



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ
FAKULTA**

Ing. Fedor Burčiar

Autoreferát dizertačnej práce

**Proaktívna simulácia v riadení výrobných
systémov**

na získanie akademického titulu: doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 2621 Automatizácia a informatizácia
procesov

v študijnom odbore: kybernetika

Forma štúdia: denná

Trnava, 22.4.2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na: Katedre aplikovanej informatiky
a automatizácie a Ústave aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky

Predkladateľ Ing. Fedor Burčiar
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ prof. Ing. Pavel Važan, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa ohod. na
Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, J. Bottu 25, 917
24, Trnava**

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan Materiálovotechnologickej
fakulty STU

SÚHRN

BURČIAR, Fedor: *Proaktívna simulácia v riadení výrobných systémov*. [Dizertačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky. – Školiteľ: prof. Ing. Pavel Važan, PhD. – Trnava: MTF STU, 2024. 106s.

Dizertačná práca je zameraná na dosiahnutie proaktivity v riadení výrobných systémov pomocou simulácie založenej na technológii digitálneho dvojčata. Súčasťou riešenia dizertačnej práce bol návrh metód zameraných na integráciu dát medzi výrobným systémom a simulátorom. Hlavným cieľom práce bola tvorba digitálneho dvojčata zameraného na proaktívne riadenie výroby, ktoré bolo následne testované a verifikované pilotným riešením sprostredkovania komunikácie medzi dvomi systémami založenom na aplikovaní navrhnutých dátovo-integračných metód. Za účelom dosiahnutia stanovených cieľov bola vykonaná dôkladná analýza výrobného systému z hľadiska dátovej štruktúry a dostupnosti dát nevyhnutných na tvorbu digitálneho dvojčata, ako aj simulačné testy, prostredníctvom ktorých bolo verifikované vytvorené digitálne dvojča ako aj sada navrhnutých metód dátovej integrácie. Súčasťou verifikácie pomocou simulačných testov bola testovaná schopnosť replikovania behu výrobného systému ako aj problémových miest vo výrobnom systéme. Na základe výsledkov z vykonaných analýz a simulačných testov boli navrhnuté riešenia na odstránenie nedostatkov vo výrobnom systéme ako na softvérovej, tak aj na hardvérovej úrovni. Jednotlivé moduly dátovo-integračných metód boli podrobené validačným testom, pričom bola skumaná aj ich aplikovateľnosť na iné typy výrobných dát, než je súčasná úzka špecializácia na výrobné objednávky. Na základe výsledkov vykonaných testov bolo možné usúdiť, že všetky navrhnuté integračné metódy ako aj vytvorené digitálne dvojča sú aplikovateľné v praxi v stanovenej fázy výroby s podmienkou splnenia špecifikovaných požiadaviek.

Kľúčové slová: proaktívna simulácia, digitálne dvojča, riadenie výroby, dátová integrácia, výrobný systém

ABSTRACT

BURČIAR, Fedor: *Proactive simulation in production system control*. [Dissertation thesis]
 – Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Science and Technology; Institute of Applied Informatics, Automation and Mechatronics. – Supervisor: prof. Ing. Pavel Važan, PhD. – Trnava: MTF STU, 2024. pp 106.

The dissertation thesis addresses the problem of achieving proactivity in the management of production systems using simulation based on digital twin technology. Part of the solution to the problem at hand was the design of methods aimed at integrating data between the production system and the simulator. The main goal of the work was the creation of a digital twin aimed at proactive production control, which was subsequently tested and verified via pilot solution for mediating communication between two systems based on the application of the proposed data-integration methods. In order to achieve the set goals, a thorough analysis of the production system was carried out, focused on identifying the structure and availability of data necessary for the creation of a digital twin, as well as simulation tests, through which the created digital twin and the proposed data integration methods were verified. As part of the verification by simulation tests, the ability to replicate the flow of production system as well as problematic areas in the production system was tested. Based on the results of the performed analysis and simulation tests, solutions were proposed to eliminate deficiencies in the production system both at the software and hardware levels. Individual modules of data-integration methods were subjected to validation tests, while their applicability to other types of production data other than the current narrow specialization on production orders was also examined. Based on the results of the performed tests, it was possible to conclude that all proposed integration methods as well as the created digital twin are applicable in practice, provided their application in the specified production phase and the specified requirements being met.

Keywords: proactive simulation, digital twin, production control, data integration, production system

OBSAH

ÚVOD	7
1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE A PREHLAD KLÚČOVÝCH POJMOV . 9	
1.1 Industry 4.0	9
1.2 Digitálne Dvojča	10
1.3 Prehľad výskumu a implementácií v oblasti tvorby digitálnych dvojčat	10
1.4 Dátová integrácia – CMSD štandard	11
2 Experimentálny model výrobného systému.....	12
2.1 Všeobecný návrh priebehu dátovej integrácie	12
2.2 Získavanie dát	13
2.3 Agro, Food & Beverages Factory – Festo Didactic	14
2.4 Analýza výrobného systému	14
2.5 Inicializačný súbor pre simulačný model	15
3 METODOLÓGIA PROAKTÍVNEHO RIADENIA VÝROBNÝCH SYSTÉMOV . 17	
3.1 Systém objednávok	17
3.2 Objednávkový súbor	17
3.3 Metódy dátovej integrácie	19
3.4 Definovanie objednávok pomocou „generátora“	20
3.5 Manuálne usporiadanie objednávok - MOR	20
3.6 Automatizované usporiadanie objednávok - AOR.....	21
3.6.1 Dôležité funkcie MES v koncepte AOR	21
3.6.2 Úloha simulátora v koncepte AOR	23
4 SIMULAČNÉ EXPERIMENTY A VALIDAČNÉ TESTY	24
4.1 Sledovanie ukazovateľov výkonnosti výrobného systému (PI)	25
4.2 Validácia simulačného modelu	26
4.3 Simulačné experimenty	27
4.3.1 Prvý simulačný experiment	27
4.3.2 Posledný simulačný experiment	29
4.4 Validáčnne testy pre metódu MOR.....	30

4.5	Validačné testy pre metódu AOR	32
4.5.1	Rozbitie zhlukov dávok.....	32
4.5.2	Bodové ohodnotenie dávok	34
5	ZHODNOTENIE NAVRHNUTÝCH METÓD A ICH APLIKOVATELNOSTI	35
5.1	Použitie „Generátora objednávok“ v tvorbe digitálnych dvojčat	35
5.2	Dátová integrácia pomocou MOR	36
5.3	Integrácia dát pomocou AOR	36
5.4	Zhodnotenie simulačných experimentov a validačných testov	37
6	PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	38
	ZÁVER A ĎALŠIE SMEROVANIE VÝSKUMU	40
	VÝBER Z BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	41
	ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	43

ÚVOD

Neustály vývoj nových a vyspelejších informačných technológií má za následok digitalizáciu a automatizáciu čoraz väčšieho množstva procesov v podnikoch. Konkurencia v oblasti nových technológií sa na trhu každým okamihom navyšuje a podniky sú nútené vyvíjať a implementovať nové, efektívnejšie technológie spravujúce výrobné procesy. Tieto procesy majú za úlohu nielen uľahčiť výrobný proces ale aj zvýšiť jeho produktivitu a týmto udržiavať konkurencieschopnosť podniku. Jedným zo spôsobov ako toto docieľiť je presun do virtuálneho priestoru, ktorý bude priamo prepojený na fyzické procesy prebiehajúce v podniku.

Skupina technológií, ktorá by mala v budúcnosti toto prepojenie umožniť je krytá pod menom Industry 4.0 a patria do nej rôzne procesy, ktoré sa dokážu prispôbovať rýchlym zmenám na trhu, požiadavkám rastúceho množstva zákazníkov, ale aj monitorujú výrobné procesy a vykonávajú priebežnú analýzu získaných dát. Jednou z technológií patriacich do skupiny Industry 4.0 je technológia digitálneho dvojčata. Táto technológia si vyžaduje existenciu funkčného fyzického systému, ktorý nemusí byť nutne z výrobné sféry, ale táto práca bude zameraná na proces tvorby digitálneho dvojčata k výrobnému systému AFB Factory od firmy Festo Didactic nachádzajúceho sa na pracovisku UIAM MTF. Tvorba digitálnych modelov a následne ich transformácia do podoby digitálneho dvojčata bude primárne uskutočnená v prostredí simulátora Witness od firmy Lanner Group.

