Vojtěch PALETA.** MES - diskrétní simulační model pro optimalizaci procesů. In: *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, červenec 2012, 7, s. 24-28. ISSN 1210-9592
- [46] **BAYER, Johann, Thomas COLLISI a Sigrid WENZEL.** *Simulation in der Automobilproduktion*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3-540-44192-1.
- [47] **KUHN, Axel a Markus RABE.** *Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. ISBN 3-540-63854-7.
- [48] **FUJIMOTO, Richard M.** *Parallel and Distributed Simulation Systems*. New York: Wiley-Interscience, 2000. ISBN 0-471-18383-0.
- [49] **HAMILTON, John Jr., David A NASH a Udo W POOCH.** *Distributed Simulation*. New York : CRC Press LLC, 1997. ISBN 0-8493-2590-0.

- [50] **KLEIJNEN, Jack P. C.** Sensitivity Analysis and Optimization of Simulation Experiments, including Case Studies. In: *EUROSIM - Simulation News Europe*. 6, 6. November 1992, s. 5-7.
- [51] **KLEIJNEN, Jack P. C. a Willem van GROENENDAAL.** *Simulation: A Statistical Perspective*. Chichester: Johny Willey & Sons, 1992. ISBN 0-471-93055-5.
- [52] **BRACHT, Uwe, Dieter GECKLER, Dieter a Sigrid WENZEL.** *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-3-540-89038-6.
- [53] **BANKS, Jerry, a další.** *Discrete-Event System Simulation*. Fifth Edition. Upper Saddle River, Boston : Pearson Education, 2010. ISBN 978-0-13-815037-2.
- [54] **BALCI, Osman.** Quality Assessment, Verification, and Validation of Modelling and Simulation Applications. In: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. 2004.
- [55] **ZEIGLER, Bernard P.** *Theory of Modeling and Simulation*. New York : Wiley, 1976, xxii., 435 p. ISBN 04-719-8152-4.
- [56] **SARGENT, Roberg G.** Some Approaches and Paradigms for Verifying and Validating Simulation Models. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. 2001.
- [57] **MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ.** *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: Academia, 2006. 982 s. ISBN 80-200-1396-2.
- [58] **BALCI, Osman a Richart E. NANCE.** Formulated problem verification as an explicit requirement of model credibility. In: *Simulation SAGE*, 1985. ISSN 0037-5497/85.
- [59] **SEILA, Andrew F.** Output Analysis for Simulation. In: *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*. 1991.
- [60] **SCHRUBEN, Lee W.** Detecting Initialization Bias in Simulation Output. In: *Operations Research*. 3, May-Jun. 1982, Sv. 30, s. 569-590.
- [61] **SCHRUBEN, Lee W a SINGH, H.** Optimal Tests for Initialization Bias in Simulation Output. In: *Operations Research*. 6, Nov.-Dec. 1983, Sv. 31, s. 1167-1178.
- [62] **YÜCESAN, Enver.** Randomization tests for initialization bias in simulation output. In: *Naval Research Logistics*. 5, August 1993, Sv. 40, s. 643-663.
- [63] **HLOSKA, Jiří.** Working with the Modular Library Automotive. [autor knihy] BANGSOW, Steffen. *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. 1st. ed. Steffen Bangsow. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012, 12, s. 242-276.
- [64] **CLAUSING, Matthias a Stefan HEINRICH.** Mensch, Maschine, Material: die Standardisierung der Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. In: *ProduktdatenJournal 1/2008*. [Online] VDA UAG Ablaufsimulation, 16. květen 2008. [Citace: 1. srpen 2012.] <http://www.virtuele-fabrik.de/de/termine-medien/artikel/func-startdown/18/>.
- [65] Hauptseite - VDAWiki. [Online] 3. únor 2012. [Citace: 1. srpen 2012.] <http://www.vda-ablaufsimulation.de/index.php/Hauptseite>.
- [66] **PICKAVÉ, Peter.** *Dokumentation Experimentsteuerung für eM-Plant ab Version 7.0*. [Dokument] místo neznámé: iSILOG GmbH, iSILOG GmbH, 6. prosinec 2004. *Dokumentation_Experimentsteuerung_8_60.doc*.
- [67] **VERSTEEGT, C. a A. VERBRAECK.** The extended issue of simulation in evaluating real-time control systems of AGVs and automated material handling systems. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2002. s. 1659-1662. ISSN 0-7803-7614-5 .

- [68] **STRIGL, Thomas.** Materialflusssimulation zur schnellen Inbetriebnahme realer Steuerungen. In: *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. č. 01-02, 2009, s. 76-80.
- [69] **MAYER, Gottfried a Ulrich BURGES.** Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssteuerungssystemen in der Automobilindustrie mittels Emulation. In: *ASIM Tagungsband*. SCS Publishing House, 2006. s. 541-550. ISSN 3-936150-48-6.
- [70] **LEBARON, T. a K. THOMPSON.** Emulation of a material delivery system. In: *Winter Simulation Conference*. Washington DC, 1998.
- [71] **HLOSKA, Jiří.** Analýza a rekonstrukce logistických procesů pomocí simulačního metamodelu. 1, Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2011, In: *Sborník přednášek XXXVII. mezinárodní konference dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů: sborník přednášek : 14.-15. září 2011*. Brno: VUT Brno, 2011, s. 91-94. ISBN 978-80-214-4323-5.
- [72] **Český normalizační institut.** ČSN ISO 5807. *Dokumentační symboly a konvence pro vývojové diagramy toku dat, programu a systému, síťové diagramy programu a diagramy zdrojů systému*. Praha, 1995.
- [73] **Verein Deutscher Ingenieure.** VDI 4499. *Digitale Fabrik: Grundlagen*. místo neznámé : Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [74] **RÜGNER, Thomas a Gudula RÜGNER.** *Parallele und verteilte Programmierung*. Heidelberg : Springer, 2000. ISBN 3-540-66009-7.
- [75] **BALCI, Osman a F. William ORMSBY.** Planning for Verification, Validation, and Accreditation of Modelling and Simulation Applications. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. 2000.

