

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 795

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Jiří Hloska

**Optimalizace materiálového toku
v hromadné výrobě
simulačními metodami**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Jiří Hloska

**OPTIMALIZACE MATERIÁLOVÉHO TOKU
V HROMADNÉ VÝROBĚ SIMULAČNÍMI METODAMI**

**OPTIMIZATION OF MATERIAL FLOW
IN MASS PRODUCTION BY MEANS OF SIMULATION METHODS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Oponenti: doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.
doc. Dr. Ing. František Manlig
Datum obhajoby: 21. listopadu 2015

Klíčová slova:

diskrétní simulace, materiálový tok, simulační metamodel

Keywords:

discrete event simulation, material flow, simulation meta-model

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství

© Jiří Hloska, 2015

ISBN 978-80-214-5305-0

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	6
3	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY	7
3.1	MATERIÁLOVÝ TOK, LOGISTIKA, VÝROBNÍ SYSTÉMY A JEJICH SIMULACE .7	
3.1.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLOVÉHO TOKU	8
3.1.2	MATERIÁLOVÝ TOK V SYSTÉMU HROMADNÉ OBSLUHY.....	10
3.1.3	SIMULACE MATERIÁLOVÉHO TOKU, VÝROBNÍCH A LOGISTICKÝCH SYSTÉMŮ.....	11
3.2	SIMULAČNÍ METAMODELY	12
4	NAVRŽENÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ.....	12
4.1	SIMULAČNÍ METAMODEL JAKO GENERÁTOR MATERIÁLOVÉHO TOKU.....	14
4.1.1	SIMULAČNÍ METAMODEL PRO REKONSTRUKCI LOGISTICKÝCH PROCESŮ.....	15
4.1.2	GENERÁTOR PRŮCHODU EVIDENČNÍMI BODY.....	16
4.2	DALŠÍ MOŽNÝ VÝVOJ	23
5	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ.....	24
5.1	VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ	25
6	OVĚŘENÍ NAVRHOVANÉHO PŘÍSTUPU ŘEŠENÍ V PRAXI.....	26
6.1	POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH POZNATKŮ S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	26
7	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE	27
8	ZÁVĚR.....	28

1 ÚVOD

Hospodářský vývoj sektoru výrobního průmyslu nutí podniky reagovat na vliv konkurence a na požadavky zákazníků mimo jiné zkrácením životního cyklu svých výrobků a zvýšením flexibility a produktivity. Je 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 podnikových procesů, je koncept digitální továrny. [1] Zaměřuje se na včasný a integrovaný vývoj produktu, plánování výroby a na uspořádání a zprovoznění výrobního systému, který je sladěn se všemi podnikovými procesy. 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 –plánování výroby, její následná optimalizace nebo vizualizace výrobních procesů.

Zásadní technologií využívanou napříč nástroji konceptu digitální továrny je modelování a simulace. Je tomu tak z důvodu komplexity podnikových procesů, které nelze popsat pomocí klasického matematického aparátu. 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.*“ [3] Digitální (počítačový) model může sloužit pro provádění experimentů s cílem zjištění informací o chování modelovaného systému, které lze dále využít s ohledem na zamýšlené zásahy/úpravy. Protože samotný model napodobuje (simuluje) skutečný systém, bývá označován jako simulační model a testy, které jsou s ním prováděny, se označují jako simulační experimenty. Možnosti využití a nasazení simulací jsou 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.*“ [4]

Simulační modely lze využít kromě provádění simulačních experimentů v rámci simulačních studií také například pro virtuální zprovoznění výrobních linek, manipulačních zařízení, robotických pracovišť či dopravníkové techniky. [5]

S tím, jak na jedné straně takto roste rozsah funkcionality diskretních 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. Snahou bude dosáhnout toho, aby tvorbu simulačních modelů bylo možné v určitých případech standardizovat a tím také do jisté míry automatizovat a urychlit.

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.*“ [2]

V současnosti je hlavním limitujícím faktorem tvorby simulačních modelů (obecně) podnikových procesů časová a z toho vyplývající i finanční náročnost všech souvisejících aktivit. Možným řešením je přechod k tvorbě simulačních metamodelů, které mohou být vzhledem ke své omezené komplexnosti generovány 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.

2 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem 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. Pro jeho komplexnost je třeba tento 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 je vytvoření uceleného přehledu charakteristik materiálového toku, které popisují předmětný výrobní (logistický) systém. Kromě jejich taxativního vyjmenování má být uvedena vhodnost jejich využití pro popis studovaného výrobního (logistického) systému.

Druhý dílčí cíl spočívá v uvedení přehledu alternativních metod, kterými lze jednotlivé charakteristiky materiálového toku pro účely simulačních modelů příslušného systému určovat s ohledem na nutné technické vybavení, přesnost a spolehlivost takto získaných dat.

Třetím dílčím cílem 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. V kontextu dizertační práce se jedná o parametry materiálového toku, které jsou dále použity jako parametry algoritmů realizujících generování metamodelu výrobního (logistického) systému, ve kterém zkoumaný materiálový tok probíhá.

Paralelně je sledován i čtvrtý dílčí cíl, kterým je vytyčení okrajových podmínek pro jednotlivé metody analýzy charakteristik materiálového toku a vyhodnocení jeho parametrů. Konkrétně jde 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 napodobení chování zkoumaného materiálového toku a požadavky na efektivitu práce s tímto metamodelem, zejména s ohledem na provádění simulačních experimentů. Tento hlavní cíl je realizován na základě detailního simulačního modelu reálného výrobního systému. Součástí je provedení simulačních experimentů ověřujících shodu série charakteristik materiálového toku v reálném výrobním systému a charakteristik materiálového toku realizovaného simulačním metamodelem.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY

Nejprve jsou vymezeny pojmy související s problematikou materiálového toku, logistiky, výrobních systémů, simulace materiálového toku, příp. simulačních technik. Dále je pojednáno o metodách, které jsou často aplikovány s cílem zvýšení efektivity využití simulačních modelů. S tím souvisí problematika tzv. simulačních metamodelů, které se věnuje další část této kapitoly. Konečně je diskutován návrh a provedení simulačních experimentů a také statistické techniky aplikované při vyhodnocení jejich výsledků i pro ověření správnosti simulačních (meta)modelů.

3.1 MATERIÁLOVÝ TOK, LOGISTIKA, VÝROBNÍ SYSTÉMY A JEJICH SIMULACE

Obecně lze definovat materiálový tok jako *pohyb materiálu od těžby suroviny po dokončení finálního výrobku a směnu, přes jednotlivé fáze úpravy a opracování*. [6] Zde směnou je míněna (obchodní) výměna (transakce). Kromě samotného fyzického pohybu hmot materiálový tok zahrnuje a je doprovázen souborem dalších činností označovaných souborně jako logistický řetězec. [6]

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.

Přitom 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*. [6]

Alternativní definici logistického řetězce, vycházející ze systémového pojetí logistiky jako celku, uvádí [7]:

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

Dále je třeba definovat samotný pojem logistika a uvést její cíle [6]:

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. 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 [8]:

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.

Z pohledu managementu lze definovat logistiku s důrazem na její obchodní využití takto [9]:

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.²

Dále je třeba přesně vymezit již výše uvedený termín systém. Jedna z možných definic systému zní [3]:

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

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.

Materiálový tok tedy zahrnuje pohyb materiálu mezi všemi články logistického řetězce i v rámci těchto článků samotných. Zahrnuje 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 je využíván v souvislosti s přemísťováním materiálu termín přeprava. [7]:

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.

Jedním ze základních kritérií dělení materiálového toku je časové hledisko, resp. povaha přemísťovaného materiálu. Podle tohoto hlediska rozlišujeme materiálový tok **diskrétní** (přemísťovaným materiálem jsou početné entity) a tok **spojitý** (tok plynného či kapalného média). Simulace logistických/výrobních procesů se ve většině případů zabývá diskrétním materiálovým tokem. Ten je také zkoumán v rámci této práce.

3.1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLOVÉHO TOKU

Je uvažován diskrétní materiálový tok probíhající mezi dvěma body (A – zdroj, B – ústí) nacházejícími se ve vzdálenosti l . Vytipované charakteristiky materiálového toku využívané při plánování dopravních, manipulačních a logistických systémů jsou [10]:

- **Průchodnost λ [$\text{ks} \cdot \text{s}^{-1}$]** – determinována intenzitou vstupů jednotek materiálu (z bodu A) a rychlostí v pohybu materiálu. Uvažujeme-li rozestup s jednotlivých elementů materiálu o délce s_0 , je průchodnost dána vztahem:

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

Maximální průchodnost bude dosažena, pokud mezery mezi sousedními elementy materiálu jsou nulové, tj. pokud $s = s_0$. Potom:

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

² 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.

- **Stupeň vytižení ρ [-]** – udáván případně v procentech vyjadřuje míru dosažení maximální (teoretické) průchodnosti. Té obvykle dosáhnout nelze, neboť v reálném systému existují nenulové rozestupy mezi elementy materiálového toku, a také proto, že v uzavřených smyčkách materiálového toku (kde $A \equiv B$) při plné obsazenosti dojde k zablokování materiálového toku. Stupeň vytižení je dán poměrem

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

- **Takt T [s]** – měřen v ústí materiálového toku (zde bodě B). Takt lze uvažovat pouze tehdy, pokud jeho hodnoty mohou nabývat jen diskrétních hodnot. V opačném případě jde o dobu 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, aby časové intervaly mezi průchody/příchody elementů materiálového toku nabývaly spočetných hodnot – tedy $v = konst.$, $s = konst.$. Často nejsou jednotlivé elementy totožné, proto navíc $s_0 \neq konst.$. Doba mezi průchody t je náhodná veličina 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:

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

- **Doba průchodu τ [s]** – doba, za kterou urazí element materiálového toku vzdálenost mezi body A a B . Pokud je vzdáleností $|AB|$ dráha l , bude za předpokladu konstantní rychlosti $v = konst$ pohybu všech elementů materiálového toku rovna rovnici $\tau = l/v$. V reálných dopravních a manipulačních systémech dochází k neplynulostem materiálového toku. Takový systém se podobá modelu, který lze postihnout jako systém hromadné obsluhy (SHO), ve kterém lze pozorovat fronty požadavků (elementů materiálového toku před stanovištěm pracovní/manipulační operace).

Často jsou zmíněné charakteristiky závislé také na povaze (typu) materiálu, jehož pohyb je sledován. S tím souvisí další parametr výrobního (logistického) systému:

- **Výrobní mix** – určuje jednotlivé typy elementů materiálového toku. Udává, v jakém poměru jsou zastoupeny jednotlivé typy elementů materiálového toku.
- **Výrobní program** – udává časovou posloupnost, ve které různé typy elementů materiálového toku vstupují do příslušného systému.