Predkladaná dizertačná práca pojednáva o tvorbe digitálnych modelov a digitálnych dvojčat ako aj ich využití v oblasti proaktívnej simulácie pri riadení výrobných procesov. Dôležitým krokom pri dosiahnutí cieľov práce bola dôkladná analýza výrobného systému a dvoch MES systémov riadiacich výrobu, nakoľko práve táto napomáhala pri pochopení problematiky automatizácie procesu vzájomnej komunikácie fyzických a digitálnych systémov v koncepte digitálneho dvojčata. Za účelom docielenia dátovej integrácie medzi dvomi zvolenými systémami a jej sprostredkovania boli navrhnuté metódy, ktoré je možné aplikovať v rôznych fázach výroby alebo tvorby digitálnych dvojčat. Práca sa taktiež zameriava na vykonávanie simulačných experimentov s čiastkovými riešeniami ako aj validačných testov navrhnutých modulov.

Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je:

Návrh konceptu proaktívneho riadenia výrobných systémov pomocou technológie digitálneho dvojčata a jeho verifikácia pomocou vytvoreného pilotného riešenia.

- Splnenie hlavného cieľa spočívalo v splnení čiastkových cieľov, ktoré boli definované nasledovne:
- analýza existujúcich riešení v oblasti tvorby a použitia digitálneho dvojčata,

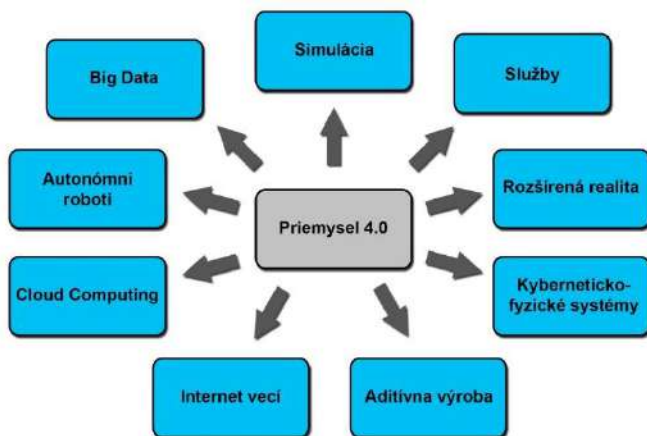
- analýza dátovej štruktúry východiskového fyzického výrobného systému,
- návrh spôsobu získavania dát potrebných na zabezpečenie simulácie pomocou digitálneho dvojčata,
- stanovenie požiadaviek kladených na výrobné a riadiace systémy a simulačnú platformu,
- vytvorenie digitálneho modelu,
- návrh pilotného riešenia formou aplikácie navrhnutých dátovo-integračných metód,
- testovanie navrhnutých riešení formou simulačných experimentov a validačných testov,
- objektívne zhodnotenie navrhnutých riešení formou vytýčenia výhod a nevýhod vyplývajúcich z funkcionality predkladaných riešení.

1 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRÁCE A PREHEAD KĽÚČOVÝCH POJMOV

Úvodná kapitola je venovaná základným teoretickým poznatkom súvisiacich so simuláciou, integráciou dát, digitálnymi modelmi a dvojčatami v kontexte riadenia výrobného procesu proaktívnou metódou.

1.1 Industry 4.0

Pod pojmom Industry 4.0 (I4.0) chápeme v poradí štvrtú priemyselnú revolúciu, ktorá bola prvýkrát spomenutá v Nemecku roku 2011. Dôvodom jej iniciatívy bolo výraznejšie podnietiť rozvoj priemyslu a ekonomiky v Európe. Z tohto dôvodu je pojem I4.0 častokrát spájaný s procesom reindustrializácie Európy (Popjaková, Mintálová, 2019). Pri I4.0 sa nejedná iba o obyčajnú digitalizáciu priemyselnej výroby, ale o komplexný systém spájaný so širokou škálou ľudských činností aj mimo výrobné sféry. Ako jadro tejto priemyselnej revolúcie možno považovať štyri prvky, ktoré sú ďalej používané všetkými technológiami zahrnutými v I4.0: Internet of Things (Internet vecí, IoT), Cloud Computing (Cloudové služby), Big Data (veľké dáta) a analýza (Frank et al., 2019). V závislosti od uhla pohľadu ako aj od úrovne komplexity sú všetky tieto technológie priamo spájané s inteligentnou výrobou (Qi, 2018).



Obrázok 1 Odvetvia Industry 4.0 (Tay, 2018)

S príchodom I4.0 a technológií ako sú IoT, Big Data, počítačová simulácia, virtualizácia, rozšírená realita, autonómne roboty a rôznymi ďalšími sa mení aj výrobné prostredie, vytvárajú sa nové príležitosti pre nové obchodné modely, pričom vznikajú aj vyššie nároky na kybernetickú bezpečnosť (Zhang, 2017). Ako fenomén dnešnej doby možno IoT považovať za prostriedok na prepojenie zariadení, služieb a ľudí, čo má za následok zvýšený

objem dát vygenerovaných pri komunikácii stroj-stroj, stroj-človek alebo človek-človek (Zhong, 2017).

1.2 Digitálne Dvojča

V koncepte Industry 4.0 má DD významné postavenie, nakoľko ho je možné prepojiť s mnohými ďalšími komponentami I4.0 ako sú napríklad IoT, umelá inteligencia, strojové učenie, simulácia, Big Data a ďalšie. V súčasnosti pojem digitálne dvojča neoznačuje iba virtuálny model reálneho systému, ale je čoraz častejšie považovaný za nositeľa širokej škály dynamických dát a stavových informácií, získavaných a prenášaných IoT snímačmi a senzormi (Bílik, 2019). DD možno na základe tohto predpokladu považovať za nástroj, pomocou ktorého dokážeme monitorovať fyzické objekty, nefyzické entity, ale aj procesy v reálnom čase a priestore, keďže DD umožňujú vytvárať veľmi detailný obraz za predpokladu poskytnutia dostatočného množstva skutočných dát.

Medzi hlavné ciele DD patrí zvýšenie celkovej efektivity výroby, optimalizácia procesov ako aj maximalizácia využitia dostupných zdrojov. Na dosiahnutie takto stanovených cieľov je potrebné veľké množstvo dát používaných na tvorbu digitálnej kópie požadovaného systému. Kópia reálneho systému vytvorená zo zbieraných dát môže byť iba tak kvalitná, ako sú kvalitné dáta poskytnuté na jej tvorbu. Je dôležité, aby dáta zberané zo systému, ku ktorému má DD byť vytvorené, boli čo najlepšie spracované bez akéhokoľvek šumu, ktorý by spôsobil ich skreslenie a v ideálnom prípade už vopred pripravené s takou mierou integrácie, aby ich bolo možné rovno posunúť do simulačného a optimalizačného softvéru, v ktorom bude DD realizované.

Prostredie simulačného softvéru poskytuje všetky nástroje potrebné na modelovanie kópie systému, pričom je v ňom možná aj tvorba určitej miery abstrakcie pre procesy, ktoré majú nízku mieru vplyvu na celkový priebeh simulovaného procesu. Následne umožňuje využitie dát z reálneho systému na optimalizačný proces, čím sa vytvorená digitálna kópia systému posúva o krok bližšie k statusu digitálneho dvojčata. Tento typ prepojenia vo výsledku prináša vysokú mieru presnosti vo výsledkoch optimalizačných návrhov (Morhác, 2016).

1.3 Prehľad výskumu a implementácií v oblasti tvorby digitálnych dvojčat

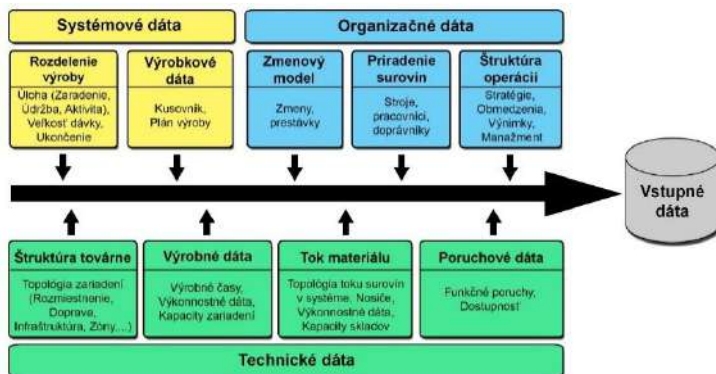
Analýza publikácií v oblasti simulácie a optimalizácie procesov ukazuje, že veľké množstvo publikácií sa zameriava na simulačné modely patriace do prvých dvoch kategórií (digitálny model a tieň), pričom veľmi malá časť je venovaná práve digitálnym dvojčatám. Tento stav je s veľkou pravdepodobnosťou zapríčinený nepresnou a neštandardizovanou definíciou pojmu DD do roku 2021. Nižšie uvedená tabuľka obsahuje prehľad riešení implementácie digitálnych dvojčat do oblastí výroby, medicíny, riadenia robotov a ďalších. Jednotlivým riešeniam bola v rámci prieskumu pridelená jedna z kategórií DD: model, tieň alebo dvojča.