13 SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

A	Povaha vstupů požadavků do systému hromadné obsluhy	
$\hat{\mathbb{B}}$	Odhad vektoru regresních parametrů regresního simulačního modelu	
B	Povaha obsluhy požadavků na stanicích systému hromadné obsluhy	
\mathbb{B}	Vektor regresních parametrů regresního simulačního modelu	
CRO_i	Celková relativní obsazenost systému hromadné obsluhy při i-tém pozorování	[%]
\check{COMP}	Délka časového období pro plánování produkce	[s]
D	Symbol pro Diracovo rozdělení doby mezi vstupy a obsluhy	
d	Odhad střední hodnoty rozdílů výstupů modelu v rámci t-testu	
d_{ij}	Rozdíl systémového výstup a výstupu simulačního modelu	
d_p	Pořadové číslo dne v rámci týdenní periody	[-]
DP_i	Doba průchodu zjištěná při i-tém pozorování	[s]
$E(t)$	Střední hodnota doby mezi průchody	[s]
$E(t_a)$	Střední hodnota doby mezi vstupy	[s]
$E(t_b)$	Střední hodnota doby obsluhy	[s]
E_K	Symbol pro Erlangovo rozdělení doby mezi vstupy a obsluhy	
F	Množina funkcí prvků systému	
$f(t)$	Hustota pravděpodobnosti doby mezi průchody	[-]
$F(t_K)$	Distribuční funkce doby mezi průchody nepřesahující hodnotu t_K	[-]
f_0	Transformační funkce regresního simulačního metamodelu	
f_1	Výstupní veličina simulačního modelu jako funkce stochastických parametrů	
$F_{p,q}$	Kritická hodnota pro test nedostatku souladu (<i>Rao's Lack-of-Fit test</i>)	[-]
G	Symbol pro obecné rozdělení doby mezi vstupy a obsluhy	
\hat{g}^2	Odhad čtverců reziduí testu nedostatku souladu (<i>Rao's Lack-of-Fit test</i>)	[-]
GK	Počet kombinací nezávislých parametrů a proměnných	[-]
h	Počet vysvětlujících proměnných regresního simulačního modelu	[-]
H_0	Nulová hypotéza	
IO	Procento shodných dílů na konci výrobního procesu	[%]
IO_i	Podíl shodných dílů vyrobených na i-tém zařízení	[-]
IO^P	Výsledný podíl shodných dílů produkovaných paralelně řazenými zařízeními	[%]
IO^S	Výsledný podíl shodných dílů produkovaných sériově řazenými zařízeními	[%]
K	Maximální počet požadavků v systému hromadné obsluhy	[-]
K	Celková kapacita systému	[-]
k	Počet navzájem nezávislých fází, do kterých je rozdělen proces obsluhy	[-]
k	Počet parametrů simulačního modelu reálného systému	[-]
K_A	Počet aktivních prvků (nosičů materiálu) v systému hromadné obsluhy	[-]
K_j	Kapacita prvků testovacího simulačního modelu	[-]
K_O	Počet pozorování výstupů dvou simulačních (meta)modelů	[-]
L	Průměrná délka cyklu (počtu pozorování) přes všechny dávky (<i>batches</i>)	[-]

l	vzdálenost dvou bodů na trajektorii materiálového toku	[m]
L_i	Délka cyklu (počet pozorování) v rámci i-té dávky (i-tý <i>batch</i>)	[-]
M	Symbol pro exponenciální rozdělení doby mezi vstupy a obsluhy	
m	Počet paralelně řazených obslužných stanic systému hromadné obsluhy	[-]
m_B	Počet dávek (<i>batches</i>)	[-]
m_i	Maximální počet iterací pro vyhledávání časového vymezení	[-]
m_K	Počet kombinací hodnot vstupních parametrů <i>testovacího simulačního modelu</i>	[-]
m_{n+1}	Počet replikací provedených s regresním simulačním modelem	[-]
n	Počet vstupních parametrů regresního simulačního metamodelu	[-]
n_i	Pořadí iterace pro vyhledání časového vymezení	[-]
NIO	Podíl produkce neshodných dílů	[%]
n_p	Celkový počet pozorování při experimentech s <i>testovacím simulačním modelem</i>	[-]
N_S	Střední počet požadavků v systému hromadné obsluhy	[-]
N_W	Střední počet požadavků ve frontě	[-]
P	Denní interval v rámci analýzy záznamů průchodů evidenčním bodem	[s]
$PČO$	Délka produktivního časového období	[s]
PDP	Průměrná denní produkce	[ks·den ⁻¹]
P_i	Průchodnost při i-tém pozorování	[ks·s ⁻¹]
p_i	Pravděpodobnost dosažení doby mezi průchody o hodnotě t_i	[-]
$(pp_t)_j$	Počet elementů materiálového toku obsazujících j-tý prvek po délku t-tého časového intervalu	[-]
$(pp_t)_s$	Počet elementů materiálového toku obsazujících systém po délku t-tého časového intervalu	[-]
P_S	Perioda pro hledání časových vymezení společných prodlev mezi záznamy	[s]
$PSČO$	Produkce odpovídající zohledněným technickým a organizačním vlivům	[-]
PSU	Neuskutečněná produkce odpovídající celkové době seřizování	[-]
p_{TSM}	Počet prvků testovacího simulačního modelu se sledovanou relativní obsazeností	[-]
PVN	Perioda výměny nástroje	[-]
Q	množina prvků systému	
r	Pseudonáhodné číslo jako výsledek rekurzivního algoritmu	[-]
R/P	množina relací mezi prvky systému	
r_1	<i>seed value</i> pro proud pseudonáhodných čísel	[-]
R^2	Koeficient determinace	[-]
RDP_i	Relativní doba průchodu	[%]
R_i	Počet replikací provedených s i-tým modelem	[-]
RO_i	Relativní obsazenost systému hromadné obsluhy bez obslužné stanice při i-tém pozorování	[%]
RO_{sj}	Relativní obsazenost j-tého prvku zjištěná simulačními experimenty s <i>testovacím simulačním modelem</i>	[%]