V rámci plánování výrobních/logistických systémů je obvykle nutné zvolit místo (bod) na trajektorii materiálového toku, ve kterém je možné výše uvedené charakteristiky sledovat. 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 [11]:

- **Četnost průchodů EB za sledované období [ks·s⁻¹]** – udává průchodnost (viz výše).
- **Obsazenost objektů mezi dvěma EB [ks]** – sledovaná v průběhu vymezeného časového období, udává počet elementů materiálového toku, které se v daném období nacházely mezi dvěma (různými) EB.
- **Dodržení sekvence objektů** – ke změně sekvence (promíchání) může dojít v místech rozdělení či sloučení materiálového toku. Dodržení sekvence lze vyjádřit např. rozdílem očekávaného a nalezeného pořadí daného elementu v rámci řady více elementů materiálového toku.

3.1.2 MATERIÁLOVÝ TOK V SYSTÉMU HROMADNÉ OBSLUHY

V případě, že kromě pohybu materiálu dochází také k časovým prodlevám (čekací době), lze hovořit o systémech hromadné obsluhy (dále jen SHO). Obecně je daný SHO vymezen zdrojem požadavků, obslužnou stanicí a výstupem ze systému. SHO se zabývá disciplína označovaná jako *teorie front*. Lze rozlišit otevřené a uzavřené SHO. Pro SHO jsou dále definovány podobné charakteristiky materiálového toku, jaké byly vyjmenovány v kapitole 3.1.1. [10]

- **Intenzita vstupů θ [ks·s⁻¹]** – 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:

$$\theta = \frac{1}{E(t_a)} \quad (8)$$

- **Intenzita obsluhy μ [ks·s⁻¹]** – vyjadřuje průměrný počet jednotek materiálu zpracovaných za jednotku času na obslužné stanici. Jestliže je doba obsluhy jednotky materiálu t_b náhodnou veličinou se střední hodnotou $E(t_b)$, platí pro intenzitu obsluhy vztah:

$$\mu = \frac{1}{E(t_b)} \quad (9)$$

- **Stupeň vytížení ρ [-]** – 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:

$$t_b < t_a \leftrightarrow \mu > \lambda \leftrightarrow \rho < 1 \quad (10)$$

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

- **Střední počet požadavků ve frontě N_w [-]** – střední počet elementů materiálového toku, které jsou řazeny před obslužné místo. Tuto veličinu lze chápat jako obsazenost objektů mezi dvěma EB.
- **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. Tuto veličinu lze chápat jako obsazenost objektů mezi dvěma EB.
- **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. Tuto veličinu lze chápat jako dobu průchodu mezi dvěma EB.

- **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. Tuto veličinu lze chápat jako dobu průchodu mezi dvěma EB.

Jednotlivé SHO lze rozdělit 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 [10], [12]:

$$A|B|m|K|S|xxxx \quad (11)$$

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)

3.1.3 SIMULACE MATERIÁLOVÉHO TOKU, VÝROBNÍCH A LOGISTICKÝCH SYSTÉMŮ

Pro optimalizaci rozsáhlých logistických systémů nebo jejich částí je použití simulace ve virtuální realitě v podobě počítačového modelu vhodné. Podrobný popis veškerých kroků obecné simulační studie podává [1] a [13]. Typický průběh simulační studie uvádí [14] či [15] a pojednává o něm rovněž směrnice VDI 3633. Citovaná směrnice definuje rovněž související pojmy, kterými jsou [4]:

- **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. 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. [16]

- **Simulační experiment** – cílené empirické šetření chování modelu na základě opakovaných simulačních běhů při systematickém provádění změn parametrů nebo struktury modelu.
- **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. [16]
- **Validace** – ověření dostatečné shody modelu a originálního systému. Účelem je ujištění, že model vykazuje „dostatečně shodné“ (a bezchybné) chování jako originální systém.

3.2 SIMULAČNÍ METAMODELY

Na simulační model lze nahlížet jako na transformátor vstupních parametrů na hodnoty výstupních veličin. To 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 analýzy³, tj. regresním metamodelem simulačního modelu [17].

Předpokládejme reálný systém, jenž je předmětem simulace. Ten je možné popsat z pohledu jednotlivých výstupních veličin jako transformační funkci

$$w = f_0(v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (12)$$

kde n uvádí počet vstupních parametrů (ten může být spočetný nebo – teoreticky – nekonečný) a w je výstupní veličina (její hodnota).

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

$$y = f_1(z_1, \dots, z_k, r) \quad (13)$$

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 rekurzivního algoritmu, tj. hodnota r_i je funkcí předchozích hodnot $r_{(i-1)}, r_{(i-2)}, \dots$

Existují dvě základní možnosti praktického využití metamodelů. [17] První je testování odhadu regresního parametru s cílem určit, do jaké míry se jeho hodnota blíží nule. (Téměř) nulová hodnota např. parametru β_h 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 (predikce) výstupů odpovídajících nové kombinaci vstupních parametrů.

4 NAVRŽENÝ PŘÍSTUP ŘEŠENÍ

Z pohledu projektového řízení vyžaduje tvorba/aktualizace simulačního modelu vyčlenění časových i personálních (finančních) kapacit. Možnosti, jak zkrátit proces tvorby/aktualizace (detailního) komplexního simulačního modelu, jsou následující:

- Použití (vytvoření/aktualizace) simulačního modelu zachycujícího pouze vymezenou část systému, ve které má být zvažovaná úprava realizována.

³ V nejjednodušším případě (v praxi málo pravděpodobném), kdy model má jen jeden vstupní parametr, lze použít vizuální analýzu.

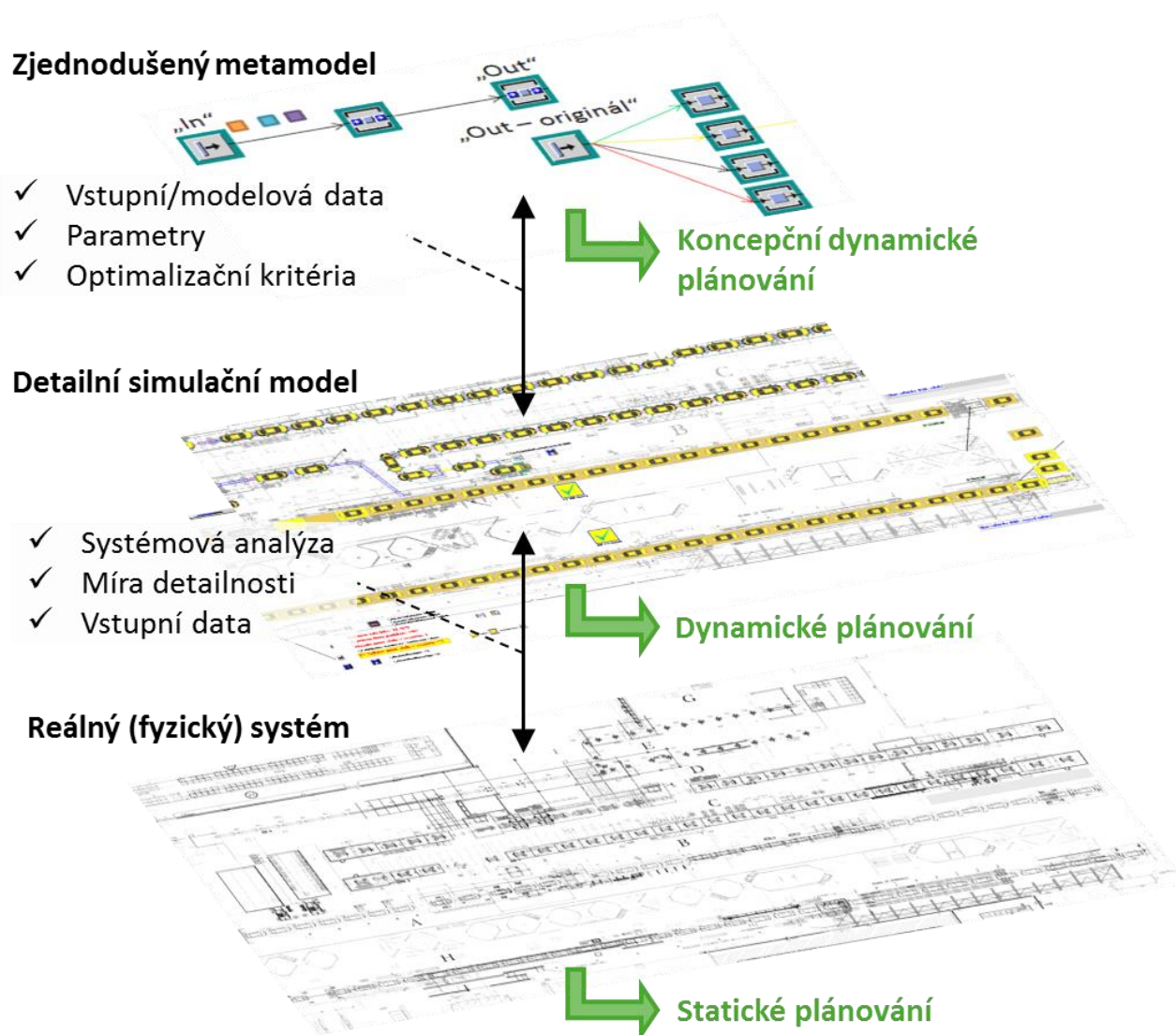
- Použití (vytvoření/parametrizace) simulačního metamodelu nahrazujícího komplexní simulační model.

Právě použití simulačního metamodelu je podstatou přístupu navrhovaného v této práci. Jeho využití je předpokládáno v oblasti plánování 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 výrobní linky,
- **koncepční dynamické plánování** – s využitím (zjednodušeného) simulačního metamodelu; např. posouzení dopadu rozdílu směnových režimů sousedících výrobních oblastí na dynamiku mezioperačních zásob.

Obr. 1 znázorňuje toto rozlišení úrovní plánování (a modelů). Ukazuje, 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.

Principem navrhovaného přístupu je použití metamodelu, který umožní analyzovat příslušný materiálový tok. 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.



Obr. 1 Úrovně plánování a jim příslušné systémy/simulační modely (zdroj: autor)

4.1 SIMULAČNÍ METAMODEL JAKO GENERÁTOR MATERIÁLOVÉHO TOKU

Simulační metamodel lze využít jako náhradu detailního simulačního modelu s tím, že předmětem zájmu (simulační studie) je jen vymezená část výrobního/ dopravního/logistického systému. Celý systém je až na tuto část metamodelem nahrazen. 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.