Tabuľka 1 Prehľad relevantných implementácií DD

Autor (rok)	Zameranie	Kategória
Karakra a spol. (2020)	Využitie DD za účelom manažmentu pohybu pacientov v priestoroch ambulancie alebo nemocnice. Predikcia neobvyklých a neočakávaných situácií.	Digitálny tieň
Zhuang a spol. (2018)	Ukážka implementácie DD a IoT sietí do procesu riadenia montážnej linky satelitov. Predikcia výroby založená na Big Data.	Digitálne dvojča
Bergmann a spol. (2010)	Použitie CMSD štandardu na tvorbu inicializačných súborov a pre potreby automatizovanej tvorby simulačných modelov výrobných systémov.	Digitálny tieň
Singh a spol. (2021)	Vysvetlenie a ukážka štyroch úrovni zrelosti DD na MATLAB modeli batériového systému robotického autíčka.	Digitálny tieň
Müller a spol. (2017)	Implementácia DD do výrobných procesov v malých a stredných podnikoch v podobe aplikácie integrujúcej dáta z rôznych zariadení vo výrobnom podniku.	Digitálne dvojča
Shao, Kibira (2018)	I4.0 ako nástroj na zaručenie konkurencieschopnosti v akomkoľvek priemysle. Tvorba dynamického toku výroby, optimalizácia hodnotového reťazca musí byť autonómne kontrolovaná a riadená.	Digitálne dvojča

1.4 Dátová integrácia – CMSD štandard

Informačný model CMSD je otvorený štandard vyvíjaný v rámci organizácie SISO (Simulation Interoperability Standards Organization). Hlavným cieľom tohto štandardu je zabezpečiť zjednodušenie prenosu dát a spolupráce medzi simulačnými systémami a zariadeniami, systémami a aplikáciami v oblasti výroby. Za účelom dosiahnutia stanovených cieľov je v štandarde zahrnutý návrh dátovej špecifikácie, ktorý napomáha zefektívneniu výmeny dát v simulačných prostrediach (SISO, 2010).



Obrázok 2 Vstupné údaje do simulačného modelu (VDI, 2000)

Na Obrázok 2 možno vidieť rozdelenie dát do troch kategórií podľa asociácie nemeckých inžinierov (VDI): technické, organizačné a inicializačné údaje. Úlohou technických dát je niesť informáciu o rozložení a topológii celého výrobného systému vrátane parametrov jednotlivých výrobných zariadení. Organizačné údaje obsahujú informácie o štruktúre operácií a procesov prebiehajúcich vo výrobnom systéme ako aj údaje o výrobných smenách alebo rozdelení surovín. Posledná kategória, inicializačné údaje, obsahujú informácie o jednotlivých úlohách vykonávaných na pracoviskách, objednávkové údaje alebo plán výroby (Bergmann, 2011). Kým technické údaje a organizačné údaje je častokrát možné vyčítať alebo zistiť aj bez použitia metód dátovej integrácie a rovnako ich implementovať v procese tvorby simulačného modelu, inicializačné údaje sú práve tie, ktoré odrzkadľujú aktuálny stav na jednotlivých pracoviskách v reálnom systéme v danom okamihu (Hotz, 2007). Správna reprezentácia inicializačných dát je hlavným problémom, ktorý je nutné vyriešiť pri tvorbe akéhokoľvek simulačného modelu, ktorý má byť považovaný za DD.

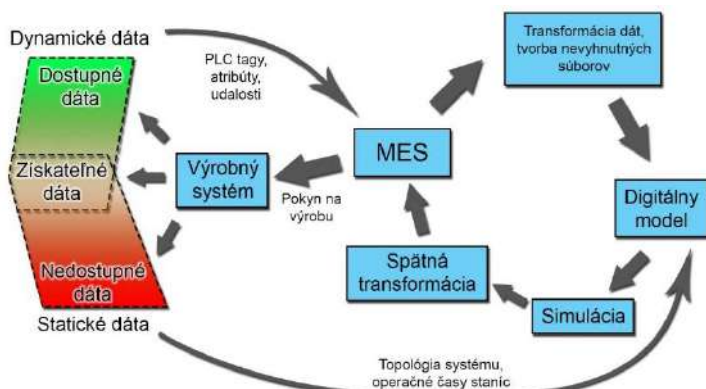
2 EXPERIMENTÁLNY MODEL VÝROBNÉHO SYSTÉMU

Základnou podmienkou pre existenciu digitálneho dvojčata je simulačný model odrzkadľujúci určitý fyzický systém. V tejto kapitole budú bližšie popísané použité postupy pri tvorbe digitálneho experimentálneho modelu výrobného systému AFB Factory - Festo Didactic. Tvorba modelu prebiehala po nasledovných etapách: získavanie dát o systéme a procesoch, modelovanie, verifikácia, validácia modelu a testovanie.

2.1 Všeobecný návrh priebehu dátovej integrácie

V koncepte riadenia výroby, v ktorom kľúčový faktor predstavuje proaktivita v zmysle rozhodovania o ďalšom postupe výroby, tvorba vernej kópie východiskového výrobného systému v podobe digitálneho dvojčata má najvyššiu prioritu. Za účelom úspešnej tvorby tohto DD je dôležité navrhnúť metódy pre získanie rôznorodých dát nachádzajúcich sa vo výrobnom alebo nadradenom MES systéme. Tieto údaje môžu byť ukladané v podobe

senzorických dát v PLC, atribútov priamo v MES alebo ich je nutné získať inými manuálnymi metódami (rozmiestnenie pracovísk). Z dôvodu zachovania plynulosti vo výrobe je dôležité navrhnuť primeranú stratégiu na získavanie a dosiahnutie maximálneho možného stupňa integrácie týchto dát s platformou, na ktorej sa dané DD nachádza. Automatizácia procesu dátovej integrácie medzi výrobným systémom a DD predstavuje ideálny stav, ktorý bol cieľom dosiahnuť pomocou metód navrhovaných v kapitole 3. Tok a členenie dát v procese dátovej integrácie je znázornené na Obrázok 3.



Obrázok 3 Grafické znázornenie toku dát v procese integrácie

2.2 Získavanie dát

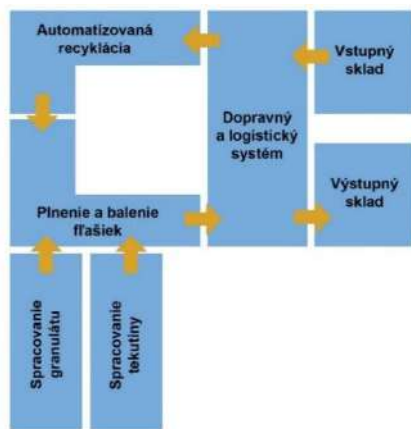
Tvorba digitálneho dvojčaťa si vyžaduje veľké množstvá rôznorodých dát. Tieto dáta a tým aj metódy ich získavania sa líšia na základe dostupnosti, charakteru, formátu, spôsobu spracovania dát a pod. V prípade výrobného systému AFB Factory je možné získať dáta z viacerých zdrojov, pričom najvýznamnejšími sú signály z IoT zariadení rozmiestnených po výrobnom systéme ukladaných v databáze nadriadeného MES systému AVEVA. Ďalším významným spôsobom zberu výrobných dát sú použíateľom definované skripty, ktoré sú spúšťané v prípade výskytu určitých udalostí. Postupy používania používateľských skriptov sú v práci bližšie popísané v kapitole 4.3. Pre potreby ilustrácie dát identifikovateľných vo výrobnom systéme AFB boli zvolené dve rôzne kategorizácie dát: podľa dostupnosti a charakteru dát. Dáta na základe dostupnosti možno rozdeliť do nasledovných skupín (Lanner Group, Ltd., 2016):

- **dostupné dáta** – ľahko dostupné, nie je ich potreba žiadnym spôsobom upravovať a je ich možné použiť pri tvorbe modelu,
- **získateľné dáta** – tieto dáta je nutné zhromažďovať z viacerých zdrojov a upraviť do príslušnej podoby, aby ich bolo možné použiť pri modelovaní,

- **nedostupné dáta** – sem patria všetky dáta, ktoré nie je možné získať z rôznych príčin a je ich nutné buď dočasne alebo permanentne nahradiť odhadovanými hodnotami.