RP_i	Relativní průchodnost při i-tém pozorování	[%]
S	Počet zdrojů požadavků v systému hromadné obsluhy	[-]
s	rozestup elementů materiálového toku	[m]
s_0	délka elementů materiálového toku	[m]
s^2	Výběrový rozptyl výstupních hodnot modelů	[-]
$SČO$	Sledované časové období	[s]
S_d^2	Odhad rozptylu výstupních hodnot modelů v rámci t-testu	[-]
S_i^2	Odhad rozptylu výstupních hodnot pro model i	[-]
Sp	Celková spolehlivost systému	[%]
Sp_i	Spolehlivost i-tého zařízení	[-]
Sp^P	Výsledná spolehlivost systému paralelně řazených zařízení	[%]
Sp^S	Výsledná spolehlivost systému sériově řazených zařízení	[%]
SU	Očekávaná ztráta průměrné denní produkce z důvodu seřízení	[ks·den ⁻¹]
SU_P	Procentuální ztráta produkce z důvodu seřízení	[%]
SU_P^D	Perioda seřizování v rámci jednoho dne	[hod]
SU_T	Střední délka trvání seřízení	[s]
$s_{\bar{w}}$	Standardní odchylka průměrné hodnoty výstupní veličiny přes všechny dávky simulačního běhu	[-]
T	Takt	[s]
t	Doba mezi průchody	[s]
t_0	Statistika t-testu	[-]
t_0	Čas a datum prvního záznamu průchodu evidenčním bodem	
t_a	Doba mezi vstupy	[s]
t_b	Doba obsluhy	[s]
T_{BN}	Průměrný takt úzkého místa	[s]
T_{BN}^{TOZ}	Efektivní takt úzkého místa při zohlednění některých technických a organizačních ztrát	[s]
T_{BN}^{VVN}	Efektivní takt úzkého místa při uvažování technických a organizačních ztrát	[s]
TD	Délka časového období pro vyhodnocení periody seřizování	[hod]
t_i	zvolená hodnota doby mezi průchody dosažená s pravděpodobností t_i	[s]
t_i	Časový a datový okamžik záznamu průchodu evidenčním bodem	
t_i^{max}	Největší hodnota data a času záznamu průchodů evidenčním bodem	
t_i^{min}	Nejmenší hodnota data a času záznamu průchodů evidenčním bodem	
t_K	zvolená hodnota doby mezi průchody	[s]
T_O	Sledované časové období při experimentech s <i>testovacím simulačním modelem</i>	[s]
TP	Poruchovost vyplývající z údaje o spolehlivosti	[%]
\bar{t}_r	Střední doba trvání dokončení obsluhy	[s]
t_S	Střední doba setrvání v systému hromadné obsluhy	[s]
t_S	Kritická hodnota Studentova rozdělení	[-]
TVN	Trvání výměny nástroje	[s]
t_W	Střední doba čekání ve frontě	[s]

T_Z	Časový interval pořízení záznamů průchodů evidenčním bodem	[s]
$t_{\alpha/2,k-1}$	Kritická hodnota t-testu s k-1 stupni volnosti	[-]
v	rychlost dopravního/manipulačního zařízení	[m·s ⁻¹]
v_a	Variační koeficient doby mezi vstupy	[-]
v_b	Variační koeficient doby trvání obsluhy	[-]
v_i	i-tý vstupní parametr regresního simulačního metamodelu	
VN	Očekávaná ztráta průměrné denní produkce z důvodu výměny nástroje	[ks·den ⁻¹]
$VNIOPR$	Vliv podílu neshodných dílů na dosaženou produkci	[%]
VN_p	Procentuální ztráta dosažené produkce z důvodu výměny nástroje	[%]
VSR	Vliv směnového režimu na dosaženou produkci	[%]
VSU	Procentuální úroveň produkce při zahrnutí vlivu seřízení	[%]
VT	Vliv technických prostojů na dosaženou produkci	[%]
VVN	Procentuální úroveň produkce při zahrnutí organizačních a technických prostojů	[%]
\bar{w}	Průměrná hodnota výstupní veličiny přes všechny dávky simulačního běhu	
w	Výstupní veličina regresního simulačního metamodelu	
W_{ij}	Výstup simulačního modelu, resp. metamodelu	
\bar{w}_i	Průměrná hodnota výstupní veličiny pro i-tou dávku simulačního běhu	
x_{ij}	<i>Vstup regresního simulačního metamodelu (regresní proměnná)</i>	
y	Výstupní veličina modelu/metamodelu (obecně)	
\hat{y}_{-i}	<i>Odhad výstupního parametru regresního simulačního modelu při vynechání i-té kombinace</i>	
y_{ij}	<i>Výstup regresního simulačního metamodelu</i>	
Z	Množina záznamů průchodů evidenčním bodem	
z	<i>Standartní chyba odhadu (Studentized prediction error)</i>	
$z_{1-\alpha/2}$	<i>Kvantil náhodné proměnné s normálním rozdělením pravděpodobnosti</i>	[-]
z_i	i-tý parametr simulačního modelu reálného systému	
Z_{ij}	Systémový výstup, resp. výstup detailního simulačního modelu	
z_p	Celkový počet paralelně zřetěžených zařízení	[-]
z_s	Celkový počet sériově zřetěžených zařízení	[-]
Δt	Krok cyklického procházení záznamů průchodu evidenčním bodem	[s]
$(\Delta t)_j$	Délka t-tého časového intervalu, po který byl j-tý prvek obsazen daným počtem elementů materiálového toku	[s]
$(\Delta t)_s$	Délka t-tého časového intervalu, po který byl systém obsazen daným počtem elementů materiálového toku	[s]
α	Hladina významnosti	[%]
α_E	Pravděpodobnost zamítnutí modelu	[%]
α_{gk}	Hladina významnosti použitá pro testování g-té kombinace	[%]
β	Riziko uživatele (<i>Model user`s risk</i>)	[%]
β_h	Regresní parametr regresního simulačního modelu	[-]
ε	Okolí aktuálního časového bodu analyzovaných záznamů průchodů	[s]
ε	Poloměr okolí aktuálního časového bodu	[s]

ε_{ij}	Stochastická chyba regresního simulačního metamodelu	[-]
θ	Intenzita vstupů	[ks·s ⁻¹]
θ_i	Odhad střední hodnoty výstupní veličiny modelu i při testování hypotézy o shodě s jiným modelem	[-]
κ	Počet požadavků v systému hromadné obsluhy	[-]
λ	Průchodnost	[ks·s ⁻¹]
λ_{MAX}	Maximální průchodnost	[ks·s ⁻¹]
λ_S	Míra validity	[%]
ρ	Stupeň vytížení	[%]
$\hat{\sigma}_t^2$	Rozptyl výstupu regresního simulačního modelu	
τ	Doba průchodu	[s]

14 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACM	Association for Computing Machinery
AGV	Automated Guided Vehicle (automaticky řízené manipulační prostředky)
API	Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)
APP	Analysér of Production Processes
ASA	American Statistical Association
AutomationML	Automation Markup Language
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange (druh formátu dat)
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COM	Component Object Model (druh hardwarového rozhraní)
CPU	Central Processing Unit (procesor)
DDE	Dynamic Data Exchange (dynamická výměna dat)
EAN	European Article Number
EB	evidenční bod
FIFO	First In First Out
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
HTML	HyperText Markup Language (značkovací jazyk pro hypertext)
HW	Hardware
i.i.d.	Independent Identically Distributed
ID	jednoznačně přiřazené (unikátní) číselné označení pro každý element materiálového toku
IGA	interní grantová agentura
IIE	Institute of Industrial Engineers
IS	informační systém
IT	informační technologie
JIT	Just In Time
LAN	Local Area Network (lokální síť)
LIFO	Last In First Out
MICR	Magnetic Ink Character Recognition
MIMD	multiple-instruction, multiple-data
MISD	multiple-instruction, single-data
MS	Microsoft
MTBF	mean time between failures (střední doba mezi poruchami)
MTTR	mean time to repair (střední doba do opravy)
NAG	Numerical Algorithm Group
OCR	Optical Character Recognition
ODBC	Open Database Connectivity (standardizované softwarové vybavení pro přístup k databázovým systémům)
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC	OLE for Process Control (komunikační protokol rozhraní mezi hardware a software produkty průmyslové automatizace)
PLC	programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PLM	Product Lifecycle Management (správa životního cyklu výrobku)