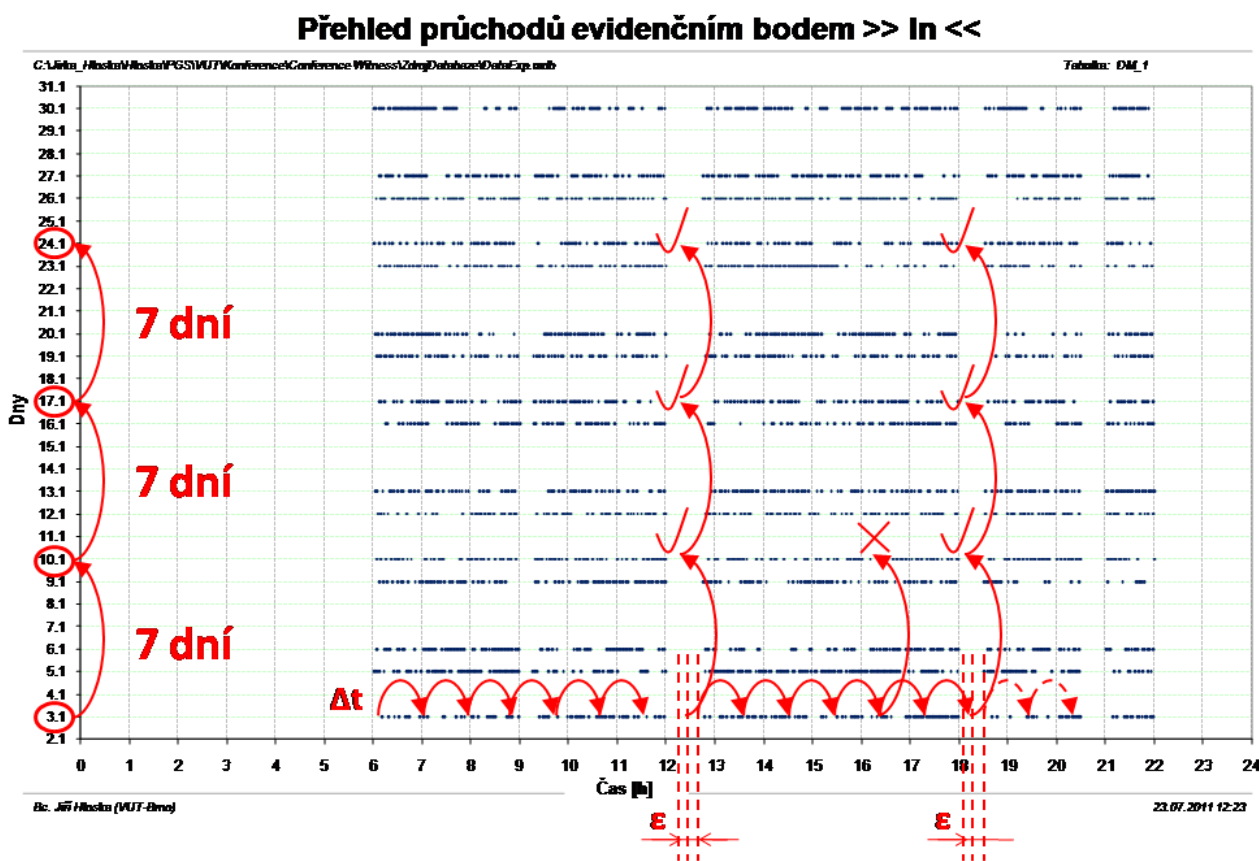
Na simulační metamodel lze v tomto případě pohlížet jako na *Generátor materiálového toku*. V tomto metamodelu totiž bude generován materiálový tok požadovaných hodnot charakteristik, které vyplývají z dosažených hodnot charakteristik materiálového toku ve (vzorovém) detailním

simulačním modelu, reálném systému, nebo z definovaných požadavků na chování metamodelu. V následujících podkapitolách jsou postupně prezentovány alternativní metodiky generování, resp. rekonstrukce materiálového toku podle toho, jakým procesem simulační metamodel vzniká.

4.1.1 SIMULAČNÍ METAMODEL PRO REKONSTRUKCI LOGISTICKÝCH PROCESŮ

Vytvořený metamodel umožňuje analyzovat vstupní data, kterými jsou záznamy o průchodu elementů materiálového toku určitým EB, a na základě vyhodnocených charakteristik tento materiálový tok zpětně rekonstruovat.

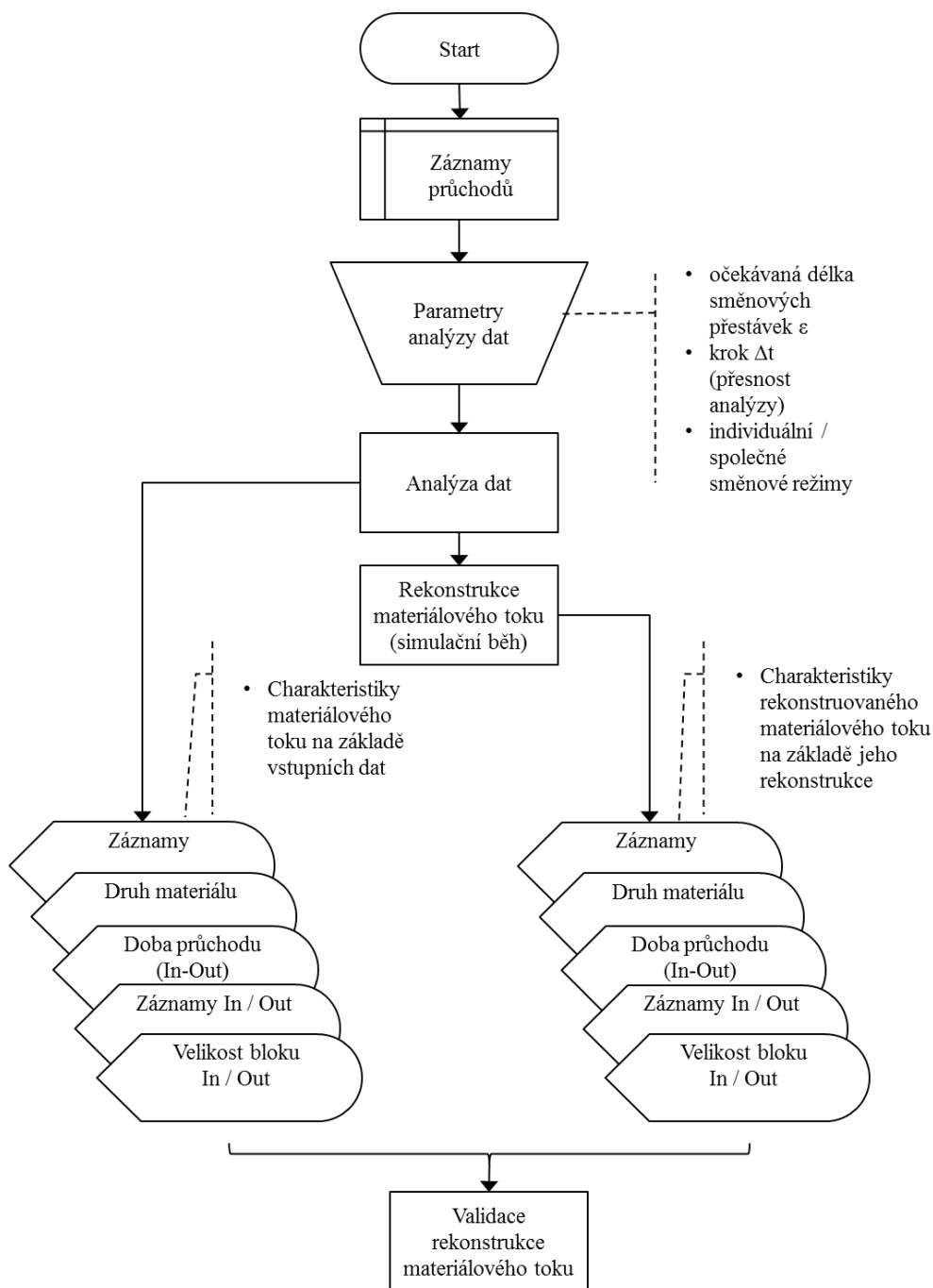
Princip vyhodnocení charakteristik spočívá v algoritmované analýze záznamů průchodů příslušných jednomu EB z hlediska data a času průchodu. Tento *Algoritmus určení časového vymezení směn a směnových přestávek* byl poprvé prezentován v [18] a graficky jej zachycuje Obr. 2. Spočívá v cyklickém procházení data a času průchodu od prvního záznamu dále zvoleným krokem Δt s cílem nalezení časového vymezení směn, tedy období, kdy probíhal materiálový tok.



Obr. 2 Algoritmus určení časového vymezení směnových přestávek a směn [18]

Další funkcí 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).

Z pohledu obsluhy metamodelu uživatelem znázorňuje obě hlavní funkce *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci materiálového toku* Obr. 3 formou vývojového diagramu.

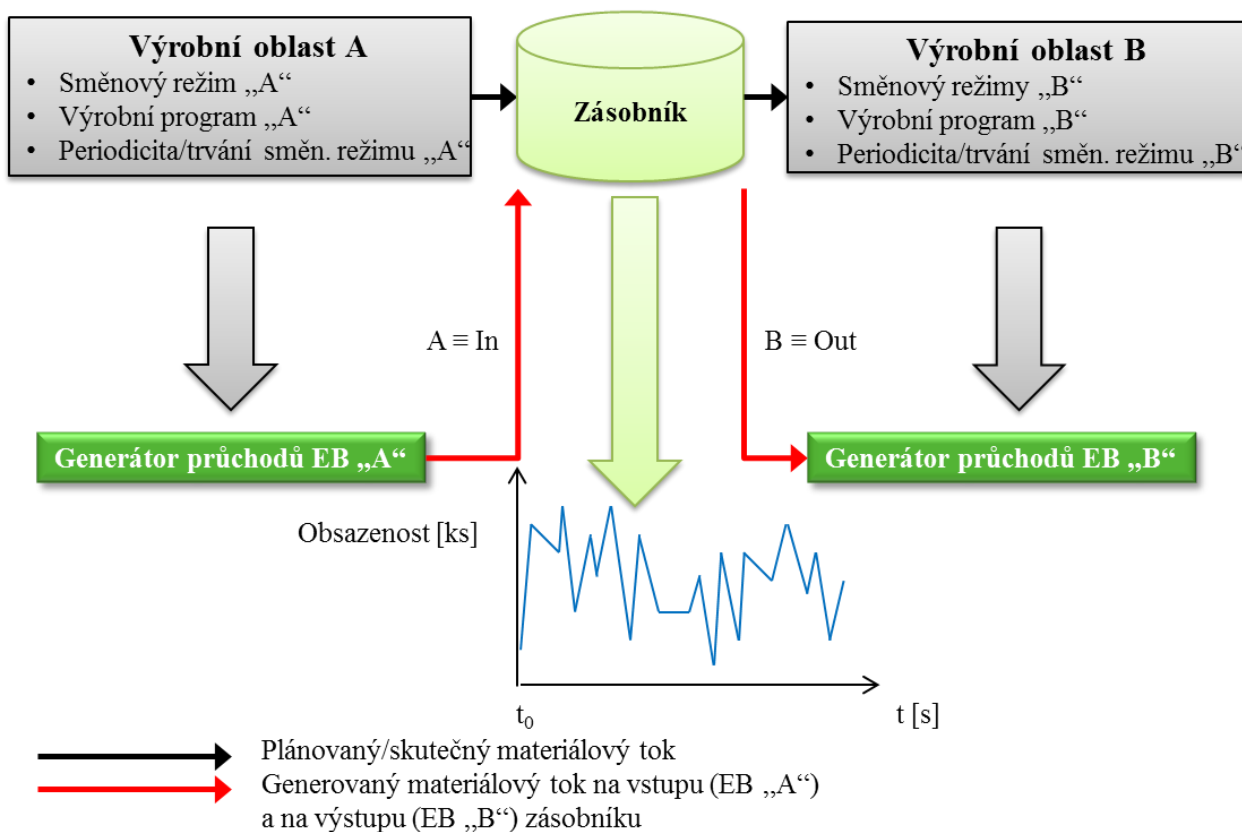


Obr. 3 Vývojový diagram znázorňující dvě hlavní funkce Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů (zdroj: autor)