2.3 Agro, Food & Beverages Factory – Festo Didactic

Výrobný systém, ktorý je predmetom replikácie v podobe digitálneho dvojčata pozostáva z dvoch hlavných častí. Z hľadiska charakteristiky procesov prebiehajúcich v jednotlivých častiach výrobného systému je možné ho rozdeliť na diskretnú a spojitú časť výroby. Prvá - diskretná časť systému - pozostáva z kombinácie dopravníkov a pracovných staníc, ktoré prepravujú a pracujú s dvomi druhmi výrobkov. Finálnym výrobkom v tomto výrobnom systéme je fľaška obsahujúca jednu z dvoch dostupných náplní: granulát alebo kvapalina. Za účelom zjednodušenia procesu modelovania výrobného systému a s použitím určitého stupňa abstrakcie je možné celý okruh týkajúci sa toku flášiek v systéme nahradiť procesmi diskretného charakteru. Do druhej časti výrobného systému AFB Factory patria procesy zabezpečujúce tok, filtráciu surovín a uskladnenie náplne flášiek. Táto časť výrobného systému je rozdelená do dvoch hlavných celkov zameraných na automatizované spracovanie granulátu alebo kvapaliny. Na modelovanie tejto časti výrobného systému je vhodné použiť metódy a nástroje na simuláciu spojitých procesov.



Obrázok 4 Rozdelenie výrobného systému do zón

2.4 Analýza výrobného systému

Po vykonaní prvotnej analýzy bolo v skúmanom výrobnom systéme identifikovaných sedem logicky odlišiteľných zón (Obrázok 4). Hlavným charakterizujúcim parametrom jednotlivých logických celkov je ich primárna funkcionalita. Tieto funkcie zahŕňajú: nakladanie/vykládanie výrobkov, recyklácia flášiek, spracovanie materiálu, doprava, plnenie a skladovanie výrobkov. Každý zo siedmich identifikovaných celkov má jedno

alebo viacero pracovísk, ktoré ho charakterizujú. Výrobný systém pracuje na základe používateľských objednávok prichádzajúcich do výrobného systému z nadradeného MES systému.

Každá objednávka obsahuje dávky vo veľkosti šesť fľašiek, pričom zloženie jednotlivých objednávok môže byť ľubovoľné. Výrobný systém AFB Factory umožňuje dva typy náplne fľašiek: granulát alebo kvapalina. Okrem typu náplne taktiež umožňuje tri úrovne náplne pre každý výrobok v systéme: 0%, 50% alebo 100%, pričom náplň s hodnotou 0% znamená iba recyklovanú fľašku daného typu. Identifikácia výrobkov v procese výroby pre potreby prenastavenia jednotlivých pracovísk prebieha v podobe RFID čipov, ktoré sú čítané štyrmi RFID senzormi umiestneným na strategicky významných miestach v systéme.

2.5 Inicializačný súbor pre simulačný model

Jednou z vlastností simulačných softvérov je možnosť spustenia simulačného modelu v rôznych stavoch rozpracovanosti. V základnom režime je simulačný model vždy spúšťaný z prázdneho stavu, pričom prvý výskyt výrobkov v modeli sa zväčša odohráva v čase 0:00 simulačného prostredia. V prípade digitálnych dvojčiat platí, že musia byť schopné odzrkadliť reálny stav systému, ku ktorému sú vytvárané, v okamihu odoslania požiadavky zo strany používateľa. Informácia o aktuálnom stave fyzického systému je zvyčajne obsahom tzv. inicializačných súborov. Hľadanie spôsobov na efektívnu tvorbu týchto súborov je prvá prekážka, ktorú bolo nutné prekonať. Simulátor Witness ponúka nástroje a prvky, ktoré je možné vložiť do simulačného modelu, s cieľom načítať práve tieto súbory. Inicializačné súbory pre simulátor Witness majú príponu .sta a sú tvorené na základe upraveného štandardu CMSD.

```
Čas_systému #ak je rôzny od nuly
Typ_prvku_1, Špecifikácia_statického_objektu_1, Atribút#1, ... Atribút#n-1, Atribút#n
Typ_prvku_2, Špecifikácia_statického_objektu_2, Atribút#1, ... Atribút#n-1, Atribút#n
...
Typ_prvku_m-1, Špecifikácia_statického_objektu_m-1, Atribút#1, ... Atribút#n-1, Atribút#n
Typ_prvku_m, Špecifikácia_statického_objektu_m, Atribút#1, ... Atribút#n-1, Atribút#n
```

Box 1 Štruktúra .sta súboru

Tieto súbory musia byť špecificky definované, pričom ich obsahom je informácia o všetkých dynamických prvkoch systému, resp. výrobkoch a vrchnákoch v prípade výrobného systému AFB Factory. Presná štruktúra informácie pre simulátor Witness je popísaná v nasledujúcom bloku.

Pri tvorbe tohto typu súboru je dôležité dodržiavať určité zásady vyplývajúce zo štandardov nasadených vo zvolenom simulátore. Hlavnou požiadavkou je používanie identických názvov jednotlivých prvkov a pracovných staníc atribútov. Prvá časť reťazca reprezentujúceho jeden dynamický prvok v systéme - Typ_prvku – zodpovedá všeobecnej definícii výrobkov alebo elementárnych prvkov určitého typu, napr. FľaškaA, FľaškaB,

STU

Vrchnák a pod. Táto informácia hovorí simulátoru, aký prvok má vzniknúť v modeli na začiatku simulácie. Špecifikácia_statického_objektu zodpovedá presnému názvu pracoviska, zásobníka alebo dopravného pásu nachádzajúceho sa v prostredí simulátora. Úlohou tejto špecifikácie je poskytnúť simulátoru presný popis pracoviska, ktoré je cieľovou destináciou na vloženie elementárneho prvku definovaného v prvej časti daného reťazca. Súčasťou definície objektov môže v prípade potreby byť aj presný stav rozpracovanosti daného pracoviska, čas do konca cyklu, či je pracovisko zablokované, stav čakania a ďalšie. Posledná časť definície reťazca pozostáva z vlastností vytvorených prvkov, ktoré sú im pridelené vo chvíli vzniku v simulačnom modeli. Podobne ako pri type výrobku a názvoch pracovísk, pomenovanie atribútov musí byť zosúladené s názvami atribútov definovaných v prostredí simulátora. Na množstvo atribútov definovaných týmto spôsobom nie je kladené žiadne obmedzenie, ale dĺžka reťazca obsahujúceho informáciu o jednotlivých prvkoch vkladaných do modelu podlieha jednému z obmedzení popísaných nižšie.

```
vrchnak,bopravnik,State="Moving/Time=0.00"  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.82,  HEIGHT = 0.55
vrchnak,bopravnik,State="Moving/Time=0.00"  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.82,  HEIGHT = 0.55
vrchnak,vrchnaky,  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.42,  HEIGHT = 0.55
vrchnak,vrchnaky,  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.82,  HEIGHT = 0.55
vrchnak,vrchnaky,  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.82,  HEIGHT = 0.55
vrchnak,vrchnaky,  LENGTH = 0.5,  WIDTH = 0.82,  HEIGHT = 0.55
FlaskaVoda,dremulat,State="Busy/Time=2.0"  ICON = 41,  str_poradovenie = 1,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,skutin,State="Busy/Time=2.0"  ICON = 30,  str_poradovenie = 0.5,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,vstup,State="Busy/Time=2.0"  ICON = 30,  str_poradovenie = 0.5,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,CC4,State="Moving/Time=0.15"  ICON = 42,  str_poradovenie = 1,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,CC4,State="Moving/Time=0.15"  ICON = 42,  str_poradovenie = 1,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,CC4,State="Moving/Time=0.15"  ICON = 42,  str_poradovenie = 0.5,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,CC3,State="Moving/Time=0.30"  ICON = 30,  str_poradovenie = 1,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
FlaskaVoda,CC3,State="Moving/Time=0.30"  ICON = 30,  str_poradovenie = 0.5,  ID_flasa = ID_flasa + 1,  str_ID_flasa = ID_flasa
```

Obrázok 5 Inicializačný súbor pre simulačný model

Dôležitým faktorom pri tvorbe inicializačných súborov je kladenie dôrazu na dve obmedzenia týkajúce sa konkrétne simulátora Witness. Prvé obmedzenie spočíva v množstve znakov v každom riadku, pričom ich maximálny počet je 4095. Toto obmedzenie je spôsobené maximálnou veľkosťou premennej typu „string“ v prostredí simulátora. Pre väčšinu simulačných modelov a bežne simulovaných procesov vo výrobe je dosiahnutie stanovenej limity znakov nereálne. Aj napriek tomu je dôležité pripomenúť, že pri systémoch so zvýšenou komplexitou spracovania výrobkov a požiadavkami na sledovanie určitého druhu výrobku v sumarizačných štatistikách, ktoré simulátor poskytuje po ukončení simulácie, môže narastať aj zložitosť týchto reťazcov. V prípade týchto systémov sa môže vyskytnúť scenár, v ktorom je stanovená limita znakov reťazca prekročená. Obrázok 5 obsahuje praktickú ukážku inicializačného súboru.