QR	Quick Response
SCS	The Society for Modeling and Simulation International
SHA	systematic handling analysis
SHO	system hromadné obsluhy
SIMD	single-instruction-stream, multiple-data-stream
SISD	single-instruction, single data
SQL	Structured Query Language (strukturovaný dotazovací jazyk)
SW	Software
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol (primární transportní protokol - TCP/protokol síťové vrstvy - IP)
TiLO	Tracing Intelligenter LogistikObjekte
UCC	Uniform Commercial Code
VBA	Visual Basic for Application (skriptovací jazyk)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VV&A	verifikace, validace a akreditace
VV&C	verifikace, validace a certifikace
VV&T	verifikace, validace a testování
WAN	Wide Area Network (rozsáhlá počítačová síť)
WSC	Winter Simulation Conference
XML	eXtensible Markup Language (rozšiřitelný značkovací jazyk)

15 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 SHO – konstantní doba mezi příchody požadavků, konstantní doba obsluhy: závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti, vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti

Příloha 2 SHO – rovnoměrné rozdělení doby mezi příchody požadavků, exponenciální rozdělení doby obsluhy: závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti, vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti

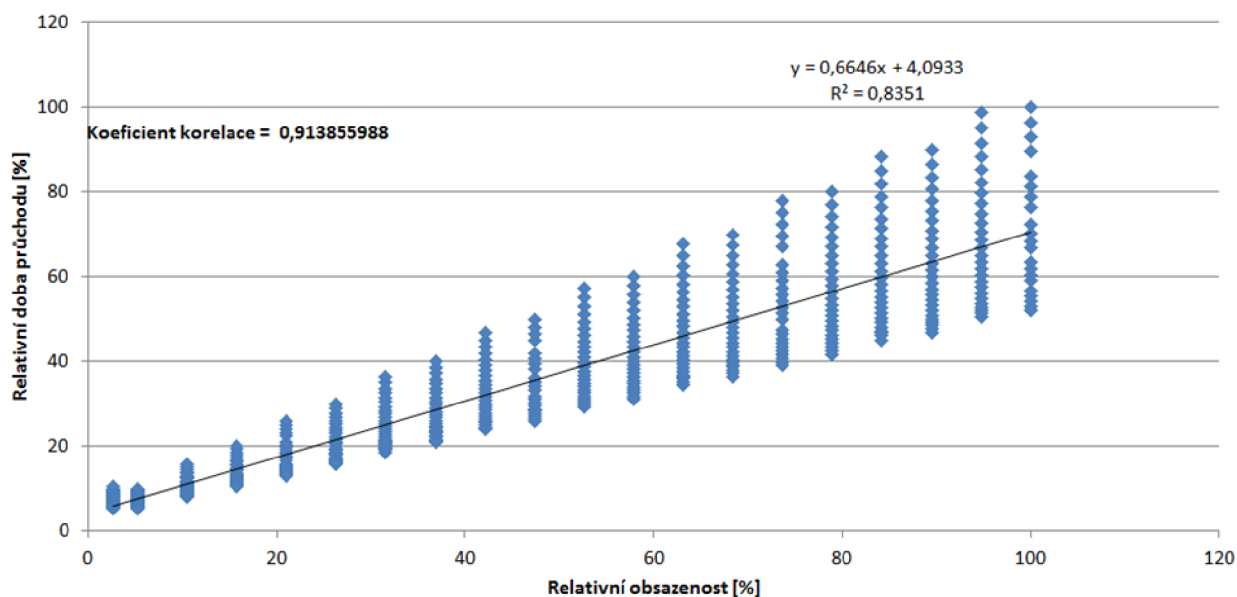
Příloha 3 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – jeden směnový režim, více výrobků, vztaženo na pořadí iterací (zdroj: autor)

Příloha 4 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – jeden směnový režim, více výrobků, vztaženo na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)

Příloha 5 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – dva směnové režimy, více výrobků, vztaženo na pořadí iterací (zdroj: autor)

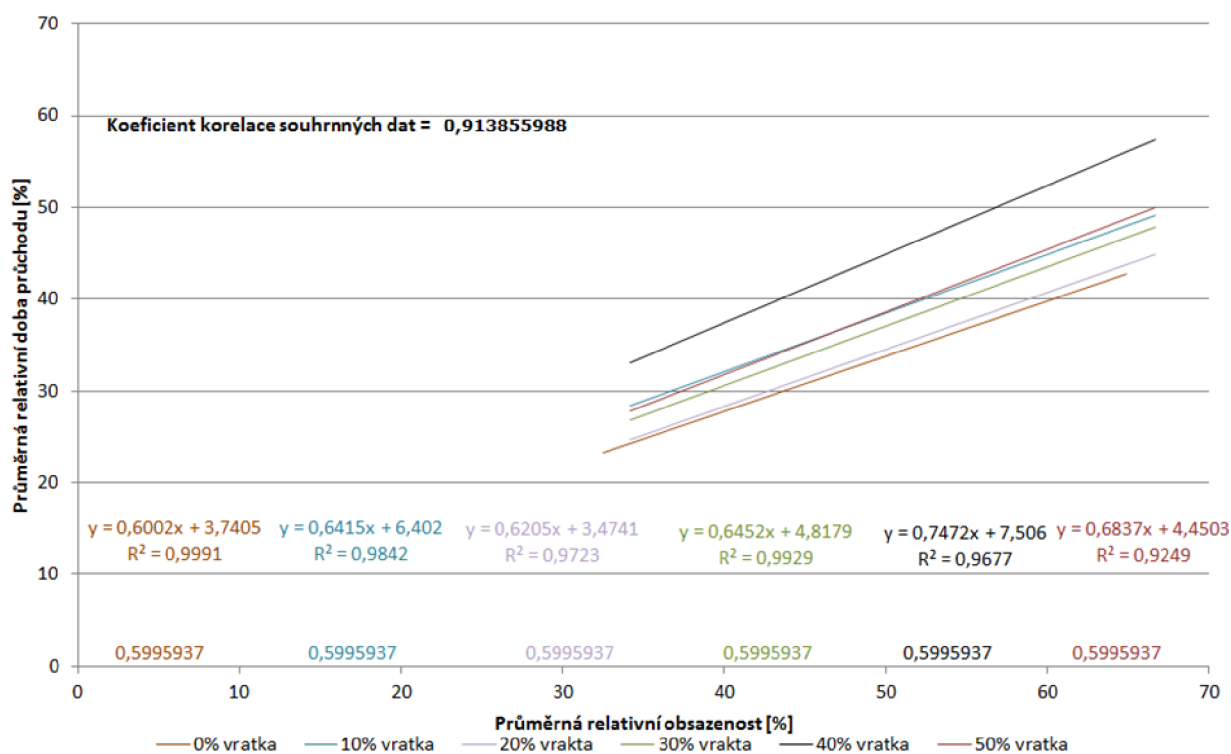
Příloha 6 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – dva směnové režimy, více výrobků, vztaženo na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)