4.1.2 GENERÁTOR PRŮCHODU EVIDENČNÍMI BODY

Navržená 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 v reálném systému, resp. aniž by musely existovat záznamy o průchodu materiálu určenými EB.

Možné využití *Generátoru průchodů evidenčními body* je dvojitý. První znázorňuje schematicky Obr. 4. Jedná se o úlohu posouzení potřebné kapacity (libovolného) zásobníku. Potřebnými vstupními údaji jsou informace o charakteristikách materiálového toku (včetně jejich časového průběhu) na vstupu (na Obr. 4 bod „A“) i na výstupu (bod „B“). Přínosem je možnost využít *Generátor průchodů evidenčními body* jako náhradu za (detailní) simulační modely výrobních oblastí A a B. Podmínkou je znalost směnového režimu a výrobního programu těchto oblastí.



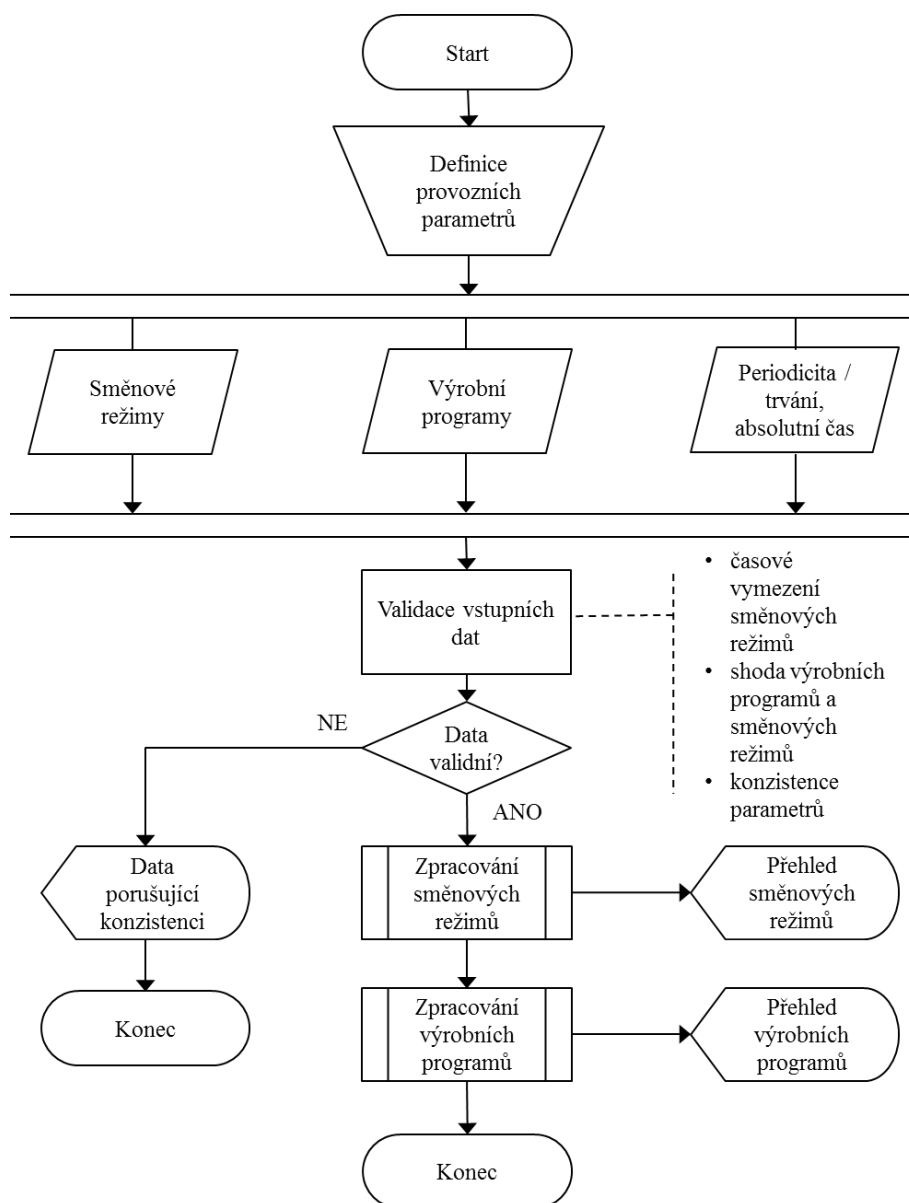
Obr. 4 Využití generátoru průchodů evidenčními body pro analýzu kapacity zásobníku (zdroj: autor)

Podle navržené metodiky lze definovaná pravidla pro materiálový tok, tedy provozní parametry systému, ve kterém má materiálový tok probíhat, rozdělit do třech oblastí (datových množin):

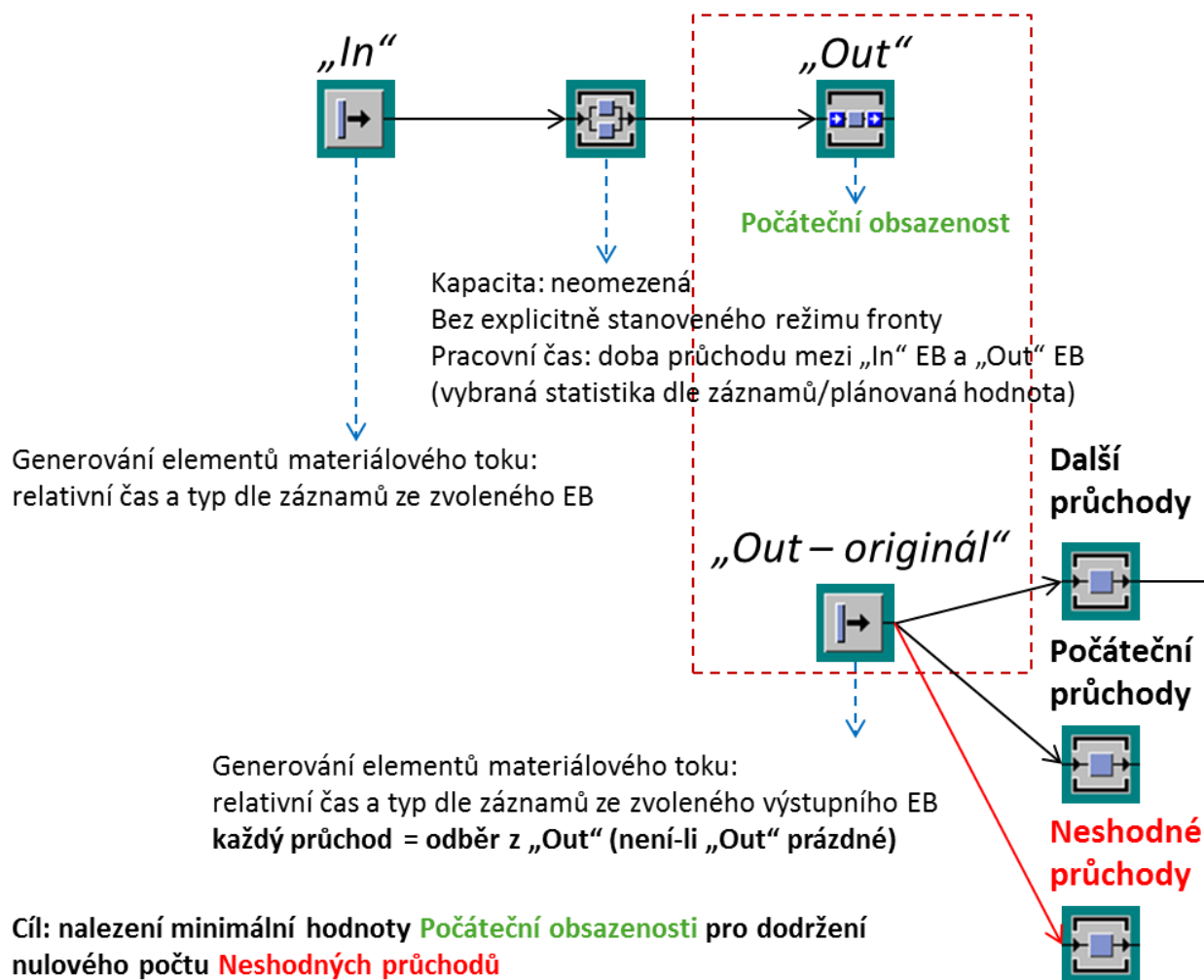
- **Směnové režimy** – časové vymezení period, ve kterých materiálový tok probíhá podle dále určených pravidel (hodnot jeho charakteristik).
- **Výrobní program** – přehled typů elementů materiálového toku, které mají systémem probíhat, a to ve vazbě na výše uvedený definovaný směnový režim.
- **Periodicita/trvání, absolutní čas** – určení opakovatelnosti/trvání (a střídání) směnových režimů a souvisejících výrobních programů a dále určení vztažného (počátečního) data a času.

Část navržené metodiky zaměřené na zadání vstupních dat pro *Generátor průchodů evidenčními body* a na kontrolní výstupy (pro ověření korektního zadání parametrů) znázorňuje vývojový diagram na Obr. 5.