Druhé obmedzenie pri tvorbe inicializačných súborov pre simulátor Witness sa prejavuje pri práci s tekutinami, s ktorými pracuje druhý simulačný model. V súboroch s príponou .sta nie je možné nastaviť začiatočnú úroveň kvapaliny v nádržoch a strojoch ani v jednotlivých výrobkoch, v prípade, že by mali obsahovať nejaký druh kvapaliny. Definícia aktuálneho stavu kvapalín na začiatku simulácie je možná dvomi spôsobmi. Ručným prepísaním vo vnútri modelu pred každým spustením simulácie v simulátore, alebo pomocou iného druhu súboru, pomocou ktorého je automaticky spúšťaná simulácia a obsahuje príkazy na predefinovanie príslušných zariadení v modeli.

3 METODOLÓGIA PROAKTÍVNEHO RIADENIA VÝROBNÝCH SYSTÉMOV

Jednou z prekážok, ktorú je potrebné prekonať pri riadení výrobných systémov pomocou DD, je dosiahnutie proaktivity. Je to komplexná úloha, vyžadujúca si použitie zatiaľ neštandardizovaných metód, ktoré sú okrem samotnej simulácie výrobného procesu a zberu dát z MES systémov, zamerané aj na integráciu týchto dát a automatizáciu celého procesu. Ide teda o spôsoby prepojenia MES systémov a simulačných platforiem rôznych druhov, ako aj o snahu vytvoriť metódy, ktoré môžu byť všeobecne aplikovateľné s čo najmenším množstvom úprav pri rôznych konfiguráciách systémov. Z dostupných riešení tejto úlohy vo všeobecnosti platí, že každý prístup je prísne špecifický pre konkrétne vybavenie a tým sa od iných riešení líši buď na základe použitého hardvéru, alebo použitých softvérových riešení a rozhraní. Je dôležité poznamenať, že pri proaktívnom riadení výrobných systémov, akýkoľvek proces prebiehajúci medzi zadaním príkazu na výrobu a spustením samotného procesu výroby by v ideálnom prípade mal prebiehať automatizovane. V prípade výskytu situácie vyžadujúcej si zásah operátora, musia byť procesy dostatočne intuitívne a rýchle z dôvodu dodržania plynulosti výroby.

3.1 Systém objednávok

Výrobný a MES systém, pre ktoré budú popisované navrhnuté metódy v tejto kapitole, patria do skupiny systémov malosériovej výroby (Job Shop System). Charakteristická vlastnosť tohto typu systémov je, že výroba prebiehajúca v týchto systémoch je založená na množstve objednávok definovaných na strane používateľa alebo operátora riadiaceho daný systém. Objednávky sú zadávané pomocou HMI alebo pomocou príslušného rozhrania v počítači operátora.

Výrobný systém AFB Factory, pre ktorý boli navrhnuté a testované všetky metódy pracuje na princípe spracovania výrobkov v podobe fľašiek. Spôsob spracovania a tým aj postupnosť operácií vykonávaných na jednotlivých fľaškách prichádzajúcich do systému sa líši na základe objednávok prichádzajúcich z AVEVA MES. Každá objednávka definovaná v MES systéme má presne špecifikovanú podobu. Objednávky sú definované v dávkach s veľkosťou 6 fľašiek, pričom zloženie každej dávky môže byť ľubovoľné. Možnosti ponúkané pri vytváraní výrobných objednávok zahŕňajú výber z dvoch typov náplne: granulát alebo tekutina. Taktiež je možný výber z troch úrovni náplne: 0%, 50% a 100%. Rozhranie AVEVA MES je vytvorené pomocou softvéru InTouch a obsahuje viacero obrazoviek obsahujúcich dáta priamo z výrobného systému alebo databázy MES systému. Medzi tieto zobrazenia patria napríklad: správa objednávok, sledovanie OEE, reporty, alarmy, sledovanie paliet v systéme a pod.

3.2 Objednávkový súbor

Na základe poznatkov získaných z analýzy výrobného systému AFB Factory a systému AVEVA MES bolo zistené, že vstupnými dátami do výrobného systému sú výrobné objednávky v podobe zloženia výrobných dávok. Pre tieto dáta je dôležité nájsť spôsob ako ich dostať do simulátora. Softvér Witness Horizon ponúka nástroje na načítanie dátového

STU

súboru obsahujúceho výrobné objednávky z ľubovoľného systému za predpokladu správneho naformátovania, aby bolo možné vykonať ich priamu konverziu na jednotlivé prvky v prostredí simulátora. Tento súbor má presne definované požiadavky na jeho štruktúru, pričom je možné objednávky definovať dvomi rôznymi spôsobmi.

Prvý spôsob definície objednávkového súboru spočíva v rozbití výrobných dávok na elementárne prvky vstupujúce do simulačného modelu. Vďaka tomuto prístupu je možné

#Objednávky definované po kusoch pri veľkosti dávky = 6			
!Názov prvku	Veľkosť dávky	Čas príchodu	Atribúty
Výrobok_1_1	1	T ₁	atr_1, atr_2, ... atr_n
Výrobok_2_1	1	T ₂	atr_1, atr_2, ... atr_n
	...		
Výrobok_m_1	1	T ₆	atr_1, atr_2, ... atr_n
Výrobok_1_2	1	T ₇	atr_1, atr_2, ... atr_n
	...		
Výrobok_m_2	1	T ₁₂	atr_1, atr_2, ... atr_n
	...		
Výrobok_m_k	1	T _n	atr_1, atr_2, ... atr_n

Box 2 Štruktúra .par súboru pre individuálne definované dávky

presne definovať každý vstupujúci prvok a pridať jedinečné hodnoty atribútov. Rovnako ako pri inicializačných súboroch popísaných v predchádzajúcej kapitole je nutné, aby všetky názvy prvkov a atribútov boli identické s názvami simulačných prvkov v simulátore. Číselné hodnoty pri názvoch prvkov v nižšie uvedenej ukážke slúžia iba ako identifikátory poradových čísel výrobkov v rámci jednotlivých výrobných objednávok (1 až m) a poradových čísel objednávok. V reálnom súbore tieto čísla z funkčného hľadiska nie je nutné uvádzať, ale môžu byť použité ako identifikačné atribúty pre simulačné potreby (Obrázok 6 Příklad objednávkového súboru).

Čas príchodu prvkov vstupujúcich do výrobného systému (T) je taktiež možné definovať dvomi spôsobmi. Prvý spôsob spočíva v používaní absolútnych časových hodnôt, kde hodnota nula naznačuje začiatok simulácie. S takto definovanými časovými stopami musí platiť, že:

$$T_i \geq T_{i-1}$$

V prípade nedodržania tejto zásady prichádza k vzniku chybového stavu v simulátore. Z tohto dôvodu je častejšie používaným spôsobom pri väčšom počte vstupujúcich prvkov, ako aj spôsob používaný vo všetkých metódach popísaných v tejto dizertačnej práci je definovanie relatívnych časových hodnôt vzhľadom na predchádzajúci prvok. Relatívne časové hodnoty umožňujú jednoduchšiu kontrolu a úpravu súborov v prípade potreby. Nulové časy naznačujú simultánny výskyt viacerých prvkov naraz.

STU

Product Type	Batch Size	Arrival Time	Attributes
FlaskaF	1	20	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 1
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 1
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 1
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 1
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 1
FlaskaF	1	15	ICOM = 439 attr_obj = 50.00 Fluid = Tekutina Contents = 0.50 at_order_no = 1
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 2
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 2
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 2
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 2
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 2
FlaskaF	1	26	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 3
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 50.00 Fluid = Granulat Contents = 0.50 at_order_no = 3
FlaskaF	1	0	ICOM = 443 attr_obj = 100.00 Fluid = Granulat Contents = 1.00 at_order_no = 3
FlaskaT	1	0	ICOM = 437 attr_obj = 100.00 Fluid = Tekutina Contents = 1.00 at_order_no = 3
FlaskaT	1	0	ICOM = 437 attr_obj = 100.00 Fluid = Tekutina Contents = 1.00 at_order_no = 3
FlaskaT	1	0	ICOM = 437 attr_obj = 100.00 Fluid = Tekutina Contents = 1.00 at_order_no = 3

Obrázok 6 Príklad objednávkového súboru

Definovanie objednávok v podobe celých výrobných dávok je druhý spôsob tvorby objednávkových súborov pre simulátor Witness. Keďže každý riadok v tomto súbore predstavuje jednu celú dávku, z hľadiska používateľa je tento súbor jednoduchší na pochopenie. Nevýhodou tohto spôsobu tvorby objednávkových súborov je vytvorenie množstva identických prvkov stanoveného veľkosťou dávky (N) bez možnosti detailnejších úprav v rámci jednotlivých dávok.