Závislost relativní doby průchodu na relativní obsazenosti



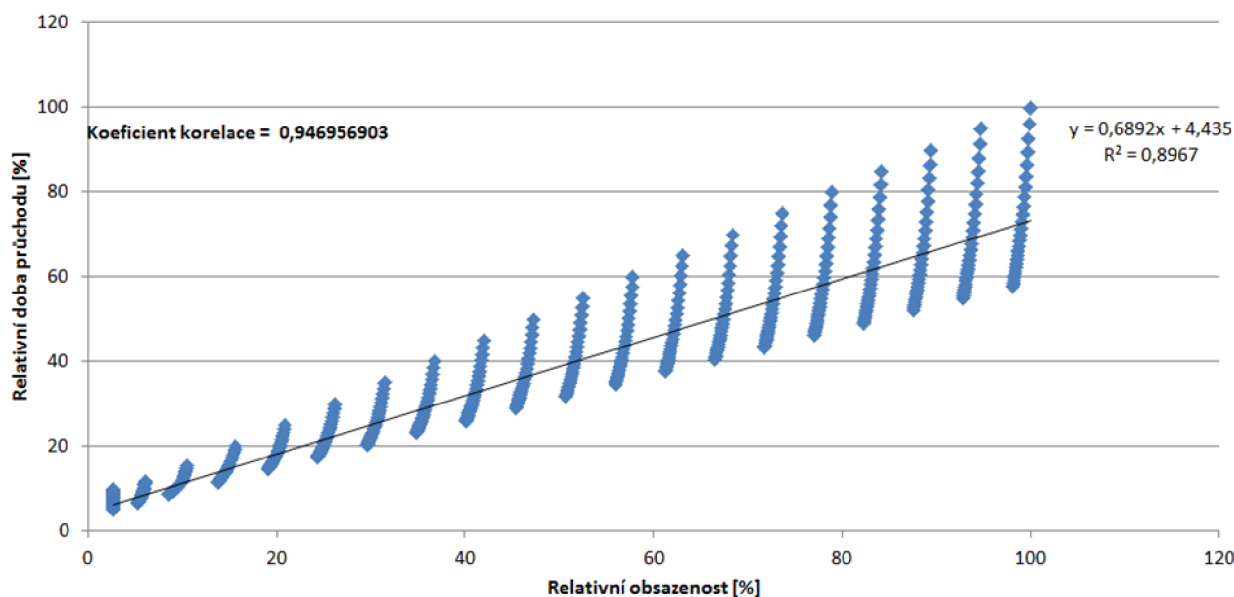
Relativní obsazenost - statistiky		Relativní doba průchodu - statistiky	
{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 21,05	{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 18,57
{Minimum}: 2,63	{3. kvartil}: 73,68	{Minimum}: 5,20	{3. kvartil}: 52,14
{Maximum}: 100,00	{Modus}: 5,26	{Maximum}: 100,00	{Modus}: 26,00
{Průměr}: 49,95	{Medián}: 47,37	{Průměr}: 37,29	{Medián}: 35,81
{Sm. odch.}: 30,12	{Prům. abs. odch.}: 26,17	{Sm. odch.}: 21,91	{Prům. abs. odch.}: 18,28

Vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti



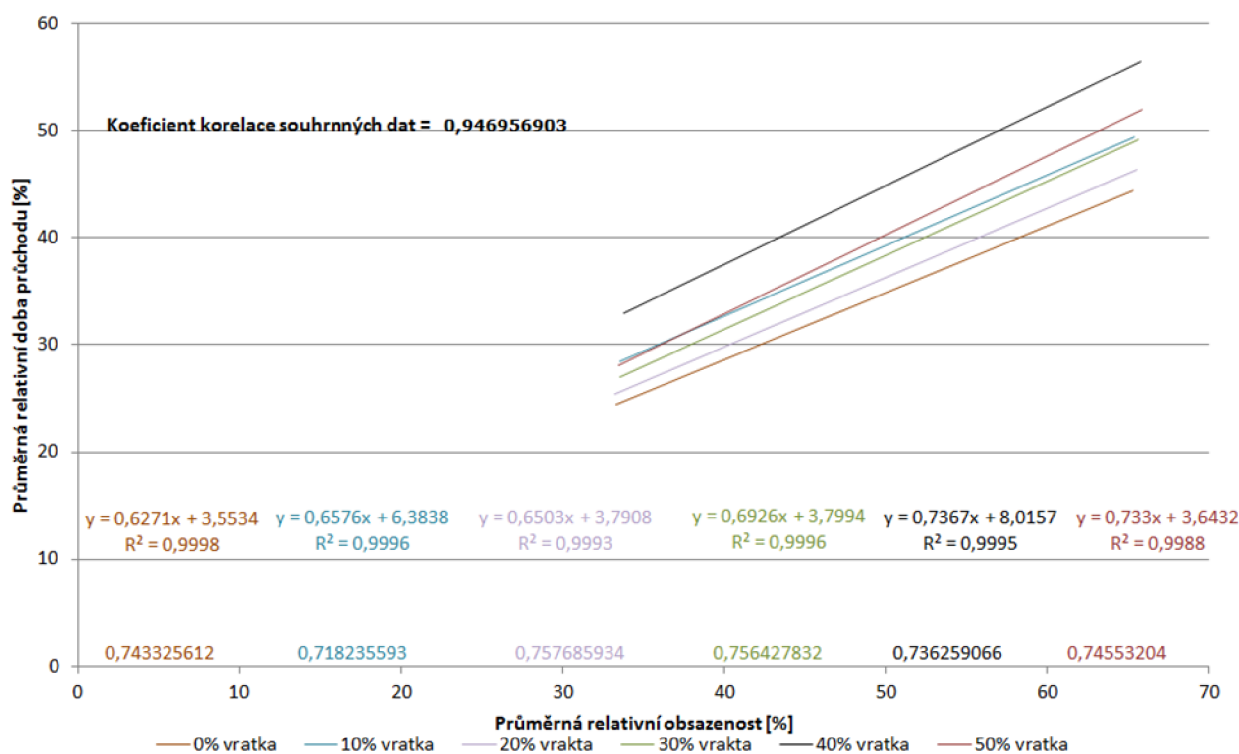
Příloha 1 SHO – konstantní doba mezi příchody požadavků, konstantní doba obsluhy: závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti, vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti (zdroj: autor)