Technické provedení náhrady obecně komplexní struktury objektů, mezi kterými materiálový tok probíhá, základními elementy použitého simulačního SW (Plant Simulation) s důrazem na minimální složitost znázorňuje zjednodušeně Obr. 6.



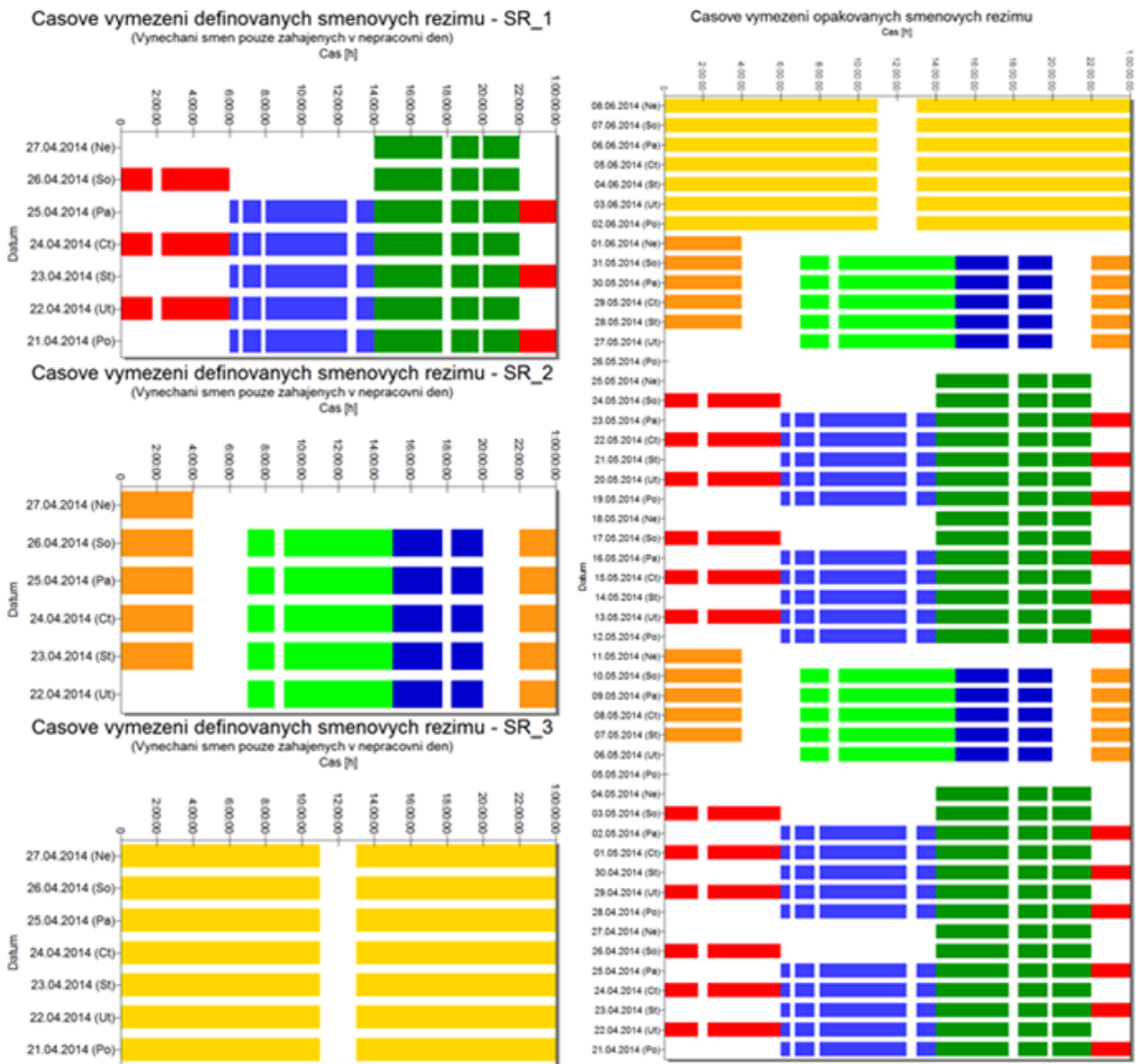
Obr. 5 Vývojový diagram způsobu zadání vstupních dat pro Generátor průchodů evidenčními body včetně ověření jejich správnosti (zdroj: autor)



Obr. 6 Princip navržené metodiky pro generování materiálového toku mezi dvěma různými EB (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 jeho validace provedena ve dvou fázích.

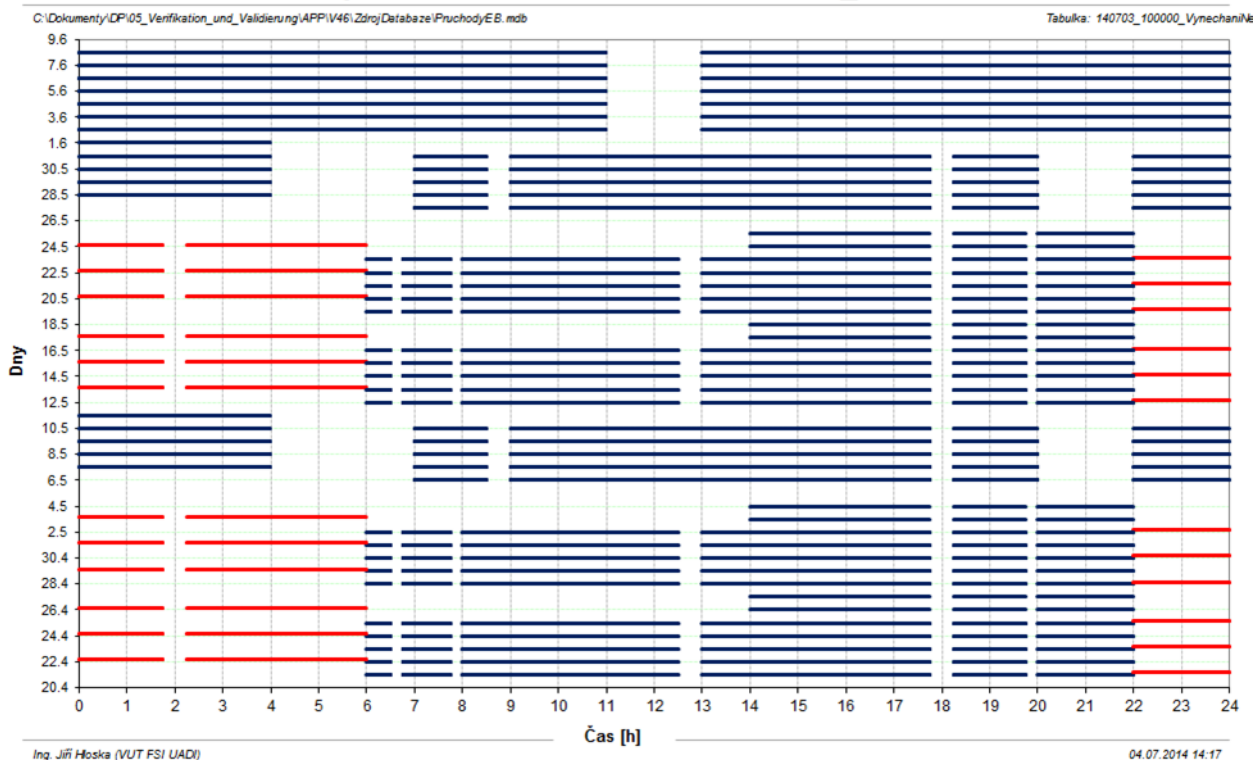
První fáze ověřila korektní realizaci metodiky rekonstrukce materiálového toku z jednoho EB podle definovaných datových množin. Byly ověřovány grafické výstupy časového vymezení jednotlivých směnových režimů a jejich definovaného trvání/periodicity. S takto definovanými směnovými režimy a odpovídajícími výrobními programy byl v každé sérii generován materiálový tok odpovídající nastaveným pravidlům. Jeho záznamy byly analyzovány pomocí nástroje APP (Analyser of Production Processes) s cílem ověření shody generovaného materiálového toku a definovaných pravidel. Odpovídající grafické zobrazení takto definovaných směnových režimů, které je jedním z výstupů *Generátoru průchodů evidenčními body*, uvádí Obr. 7.



Obr. 7 Grafický výstup Generátoru průchodů evidenčními body znázorňující definované směnové režimy a jejich periodicitu, volba vynechání celých směn zasahujících do nepracovních dnů (zdroj: autor)

Příklad analýz (provedených nástrojem APP) záznamů rekonstruovaného materiálového toku je na Obr. 8. Každý bod grafu odpovídá průchodu konkrétního elementu materiálového toku, souřadnice bodu určují čas (vodorovná osa) a datum (svislá osa) průchodu. Červenou barvou jsou v grafu odlišeny záznamy průchodů elementů generovaných v rámci noční směny definovaného směnového režimu – viz porovnání s pravou stranou Obr. 7.

Přehled průchodů evidenčním bodem >> v_NazevEB <<



Obr. 8 Přehled průchodů rekonstruovaných Generátorem evidenčních bodů na základě zadaných pravidel pro materiálový tok (zdroj: autor)

Druhá fáze validace *Generátoru průchodů evidenčními body* ověřila konkrétní realizaci metodiky rekonstrukce materiálového toku mezi dvěma různými EB. Cílem následujících simulačních experimentů bylo nalezení minimální „Počáteční obsazenosti“, při kterém je dodržena kontinuita materiálového toku mezi oběma EB, tedy při kterém nejsou zaznamenány „Neshodné průchody“ (viz Obr. 6). 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:

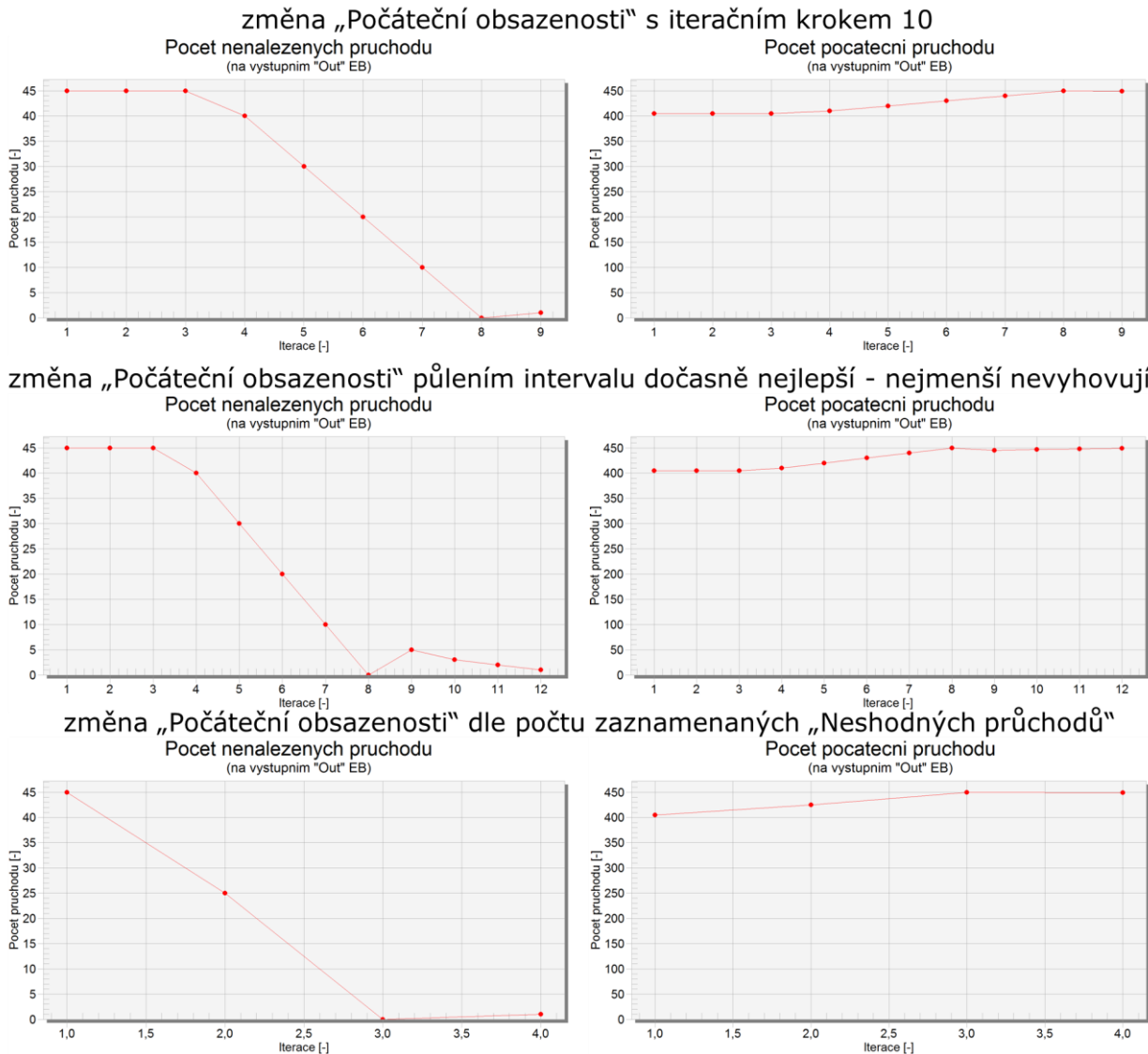
- změna „Počáteční obsazenosti“ s krokem 10,
- změna „Počáteční obsazenosti“ daná půlením intervalu mezi dočasně nejlepší (nejnovější) vyhovující a nejmenší nevyhovující hodnotou,
- změna „Počáteční obsazenosti“ daná počtem zaznamenaných „Neshodných průchodů“ – rozdíl „Počáteční obsazenosti“ v další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

Simulační experimenty byly provedeny pro několik kombinací směnových režimů a výrobních programů v těchto variantách zadání doby průchodu mezi vstupním a výstupním EB:

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

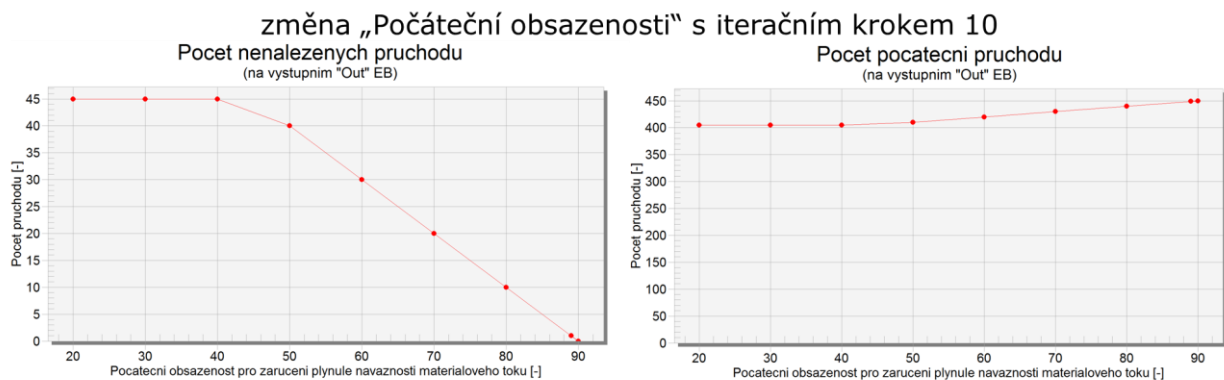
Pro všechny kombinace a varianty byly zvoleny stejné počáteční podmínky, (konkrétně hodnota „Počáteční obsazenost“ pro nultou iteraci byla rovna 20 elementům materiálového toku).

Pro ilustraci výsledků simulačních experimentů je na Obr. 9 zachyceno srovnání nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ pro tři výše zmíněné algoritmy. Grafy na levé straně zachycují, jak klesal počet „Neshodných průchodů“ (viz Obr. 6) v jednotlivých iteracích podle zvoleného algoritmu hledání optimální „Počáteční obsazenosti“. Grafy na pravé straně zachycují, jak rostl počet „Počátečních průchodů“ (viz Obr. 6), tedy průchodů zachycených dříve na výstupním EB než na vstupním EB, které je tedy třeba odfiltrovat.

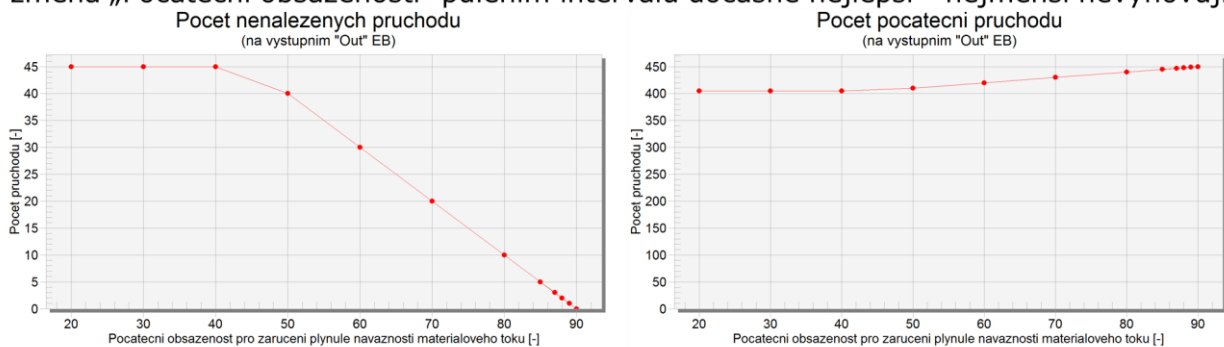


Obr. 9 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – porovnání algoritmů, vztaheno na pořadí iterací (zdroj: autor)

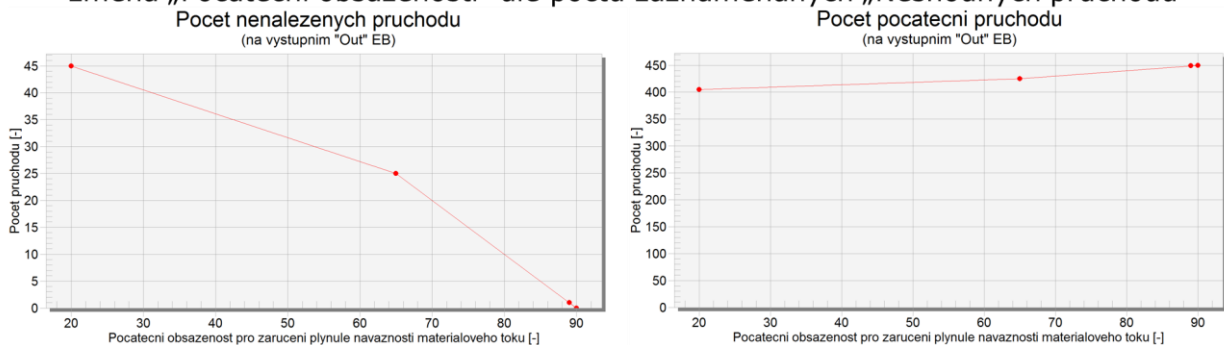
Analogicky je dále na Obr. 10 znázorněna série výsledků stejných simulačních experimentů. Zde na vodorovné ose grafů je vynesena hledaná „Počáteční obsazenost“ pro zaručení plynulé návaznosti materiálového toku. Porovnáním obou sérií grafů je patrný také princip porovnávaných optimalizačních algoritmů.



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



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



Obr. 10 Nalezení optimální „Počáteční obsazenosti“ a související „Počet neshodných průchodů“ – porovnání algoritmů, vztaheno na „Počáteční obsazenost“ mezi evidenčními body (zdroj: autor)

4.2 DALŠÍ MOŽNÝ VÝVOJ

Další potenciální vývoj navržené metodiky lze konkrétně navrhnout, ověřit a tím realizovat pomocí výše popsaných metamodelů.

V případě *Simulačního metamodelu pro rekonstrukci logistických procesů* je možné doplnit jej o databázi parametrů prostožů typických pro jednotlivé provozy velkosériových výrobních podniků, aby tak na základě rozboru dat se záznamy materiálového toku bylo možné rozhodovat o povaze provozu, z něhož data pochází.