#Objednávky definované po dávkach			
!Názov prvku	Veľkosť dávky	Čas príchodu	Atribúty
Výrobok_1	N	T	atr_1, atr_2, ... atr_n
Výrobok_2	N	T	atr_1, atr_2, ... atr_n
...	...	...	...
Výrobok_m	N	T	atr_1, atr_2, ... atr_n

Box 3 Štruktúra .par súboru pre hromadne definované dávky

V prípade simulátora Witness je pre takto definovaný súbor dôležité, aby bol uložený s príponou .par. Táto prípona signalizuje simulátoru, že sa jedná o súbor obsahujúci dáta o prvkoch vstupujúcich do modelu. Načítanie súboru je zabezpečené vložением príslušných funkčných prvkov v modeli.

3.3 Metódy dátovej integrácie

Pre potreby tejto dizertačnej práce bola navrhnutá a analyzovaná množina metód a stratégií dátovej integrácie na rôznych úrovniach. Pre každú z nižšie popísaných metód platí, že MES alebo dáta nachádzajúce sa v databázach tohto systému predstavujú základný stavebný kameň ich návrhu. Všetky navrhované metódy taktiež zdieľajú rovnaký cieľ – dostať dáta získané z MES systému do takej podoby, aby ich simulátor vedel spracovať. Metódy dátovej integrácie je možné rozdeliť do dvoch primárnych skupín: manuálne a automatizované. Manuálne metódy si vyžadujú prítomnosť operátora z dôvodu buď obsluhy vytváraných rozhraní alebo samotného prenosu dát medzi systémami. Do tejto skupiny navrhovaných metód patria:

- Definovanie a generovanie objednávok pomocou generátora,
- Tvorba objednávkových súborov pomocou AVEVA MES,

- Manuálne usporiadanie objednávok (MOR).

Skupina metód dátovej integrácie zaradených do skupiny automatizovaných metód sa vyznačuje schopnosťou vykonávať formátovanie, kovenrziu a prenos dát medzi systémami bez potreby zásahu zo strany operátora. Sem boli zaradené metódy:

- Automatizované usporiadanie objednávk (AOR).
- Načítanie objednávok priamo z databázového súboru,

Vyššie uvedené automatizované metódy boli navrhnuté a testované pre dva rôzne MES systémy: FESTO MES4 a AVEVA MES. Spôsoby využitia týchto MES systémov sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

3.4 Definovanie objednávok pomocou „generátora“

Hlavným nástrojom pre dátovú integráciu v rámci tejto metódy je softvér vytvorený v prostredí Matlab, ktorého zaužívaný názov - generátor objednávok - odzrkadľuje jeho primárnu funkcionality. Na základe prvotnej analýzy výstupných objednávkových dát zo systému MES a objednávkových dát požadovaných simulátorom Witness bola navrhnutá základná štruktúra rozhrania softvéru. Úlohou spomenutého softvéru je sprostredkovanie jednosmernej koverzie dát z výstupného MES formátu do formátu súboru .par popísaného v podkapitole 3.2.

V prostredí softvéru sa nachádza celkovo šesť jednoduchých funkčných prvkov, ktorých primárnou funkciou je manipulácia dát určitým spôsobom a tabuľka zobrazujúca výslednú podobu načítaných a upravených dát. Prvou kľúčovou funkciou tohto softvéru je načítanie základnej sady objednávok zo zdrojového Excel súboru pomocou tlačítka „Load Order“. Tento súbor obsahuje objednávkové dáta z MES systému, pričom na jeho tvorbu je potrebný zásah operátora, ktorý ručne vnáša požadované dáta do predformátovanej tabuľky. Z tejto tabuľky je potom možné takto načítané dáta zo softvéru po riadkoch vyexportovať priamo do formátu súboru .par.

Okrem načítania existujúcich objednávok, softvér poskytuje možnosť vygenerovať náhodné objednávky, pričom ich počet je možné zadávať pomocou posuvného prvku. Taktiež je možné presnejšie špecifikovať požiadavky na náhodne generované objednávky pomocou funkčných prvkov ovládajúcich interval príchodu prvkov do systému, ako aj simulovať poruchu v systéme, generovaním iba objednávok jedného typu. Ovládaci prvok pre interval príchodu prvkov ponúka tri možnosti, prvá možnosť „Short“ generuje objednávky s časom príchodu z intervalu <1,30> sekund, možnosť „Medium“ sú priradené hodnoty z intervalu <30,100> sekund, pričom posledná možnosť „Long“ dokáže generovať objednávky s časom príchodu prvkov medzi <100,200> sekund.

3.5 Manuálne usporiadanie objednávok - MOR

Metóda MOR bola navrhnutá ako kombinácia a rozšírenie predchádzajúcich dvoch metód používaných pri tvorbe a inicializácii simulačných modelov o ďalšie funkcionality zabezpečujúce vyšší stupeň dátovej integrácie ako aj automatizácie daného procesu. Cieľom

MOR je maximálne využiť pozitívne aspekty týchto metód, pričom bola vynaložená snaha o odstránenie čo najväčšieho množstva nevýhod, ktoré tieto metódy prinášali. MOR predstavuje prevažne automatizovaný proces dátovej integrácie medzi MES systémom a simulátorom, ktorého súčasťou je automatizovaná simulácia výrobného procesu so spracovanými objednávkovými dátami. Zásah operátora pri integrácii dát pomocou tejto metódy je možné minimalizovať na jednu komplexnú úlohu prípadnej úpravy a kontroly správnosti objednávkových dát v prostredí softvéru vytvoreného pre potreby MOR.

Metóda MOR je aplikovateľná v riadení výrobných procesov za predpokladu splnenia určitých podmienok. Prvou a najdôležitejšou podmienkou je existencia systému MES v procese výroby a možnosť prístupu k aktuálnym dátam, nakoľko všetky dáta musia byť čerpané priamo z výrobného procesu aby bola zaručená ich správnosť. Druhou podmienkou aplikovateľnosti metódy MOR je existencia dostatočného výpočtového vybavenia na spustenie simulácie a zabezpečenie behu ďalších výpočtovo málo náročných rozhraní. Celý systém zastrešovaný touto metódou obsahuje celkovo tri hlavné podsystémy, z ktorých prvé dva sú už spomenuté systémy MES a simulátor. Posledný z troch podsystémov je rozhranie pre manipuláciu s objednávkami (OMI), ktoré je rozšírením funkcionalít MES systému a používané operátorom na tvorbu požadovaných simulačných súborov alebo aj samotné spustenie simulácie priamo z prostredia softvéru.

3.6 Automatizované usporiadanie objednávok - AOR

Prvá z dvojice plne automatizovaných metód navrhnutých pre potreby tejto dizertačnej práce, AOR, je dátovo-integračná metóda, ktorá bola navrhnutá s cieľom využiť čo najväčšie množstvo pozitívnych aspektov predchádzajúcich metód. AOR je z konceptuálneho hľadiska plne automatizovaná metóda prenosu a integrácie dát medzi systémom MES a simulátorom, pričom komunikačné rozhrania boli navrhnuté tak, aby zásah operátora bol nutný iba pri prvotnom načítaní výrobných objednávok v MES a potom až pri zahájení výroby. Funkcionalita a cieľ, ktorý bolo snahou dosiahnuť prostredníctvom tejto metódy sú podobné ako pri metóde MOR, popísanej v podkapitole 3.5. Narozdiel od MOR, na konverziu dát a spustenie simulácie nie je nutné použitie rozhrania OMI, pretože všetky operácie vykonávané operátorom prostredníctvom tohto rozhrania sú presunuté buď do samotného MES systému alebo do simulátora, podľa charakteristiky danej úlohy. Spustenie simulácie je zabezpečené prostredníctvom jednoduchého „listener“ skriptu, ktorý monitoruje existenciu potrebných súborov a po splnení všetkých požiadaviek na stav týchto súborov je následne spustená simulácia.