Závislost relativní doby průchodu na relativní obsazenosti



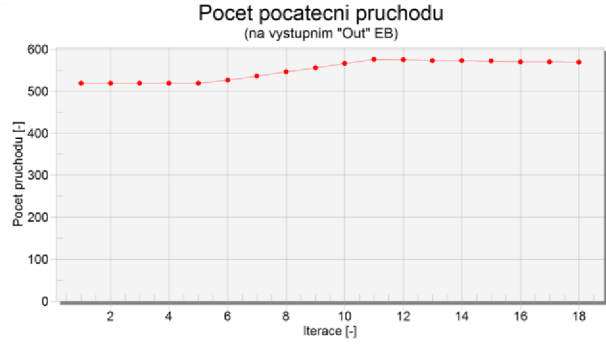
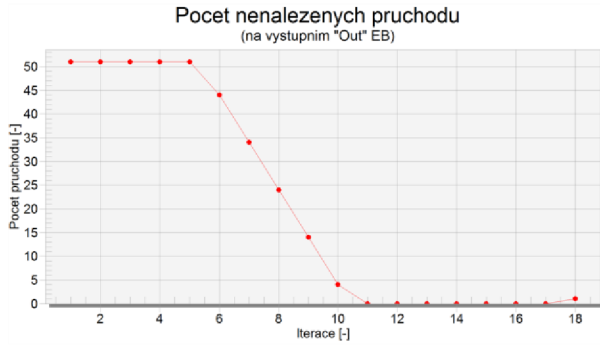
Relativní obsazenost - statistiky			Relativní doba průchodu - statistiky		
{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 23,44	{3. kvartil}: 74,48	{Rozsah}: 1560	{1. kvartil}: 19,41	{3. kvartil}: 54,81
{Minimum}: 2,63	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI	{Maximum}: 100,00	{Minimum}: 4,99	{Modus}: #NENÍ_K_DISPOZICI	{Maximum}: 100,00
{Průměr}: 49,16	{Medián}: 48,96	{Prům. abs. odch.}: 26,08	{Průměr}: 38,31	{Medián}: 37,17	{Prům. abs. odch.}: 18,41

Vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti

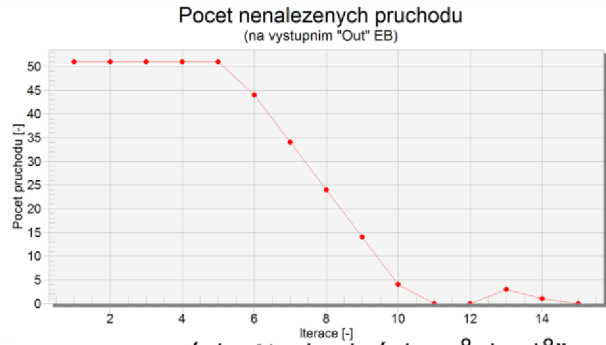
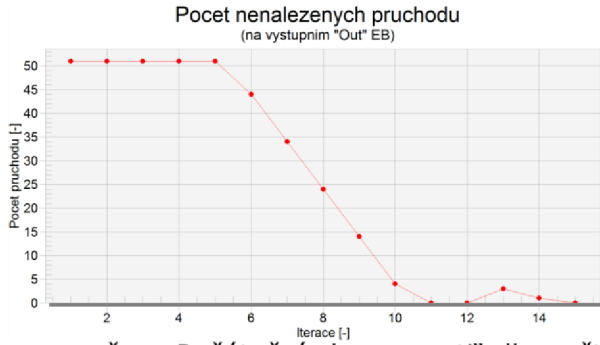


Příloha 2 SHO – rovnoměrné rozdělení doby mezi příchody požadavků, exponenciální rozdělení doby obsluhy: závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti, vztah průměrné relativní doby průchodu a průměrné relativní obsazenosti (zdroj: autor)

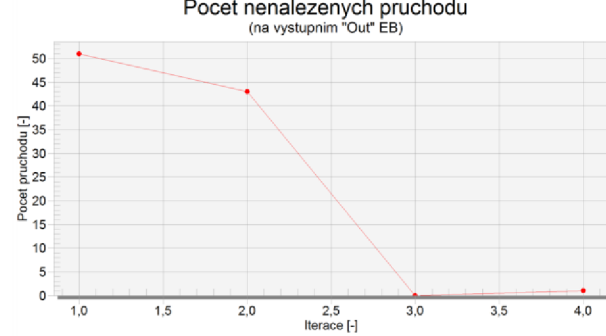
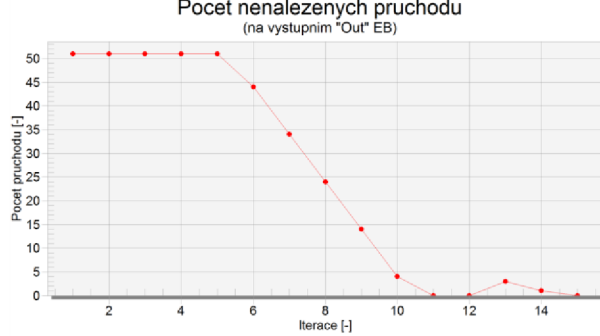
změna „Počáteční obsazenosti“ s iteračním krokem 10



změna „Počáteční obsazenosti“ půlením intervalu dočasně nejlepší - nejmenší nevyhovující