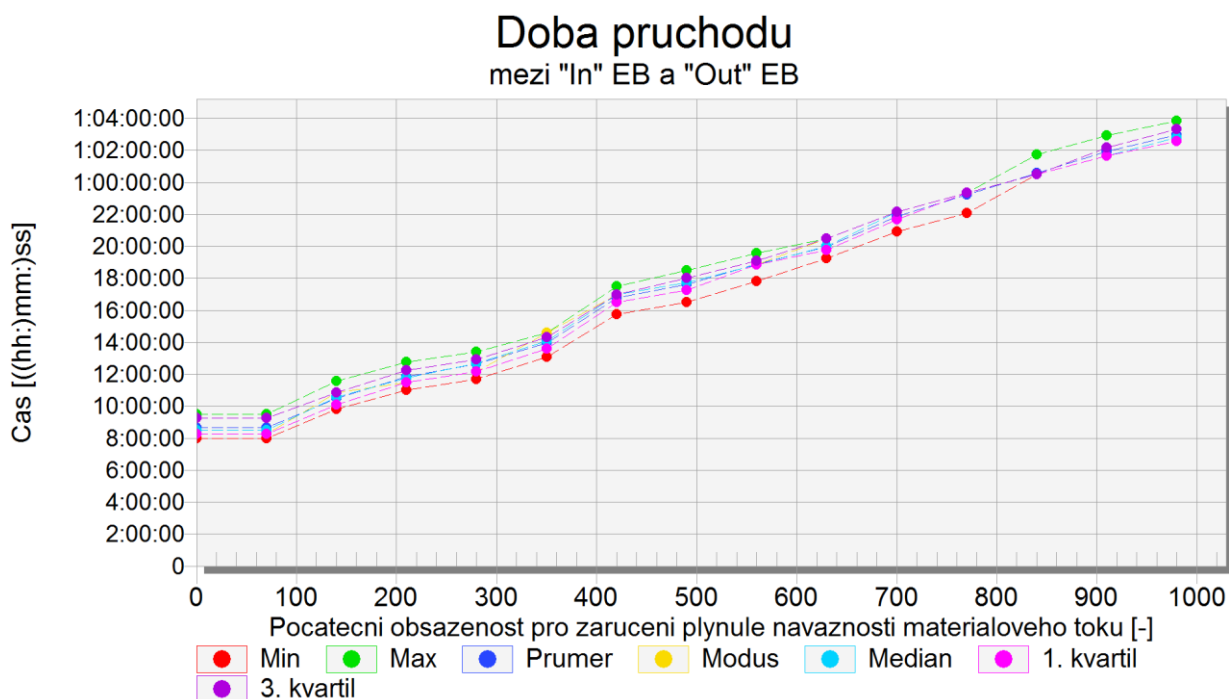
V případě *Generátoru průchodů evidenčními body* je díky modulární architektuře modelu možný jeho další vývoj, např. návrh a porovnání různých algoritmů zohledňujících poměr více typů elementů materiálového toku v rámci definice výrobního programu, nebo zohlednění zadané pohotovosti (<100%), aby metamodel 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) EB se zohledněním obsazenosti mezi těmito body či dobou průchodu.

5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Bylo postupováno v několika na sebe navazujících krocích. V každém byla provedena série simulačních experimentů pomocí k tomuto účelu vytvořených simulačních modelů.

Pokud jde o experimenty týkající se generování materiálového toku mezi dvěma různými EB, byla sledována závislost doby průchodu mezi EB na nastavené „Počáteční obsazenosti“, resp. s ní související výsledné průměrné obsazenosti mezi vstupním a výstupním EB. Výsledky pro konkrétní příklad počátečního nastavení (jeden směnový režim a výrobní program s jediným výrobkem) ukazuje Obr. 11, který naznačuje, že existuje těsná závislost (blízká přímé úměrnosti) mezi porovnávanými charakteristikami. Tato teze byla předmětem dalšího zkoumání.



Obr. 11 Závislost doby průchodu na nastavené počáteční obsazenosti pro zaručení plynulé návaznosti materiálového toku mezi EB (zdroj: autor)

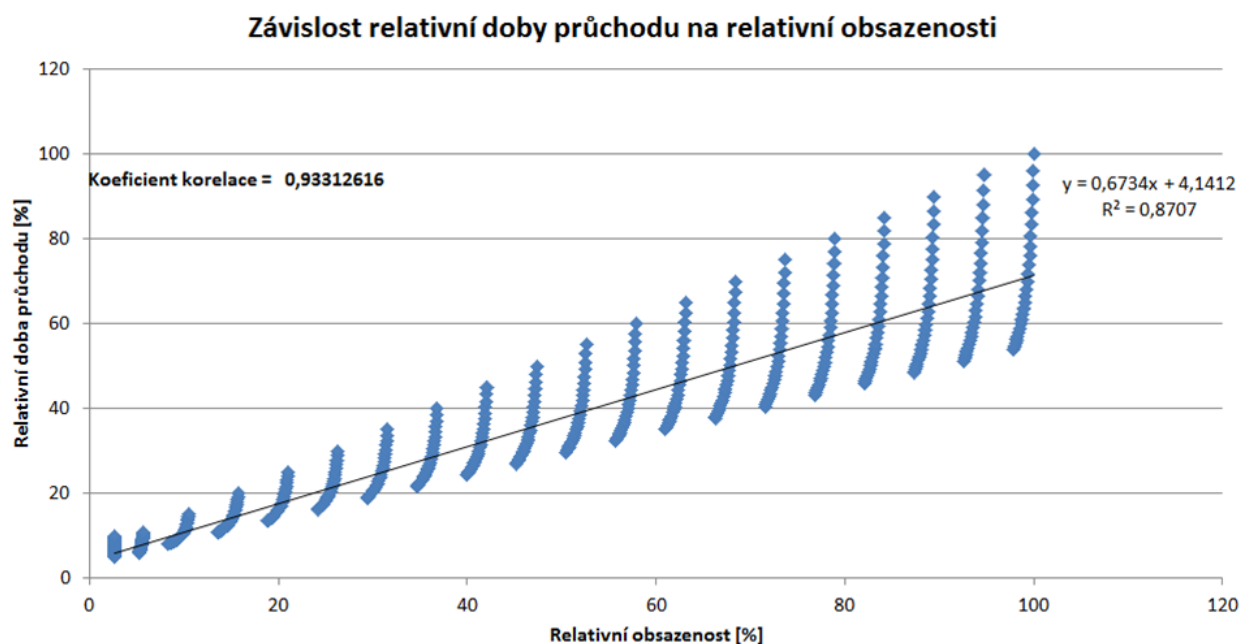
Dále byl navržen *testovací simulační model* ověřující vzájemnou závislost hodnot charakteristik materiálového toku. Prvním krokem bylo vytipování signifikantních charakteristik materiálového toku z pohledu nejčastěji volených cílových funkcí při řešení simulačních studií. Vytipovány byly: produkce vztažená na zvolené časové období, nutná kapacita určité oblasti a doba průchodu určitou oblastí.

Byla definována matice simulačních experimentů prováděných s *testovacím simulačním modelem* s cílem ověřit jejich závislost. Ve stanovených rozmezech byly měněny vstupní proměnné určující parametry obecného uzavřeného SHO typu $A|B|1|K|1|FIFO$ (viz Kendallova klasifikace a rovnice (11)), který *testovací simulační model* reprezentoval. Konkrétně byly měněny povaha vstupů A , povaha obsluhy B , počet požadavků v systému K a také kapacita vstupní fronty

(před obslužnou stanicí) a zpětné větve (za obslužnou stanicí) stejně jako podíl materiálového toku do ní vraceného.

Pro vyhodnocení simulačních experimentů (hodnot sledovaných charakteristik materiálového toku) byla navržena šablona a související datové listy (v MS Excel 2010) umožňující v grafické podobě znázornit míru vzájemné závislosti a vybrané statistiky těchto charakteristik. (Absolutní) hodnoty závisí na zvolených hodnotách vstupních parametrů. Proto byly v rámci zmíněných datových listů veškeré hodnoty sledovaných charakteristik převedeny na relativní.

Ukázka grafického výstupu navržené šablony je pro případ exponenciálně rozloženého taktu vstupu požadavků do fronty před obslužnou stanicí a konstantní doby obsluhy uvedena na Obr. 12.



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

5.1 VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

Výsledky simulačních experimentů posuzujících vzájemnou závislost vybraných 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).

Byla tak experimentálně ověřena platnost Littleova zákona pro SHO s různými kombinacemi typů rozdělení doby mezi vstupy požadavků a doby obsluhy, navíc díky zmíněným transformačním vztahům nezávisle na konkrétních hodnotách parametrů těchto rozdělení.

Dále lze uvažovat, že dle předpokladu lineární závislosti obsazenosti obecného úseku materiálového toku a doby průchodu přes tento úsek lze nastavit časové zpoždění průchodů EB na výstupu oproti průchodům EB na vstupu do úseku. Záznamy z obou EB získáváme pomocí

Generátoru průchodů evidenčních bodů. Přípustnost této úvahy je dána podmínkou vnitřní struktury úseku, resp. jím procházejícího materiálového toku, která musí splňovat podobnost (trajektorie i časových charakteristik) s tokem požadavků v SHO.

6 OVĚŘENÍ NAVRHOVANÉHO PŘÍSTUPU ŘEŠENÍ V PRAXI

Byl zvolen provozní úsek velkosériového výrobce, který splňuje podmínky podobnosti s (obecným) SHO a reprezentativnosti vzhledem k dalším průmyslovým provozům. Po provedení systémové analýzy provozního úseku byly s jeho (verifikovaným a validním) simulačním modelem realizovány simulační experimenty. Jejich výsledky byly porovnány s výstupy a poznatky získanými *testovacím simulačním modelem*, který zobrazuje obecný SHO.

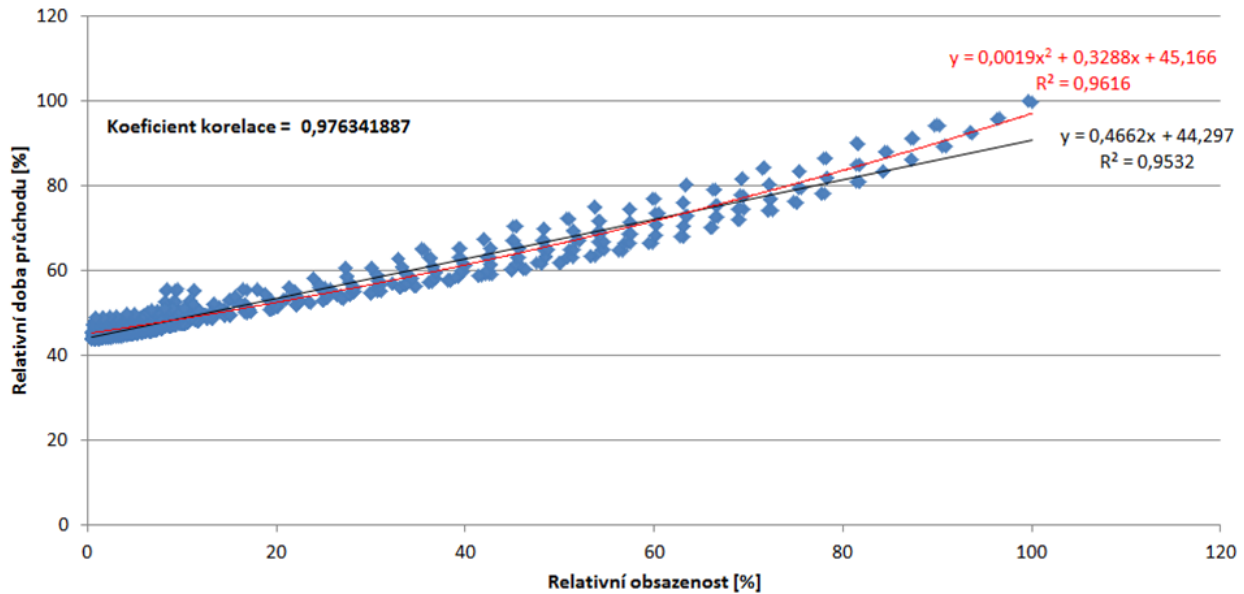
Zvoleným provozním úsekem byla výrobní oblast zahrnující několik technologických zařízení, pomocí kterých jsou vyráběny hřídele převodovek osobních automobilů. Simulační model byl vytvořen v souladu s celoevropským standardem pomocí knihovny prvků VDA-Powertrain (verze 10.0-03.080), která je k dispozici v rámci knihoven VDA Automotive pro simulační SW Plant Simulation.