3.6.1 Dôležité funkcie MES v koncepte AOR

Okrem všeobecných požiadaviek na funkcionalitu MES systémov, ako sú sledovanie a zber dát z výroby, generovanie OEE reportov, poskytovanie vizualizácie jednotlivých pracovísk a podobne, pre potreby metódy AOR sú z hľadiska schopnosti implementovať a aplikovať danú metódu v procese výroby dôležité aj ďalšie rozšírené funkcie. Prvou dôležitou požiadavkou je schopnosť správy a vizálnej interpretácie prichádzajúcich objednávok, čím

STU

je umožnený prístup a zásah operátora do celkového behu vyrobeného procesu. Táto funkcionálnosť hrá kľúčovú rolu na začiatku a na konci dátovo-integračného cyklu nakoľko je v týchto krokoch dôležité odsúhlasenie aktuálneho stavu a konečných úprav vykonaných simulátorom zo strany operátora.

Vývojové prostredie alebo rozhranie na implementáciu používateľských skriptov nachádzajúce sa priamo v MES alebo v softvéri bezprostredne prepojenom s daným MES systémom je druhá kľúčová funkcionálnosť, ktorú musí tento systém zabezpečovať. Z hľadiska automatizácie dátovo-integračného procesu je možnosť implementovať a upravovať používateľské skripty nevyhnutnou podmienkou aplikovateľnosti tejto metódy, nakoľko sú objednávkové a výrobné dáta súvisiace s veľkou časťou výrobných zariadení umiestnených vo výrobnom systéme zberané priamo do databázy MES systému. Z databázy je následne čerpanie týchto dát sprostredkované pomocou systémových premenných a atribútov, čím je uľahčený proces a čas vynaložený na extrakciu týchto dát. Dáta čerpané priamo z databázy MES systému sú používané na tvorbu štyroch typov súborov, ktoré sú následne posúvané do simulátora ako vstupné a inicializačné dáta. Medzi tieto súbory patria:

- inicializačný súbor (.sta; 2.5) – obsahujúci aktuálny stav výrobného systému z pohľadu umiestnenia diskretných prvkov a stavu ich rozpracovanosti na jednotlivých pracoviskách,
- výrobné objednávky a rozvrh výroby (.txt a .par; 3.2) – súbory obsahujúce výstup z tabuľky výrobných objednávok (zloženie jednotlivých paliet, veľkosť dávok, poradie výroby),
- definícia a úprava logiky modelu (.wcl) – súbor obsahujúci presnú definíciu jednotlivých pracovísk (vstupy, výstupy, úrovne surovín v nádržiach), pri ktorých bežne dochádza k zmene v procese výroby.

V MES systéme AVEVA, ktorý bol zvolený ako východiskový pre potreby tejto dizertačnej práce, je skriptovacím jazykom už spomínaný QuickScript.NET. Tento jazyk poskytuje všetky základné nástroje na tvorbu zvolených súborov, ktoré sú vytvárané paralelne s načítaním objednávkových dát do grafického rozhrania pre správu objednávok v MES systéme.

V poradí tretia funkcionálnosť MES systému vyplývajúca z požiadaviek na automatizovanú výmenu dát medzi dvomi zvolenými systémami je schopnosť načítať dáta z externého súboru (.txt alebo .csv) vytvoreného simulátorom a aktualizovať dáta načítané v grafickom rozhraní MES systému. Systém musí byť schopný umožniť tvorbu spúšťačov pre systémovú udalosť výskytu súboru s presne špecifikovaným názvom a formátom vo zvolenom adresári na lokálnej sieti a automaticky ho prečítať, prípadne zobrazíť operátorovi informáciu o výskyte tohto súboru a umožniť automatizovanú náhradu načítaných dát.

Všetky vyššie uvedené funkcie a udalosti, vrátane dokončenia procesu simulácie sa musia vykonať pred zahájením výroby vo fyzickom systéme. Posledná požiadavka vrámci AOR, ktorú je ale možné zaradiť medzi všeobecné požiadavky kladené na MES systémy, je

spustenie výroby na základe dát nachádzajúcich sa v tabuľke zobrazenej operátorovi, namiesto dát už vopred uložených v databáze systému.

3.6.2 Úloha simulátora v koncepte AOR

Prvým dôležitým krokom pri použití simulátora v rámci metódy AOR je úprava simulačného modelu tak, aby bol schopný automaticky spracovávať vstupné dáta, bez potreby zásahu operátora a tak, aby čiastočne plnil úlohu OMI použitého v metóde MOR. Tieto úpravy modelu spočívajú v návrhu a implementácii algoritmov špecializovaných na zmenu a prispôsobenie poradia dávok vo vstupujúcich objednávkach tak, aby sa tok jednotlivých typov výrobkov dostal čo najbližšie k rovnovážnemu stavu. Za účelom realizácie tohto prístupu k úprave vstupných dát boli navrhnuté dva algoritmy, ktoré sa líšia v spôsobe riešenia danej úlohy. Použitie nižšie uvedených algoritmov nadobúda zmysel iba pri množstevne vyvážených objednávkach. V prípade, že navrhované algoritmy identifikujú objednávku s veľkým rozdielom v množstve jednotlivých typov výrobkov (napr. granulát: 10ks; kvapalina: 2ks), existuje možnosť okamžitého zahájenia simulácie s pôvodnými dátami bez úpravy pomocou ktoréhokoľvek algoritmu. Výstupom z nasledovných dvoch algoritmov sú upravené vstupné dáta prichádzajúce z MES systému. Tieto dáta sú používané iba interne v procese simulácie na základe daných parametrov a nie sú zobrazované používateľovi, pričom výsledný súbor odosielaný späť do MES systému je generovaný až po dokončení celého simulačného behu.

Algoritmus rozbitia zhlukov rovnakých typov dávok je prvý algoritmus navrhnutý za účelom úpravy objednávkových dát. Tento algoritmus spočíva v identifikácii najväčšieho zhluku dávok rovnakého typu pri každej jeho iterácii a následný presun jednej dávky na koniec objednávky, čím je po zbehnutí celého algoritmu zaručené striedavé radenie výrobkov a maximalizácia využitia všetkých strojov vo výrobnom systéme spolu s minimalizáciou časov čakania na výrobky.

Dávky v objednávkach prichádzajúce z MES systému môžu byť heterogénneho typu, čo znamená, že v jednej dávke sa nachádzajú výrobky rôznych druhov v určitom pomere. Dávky s prevažným počtom výrobkov jedného druhu sú označené ako dávka daného typu a v procese usporiadania je s nimi manipulované rovnako ako s dávkami s homogénnym zložením daného typu. V prípade, že sa v rámci dávky nachádzajú typy výrobkov v pomere 50/50, je dávka v procese usporiadania ignorovaná (Obrázok 7).

STU

Typ 1			Typ 0			Typ 2		
	Tekutina	Granulát		Tekutina	Granulát		Tekutina	Granulát
0%	0	0	0%	0	0	0%	0	0
50%	2	0	50%	3	0	50%	0	1
100%	4	0	100%	0	3	100%	0	5
SUM	6	0	SUM	3	3	SUM	0	6

	Tekutina	Granulát		Tekutina	Granulát		Tekutina	Granulát
0%	0	0	0%	0	0	0%	0	0
50%	1	2	50%	1	2	50%	0	1
100%	3	0	100%	2	1	100%	2	3
SUM	4	2	SUM	3	3	SUM	2	4

Obrázok 8 Ukážka možných typov objednávok

Druhý algoritmus zameraný na automatizované usporiadanie objednávkových dát v prostredí simulátora vyplýva z bodového ohodnotenia jednotlivých dávok v rámci objednávky. V procese usporiadania je každej dávke priradená váha, na základe ktorej sa ďalej algoritmus snaží danú objednávku upraviť. Úprava objednávok týmto spôsobom je primárne zameraná na rovnomerný tok surovín vo výrobnom systéme. Systém bodového ohodnotenia dávok v rámci objednávky je ilustrovaný na Obrázok 8.