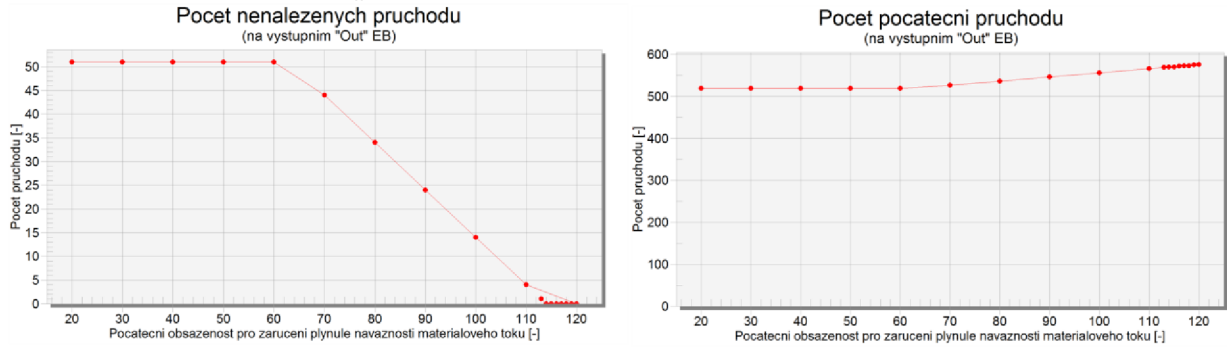


změna „Počáteční obsazenosti“ dle počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“

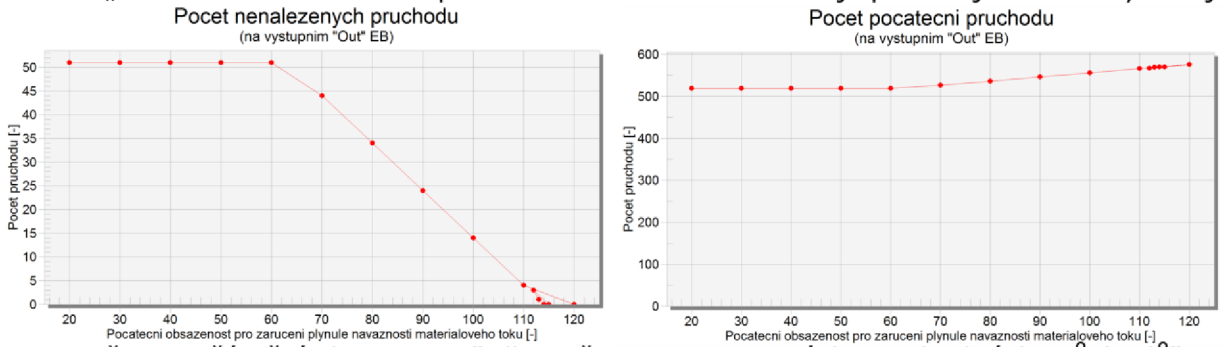


Příloha 3 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – jeden směnový režim, více výrobků, vztaženo na pořadí iterací (zdroj: autor)

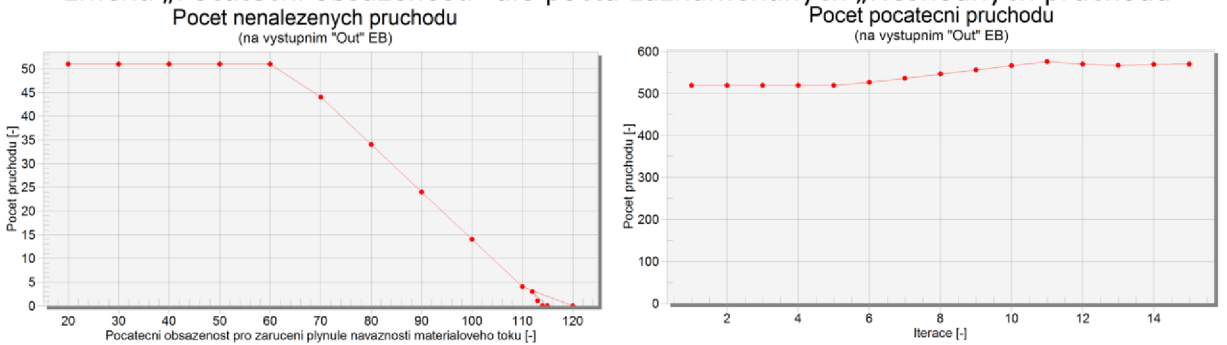
změna „Počáteční obsazenosti“ s iteračním krokem 10



změna „Počáteční obsazenosti“ půlením intervalu dočasně nejlepší - nejmenší nevyhovující

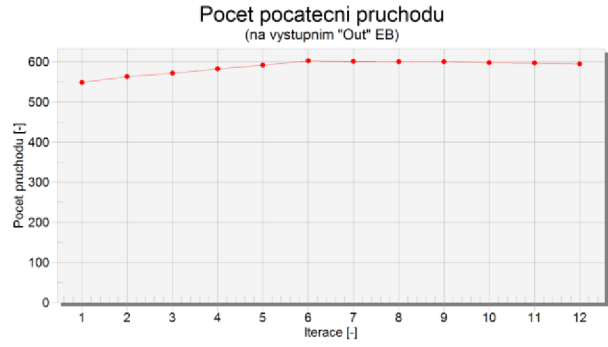
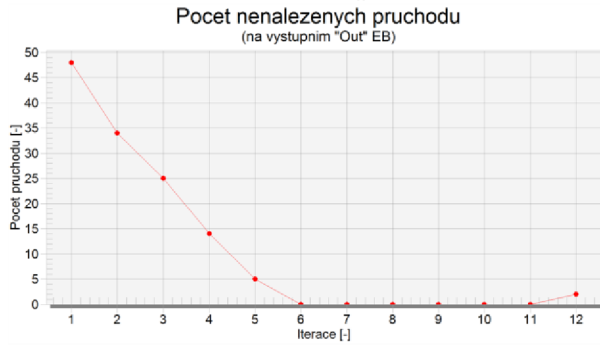


změna „Počáteční obsazenosti“ dle počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“

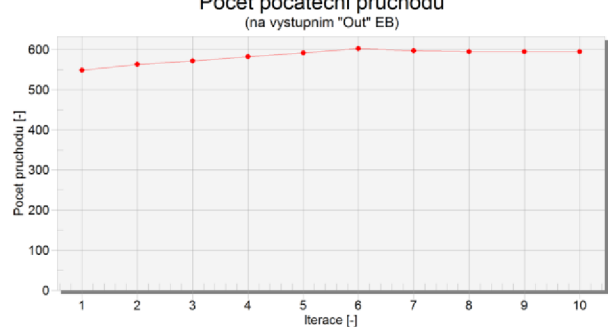
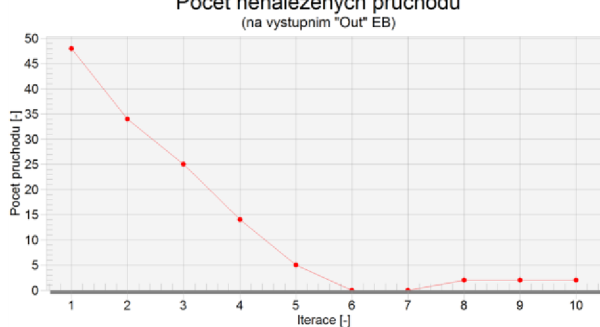