6.1 POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH POZNATKŮ S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Výsledky simulačních experimentů provedených s modelem zvoleného výrobního úseku opět stejným principem jako v případě *testovacího simulačního modelu* posuzovaly vzájemnou závislost signifikantních charakteristik materiálového toku.

Byla zjištěna těsná závislost mezi relativní dobou průchodů a relativní obsazeností (pro zvolený úsek provozu). V tomto případě lze uvažovat také o kvadratické závislosti, jak ukazuje interpolace parabolou a vysoká hodnota koeficientu determinace R^2 (Obr. 13).

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_DISPONICI	{Maximum}: 100,00	{Modus}: #NENÍ_K_DISPONICI				
{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				

Obr. 13 Závislosti relativní doby průchodu na relativní obsazenosti (zdroj: autor)

7 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE

Výsledky dizertační práce lze rozdělit na část teoretickou a praktickou. Výsledky v teoretické oblasti vycházejí z popisu a rozboru materiálového toku (v logistických a výrobních systémech), a jeho charakteristik. Zde obsažené pojednání o simulacích materiálového toku s důrazem na efektivitu provádění simulačních studií vede k popsanému konceptu simulačních metamodelů. Do teoretické části patří také uváděné principy validace simulačních (meta)modelů a statistického vyhodnocení výsledků simulačních experimentů.

Praktickým výsledkem dizertační práce je návrh metodiky pro generování materiálového toku v systému hromadné výroby pomocí simulačního (meta)modelu. Byly navrženy dva koncepty simulačních metamodelů. *Simulační metamodel pro rekonstrukci logistických procesů* umožňuje na základě analýzy záznamů materiálového toku tento rekonstruovat. *Generátor průchodů evidenčními body* umožňuje materiálový tok na základě zadaných požadavků na jeho charakteristiky simulovat.

Experimenty provedené s *testovacím simulačním modelem* reprezentujícím uzavřený SHO se zpětnou větví byla výsledována velmi těsná lineární závislost mezi významnými charakteristikami materiálového toku, mezi které jsou zařazeny (relativní) doba průchodu a (relativní) obsazenost. Platnost této korelace nezávisle na konceptu (teoretického) SHO je experimentálně ověřena pomocí simulačního modelu odpovídajícího výrobního úseku.

8 ZÁVĚR

Cílem dizertační práce bylo zpracovat návrh metodiky pro generování metamodelu systému hromadné výroby umožňujícího provést simulaci materiálového toku s využitím předpokládaných vzájemných závislostí charakteristik/parametrů materiálového toku. V souladu s rozdělením tohoto cíle do dílčích kroků obsahuje práce v teoretické části přehled těchto charakteristik.

Návrhu metodiky generování metamodelu systému hromadné obsluhy se věnuje další část práce. Jsou zde popsána dvě na sebe volně navazující řešení vytvořená ve zvoleném simulačním nástroji. Obě pracují s vytipovanými charakteristikami materiálového toku, jejichž výběr s ohledem na 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, jehož záznamy jsou v elektronické formě k dispozici. Druhé řešení představuje *Generátor průchodů evidenčními body*, který naopak umožňuje získat záznamy materiálového toku vykazujícího zadané parametry a vlastnosti. V této části jsou rovněž uvedeny okrajové podmínky pro provedení analýz materiálového toku resp. jeho rekonstrukce pomocí navržených řešení.

Metodika byla experimentálně ověřena pomocí detailního simulačního modelu zvoleného velkosériového výrobního systému. Vzájemný vztah charakteristik simulovaného materiálového toku je porovnán s výstupy získanými ze série simulačních experimentů provedených s navrženým *testovacím simulačním modelem*. Vyhodnocena je vzájemná závislost vytipovaných 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 jakožto metamodel může do jisté míry nahradit detailní simulační model obecného materiálového toku.

Přínos dizertační práce lze mimo jiné spatřovat i v provedení a uceleném přehledu výsledků simulačních experimentů zaměřených na vzájemnou závislost významných charakteristik materiálového toku. Ta 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 především 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.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KÜHN, Wolfgang. Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. Wien : Hanser Verlag, 2006. ISBN-10: 3-446-40619-0.d
- [2] Verein Deutscher Ingenieure. Digitale Fabrik: Grundlagen. VDI 4499. místo neznámé : Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [3] VOTRUBA, Zdeněk, KALIKOVÁ, Jana a KALIKA, Marek. Systémová analýza. 2. Praha : České vysoké učení technické, 2008. str. 192. ISBN 978-80-10-0401-2.
- [4] VDI-Gesellschaft Fördertechnik. VDI-Richtlinie 3633. Materialfluss,. 2008. Abschnitt 1.4.
- [5] HLOSKA, Jiří a KUBÍN, Martin. Virtual Commissioning of Mechatronics Systems with the Use of Simulation. [autor knihy] Ryszard Jabłoński a Tomáš Březina. Mechatronics: Recent Technological and Scientific Advances. Brno : Spriner International Publishing, 2014, stránky 33-40.
- [6] SVOBODA, Vladimír a LATÝN, Patrik. Logistika. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. 80-01-02735-X.
- [7] DAVID, Petr a ORAVA, František. Zásilkářství. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2008. 978-80-01-04035-5.
- [8] PRECLÍK, Vratislav. Průmyslová logistika. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 80-01-02139-4.
- [9] CHRISTOPHER, Martin. Logistics & Supply Chain Management. fourth edition. New York : Financial Times Prentice Hall, 2011. 978-027-3731-122.
- [10] ARNOLD, Dieter a FURMANS, Kai. Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erweiterte Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 978-3-642-01404-8.
- [11] ŠTOČEK, Jiří a KARPETA, Vladimír. Uživatelský manuál Analyser of Production Processes (APP) (Analyzátor výrobních procesů): část věnovaná analýze dat z evidenčních bodů. [Dokument] 30. září 2010.
- [12] HAMPL, Petr. Kendallova 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?cisloclanku=2005111601>. 1214-9675.
- [13] LAW, Averill M. Simulation Modeling and Analysis. fourth edition. Singapore : Mc Graw Hill, 2007. 978-007-125519-6.
- [14] MÄRZ, Lothar, a další, a další. Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. ISBN 987-3-642-14535-3.
- [15] WENZEL, Sigrid, a další, a další. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. stránky 1-11. ISBN 978-3-540-53272-3.
- [16] RABE, Markus, SPIECKERMANN, Sven a WENZEL, Sigrid. Verifikation und Validierung für Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-35281-5.
- [17] KLEIJNEN, Jack P. C. a van GROENENDAAL, Willem. Simulation: A Statistical Perspective. Chichester : Johny Willey & Sons, 1992. ISBN 0-471-93055-5.
- [18] HLOSKA, Jiří. Analýza a rekonstrukce logistických procesů pomocí simulačního metamodelu. In Sborník přednášek XXXVII. mezinárodní konference dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011, stránky 91-94. ISBN 978-80-214-4323-5.

CURRICULUM VITAE – ING. JIŘÍ HLOSKA

Jméno a příjmení: Ing. Jiří Hloska
Datum a místo narození: 19. 10. 1985, Brno
Kontakt: jiri.hloska@seznam.cz



Vzdělání:

- 2010 – 2015 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Dizertační práce: Optimalizace materiálového toku v hromadné výrobě simulačními metodami
- 2008 – 2010 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Diplomová práce: Transformace simulačního modelu ze SW SimPro do SW Plant Simulation
- 2005 – 2008 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Bakalářská práce: Srovnání různých transportních systémů v ocelářském průmyslu
- 2005 – 2009 ČVUT, Fakulta dopravní
Bakalářská práce: Makroekonomické ukazatele a vývoj dopravy v ČR
- 1997 – 2005 Gymnázium, Brno – Řečkovice, Terezy Novákové 2

Odborné praxe a zaměstnání:

- 2012 – dosud iSILOG GmbH, Zástupce pro střední Evropu
řešení simulačních projektů
- 2010 – 2012 Škoda Auto, a.s., diplomantský pobyt v oddělení pro plánování a simulace výroby

Akademická stáž v zahraničí:

- 2011 – 2012 Universität Duisburg-Essen (semestrální pobyt v rámci programu ERASMUS), Spolupráce při řešení projektů na Institut für technische Logistik

Vědeckovýzkumná činnost:

- FRVŠ (Fond rozvoje vysokých škol): Inovace výuky logistických procesů pomocí metody diskrétní simulace

ABSTRACT

Předložená dizertační práce má za cíl navrhnout metodiku generování materiálového toku pomocí simulačního metamodelu velkosériového výrobního procesu, která bude založená na vzájemném vztahu vybraných charakteristik materiálového toku. První část práce shrnuje aktuální poznatky o problematice diskrétních simulací materiálového toku, souvisejících statisticko-matematických metodách, ale také informačních technologiích umožňujících efektivní realizaci simulačních studií.

Dále je 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 popsányými simulačními experimenty. Zvláštní pozornost je 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.

The presented PhD thesis aims to design a methodology for generating material flow within a simulation meta-model of a mass production process. This methodology is based on mutual relationship between selected characteristics of material flow. The first part of the thesis summarizes current information on discrete event simulation of material flow, related statistical-mathematical methods and also on information technology which enables to effectively carry out simulation studies.

Furthermore, methodology of reconstruction and generating of material flow using simulation meta-models aimed for this purpose is designed. The principles of algorithms used by those meta-models and potential of their application are demonstrated by simulation experiments carried out. Special attention is paid to selection of significant characteristics of material flow and their interrelationship. In order to evaluate this interrelationship a series of simulation experiments was carried out with a model which simulated a closed queuing system with varying parameters.

Discovered interrelationships between the selected characteristics of material flow are experimentally verified with the help of a detailed simulation model of a selected mass production system. Conclusions of the thesis summarize findings brought in the field of material flow simulation; with regard to the designed methodology of material flow reconstruction and generating they outline further steps which can be possibly carried out in the field of research and practical use.