Příloha 4 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – jeden směnový režim, více výrobků, vztaženo na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)

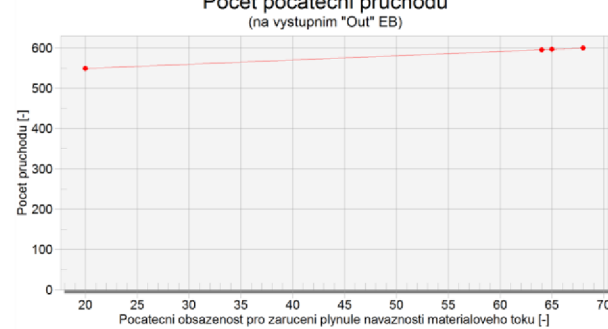
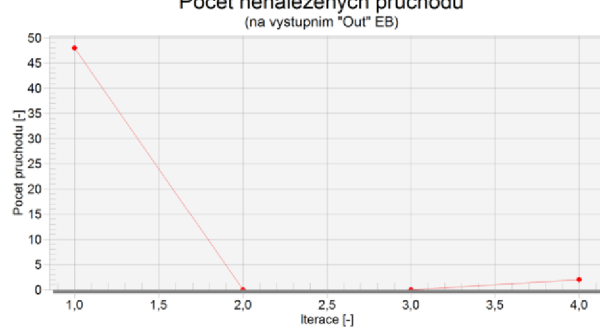
změna „Počáteční obsazenosti“ s iteračním krokem 10



změna „Počáteční obsazenosti“ půlením intervalu dočasně nejlepší - nejmenší nevyhovující

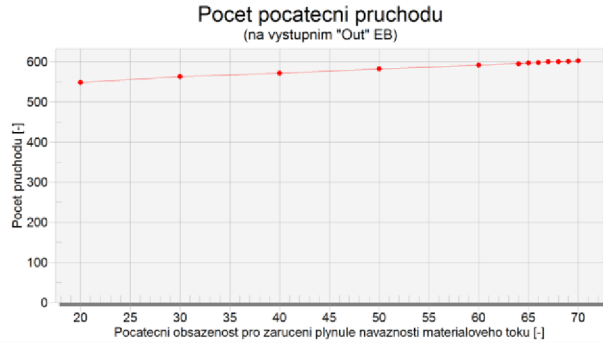
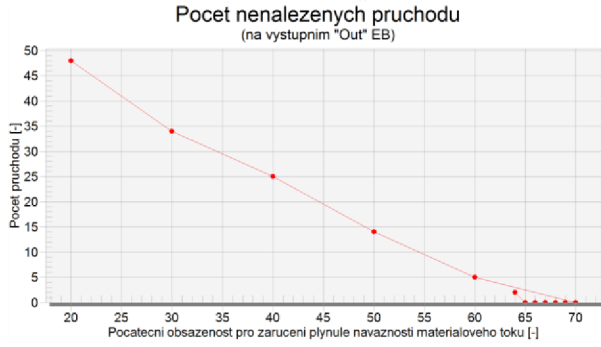


změna „Počáteční obsazenosti“ dle počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“

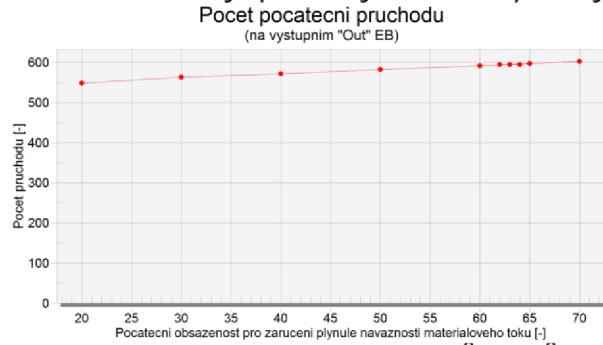
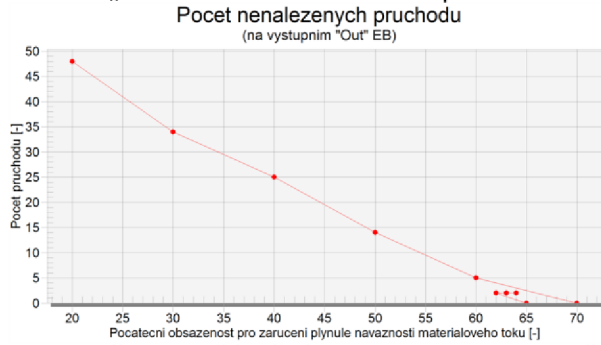


Příloha 5 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – dva směnové režimy, více výrobků, vztaženo na pořadí iterací (zdroj: autor)

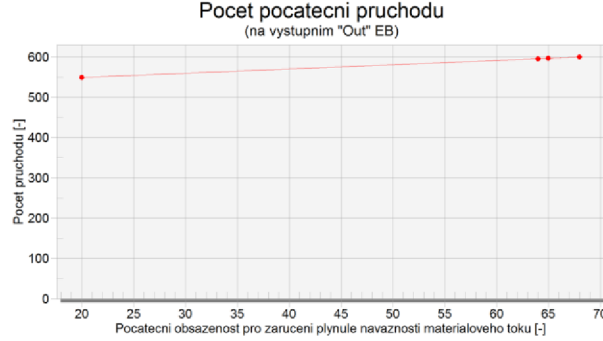
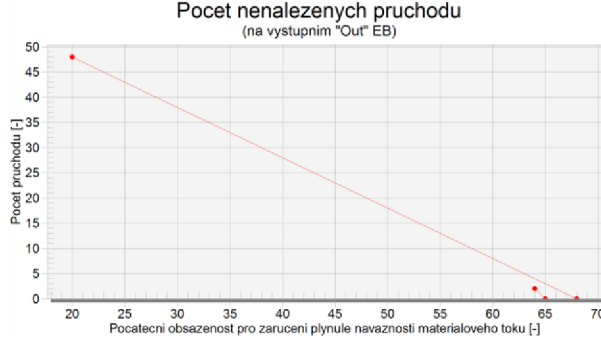
změna „Počáteční obsazenosti“ s iteračním krokem 10



změna „Počáteční obsazenosti“ půlením intervalu dočasně nejlepší - nejmenší nevyhovující



změna „Počáteční obsazenosti“ dle počtu zaznamenaných „Neshodných průchodů“



Příloha 6 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – dva směnové režimy, více výrobků, vztaženo na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)