Výstup z MES

0,1,4,0,1,0
0,3,3,0,0,0
0,2,1,0,0,3
0,0,5,0,0,1
0,1,2,0,0,3
0,3,1,0,0,2

Interpretované dáta

Granulát			Tekutina		
0%	50%	100%	0%	50%	100%
0	1	4	0	1	0
0	3	3	0	0	0
0	2	1	0	0	3
0	0	5	0	0	1
0	1	2	0	0	3
0	3	1	0	0	2

Transformácia hodnôt do bodového hodnotiaceho systému					
N%0	N%(+1)	N%(+2)	N%0	N%(+1)	N%(+2)
0	-1	-8	0	1	9
0	-3	-6	0	0	0
0	-2	-2	0	0	6
0	0	-10	0	0	2
0	-1	-4	0	0	6
0	-3	-2	0	0	8

Upravené dáta

Granulát			Tekutina		
0%	50%	100%	0%	50%	100%
0	4	3	0	0	0
0	2	1	0	0	3
0	1	4	0	1	0
0	1	2	0	0	3
0	0	5	0	0	1
0	3	1	0	0	2

Transformácia hodnôt do bodového hodnotiaceho systému					
N%0	N%(+1)	N%(+2)	N%0	N%(+1)	N%(+2)
0	-9	-6	0	0	-9
0	-2	-2	0	0	2
0	-1	-8	0	1	0
0	-1	-4	0	0	6
0	0	-10	0	0	2
0	-3	-2	0	0	4

Obrázok 7 Príklad bodového hodnotenia objednávky v simulátore

Po pridelení bodového hodnotenia ku každej dávke v objednávke sú následne v procese usporiadania dávky radené striedavo medzi najnižšou dostupnou hodnotou a najvyššou hodnotou. Týmto spôsobom je možné docieľiť minimalizáciu časov prestoja surovín v jednotlivých nádržiach ako aj vytvoriť plynulý tok výrobkov s minimalizovaným rizikom výskytu nedostatku jedného z typov surovín, ktorý môže byť zapríčinený nadmernou výrobou jedného typu výrobku.

4 SIMULAČNÉ EXPERIMENTY A VALIDAČNÉ TESTY

V tejto kapitole sú popísané vykonávané experimenty so simulačným modelom, za účelom identifikácie problémových častí východiskového výrobného systému. Na základe

výsledkov z týchto experimentov boli navrhované ďalšie metódy zamerané na získavanie a integráciu dát potrebných pre simuláciu výrobného procesu. Keďže sa jedná o plne deterministický výrobný systém, v ktorom jediným náhodným parametrom je zloženie vstupujúcich objednávok, v porovnávacích experimentoch boli výsledky pre identické zloženie objednávok vždy rovnaké. V druhej časti tejto kapitoly sú popísané validačné testy jednotlivých modulov implementovaných v rámci navrhovaných metód. Cieľom týchto modulov je dosiahnuť maximálny možný stupeň automatizácie v simulačnom procese a tým splniť základný cieľ tejto dizertačnej práce, proaktivitu v riadení výrobných systémov.

4.1 Sledovanie ukazovateľov výkonnosti výrobného systému (PI)

Pred návrhom samotných experimentov bolo po vytvorení simulačného modelu (príloha A) nutné stanoviť niekoľko ukazovateľov výkonnosti systému, ktoré budú svedčiť o schopnosti navrhnutého modelu spracovávať vstupné údaje, ako aj ich prípadné zmeny. Na úvod boli navrhnuté tri jednoduché matematické funkcie, z ktorých prvá sledovala počet vyrobených fľašiek v stanovenom časovom intervale. Táto funkcia (1) mala za úlohu sledovať počet fľašiek podľa objemu a typu náplne, ako aj počet všetkých vyrobených fľašiek spolu. Hodnoty $i = (1,3)$ a $j = (1,3)$ predstavujú jednotlivé úrovne náplne vo výrobkoch, kde hodnota 1 predstavuje prázdnu fľašku, 2 je 50% náplň a 3 predstavuje úroveň náplne 100%.

$$Spolu = \sum_{i=1}^3 \sum \text{FľaškaVoda}_i + \sum_{j=1}^3 \sum \text{FľaškaGranulát}_j \quad (1)$$

Sledovanie tejto hodnoty bolo v simulátore zabezpečené pomocou počítadla nachádzajúceho sa vo výstupnom sklade systému. Ďalším ukazovateľom výkonnosti výrobného systému bolo využitie jednotlivých pracovísk a strojov v systéme (2). V simulačnom modeli sa nachádza celkovo 16 rôznych zariadení, na ktorých bolo potrebné sledovať mieru využitia v priebehu výrobného procesu. Ako pracoviská s aktívnym využitím možno chápať pracoviská nachádzajúce sa v stave aktívnej manipulácie s výrobkami. Sledovanie stavu aktívnej manipulácie s výrobkami bolo v simulačnom modeli zabezpečené použitím systémovej funkcie „*PUtil*“ a jej volaním v simulačnom prvku zodpovednom za výpočtové úlohy vo vnútri modelu.

$$\text{Využitie} = \frac{\sum_{i=1}^{16} \text{PUtil}(x_i)}{16} \quad (2)$$

Na získanie plnohodnotnej informácie o výkonnosti výrobného systému bolo nutné definovať aj tretiu funkciu, ktorej úlohou bolo sledovanie priemerného priebežného času stráveného jednotlivými fľaškami v systéme (3). V prípade jednotlivých výrobkov bolo sledovanie času spustené v okamihu ich prvého výskytu v systéme, resp. pri vstupe do vstupného skladu kde boli nakladané na vozíky a presúvané ďalej v systéme. Expedícia objednávky z výrobného systému predstavuje koncový bod sledovania času stráveného v systéme. Časové údaje boli sledované osobitne pre každý typ výrobku ako aj priemerne pre oba typy výrobkov.

$$\text{PriemernýČas} = \frac{\sum_{i=1}^X \text{AFlow}(\text{FľaškaVoda}_i) + \sum_{j=1}^Y \text{AFlow}(\text{FľaškaGranulát}_j)}{2} \quad (3)$$

Sledovanie tejto hodnoty bolo zabezpečené systémovou funkciou simulátora - „*AFlow*“, ktorá bola spolu s funkciou „*PUtil*“ umiestnená do výpočtového prvku simulačného modelu.

Sledovanie časových ukazovateľov bolo zvolené ako hlavný ukazovateľ pri vyhodnocovaní všetkých experimentoch a validačných testoch implementovaných modulov popísaných v nasledujúcich podkapitolách.

4.2 Validácia simulačného modelu

Po dokončení digitálneho modelu nasledoval proces validácie, v ktorom bola testovaná schopnosť modelu napodobňovať operácie vykonávané v reálnom výrobnom systéme. Každý simulačný model, ktorý sa má stať digitálnym dvojčatom sa musí chovať identicky k fyzickému systému, ku ktorému bol navrhnutý. Na otestovanie tejto skutočnosti boli vytvorené testy s rôznymi sadami objednávok, ktoré boli zadávané ako do simulačného modelu, tak aj do reálneho výrobného systému. Tieto objednávky sa líšili v čase príchodu výrobkov a surovín do systému, v zložení výrobných dávok s presne definovaným počtom z dôvodu zachovania prehľadnosti experimentov. Sledované a porovnávané boli priemerné časy strávené výrobkami vo výrobnom systéme, celková doba výroby, počty úspešne vyrobených prvkov ale aj schopnosť modelu replikovať úzke miesto výrobného systému, nachádzajúce sa pri recyklačnej stanici, ktoré bolo identifikované už pri prvotnej analýze systému pri zvýšenej záťaži systému. Výsledky procesu validácie diskretných častí simulačných modelov vykazovali vysokú mieru zhody s výsledkami z reálneho systému. Najvyššia identifikovaná odchýlka vo výsledkoch bola vo výške 1,5% pri vstupe všetkých výrobných dávok do systému na začiatku simulácie (nulový interval príchodu).

Tabuľka 2 Výsledky validačného testu simulačného modelu

Interval príchodu [s]	Veľkosť objednávky (počet dávok)	Výrobný systém			Digitálny model		
		Počet vyr. fľašiek [ks]	Čas výroby [s]	Priem. čas 1 fľaška [s]	Počet vyr. fľašiek [ks]	Čas výroby [s]	Priem. čas 1 fľaška [s]
0	5	30	720	474	30	731	478
	10	60	1526	711	60	1515	722
	15	90	2420	970	90	2401	981
20 - 60	5	30	725	470	30	730	475
	10	60	1550	705	60	1535	716
	15	90	2428	955	90	2427	962
80 - 120	5	30	965	460	30	979	464
	10	60	1630	572	60	1636	575
	15	90	2462	688	90	2460	691
130 - 170	5	30	1148	448	30	1160	449
	10	60	1979	454	60	1982	456
	15	90	2675	459	90	2670	461

Výsledky validačného testu, kde zhoda vo výsledkoch je v najhoršom prípade vo výške 98,5%, potvrdzujú schopnosť digitálneho modelu verne replikovať procesy prebiehajúce vo

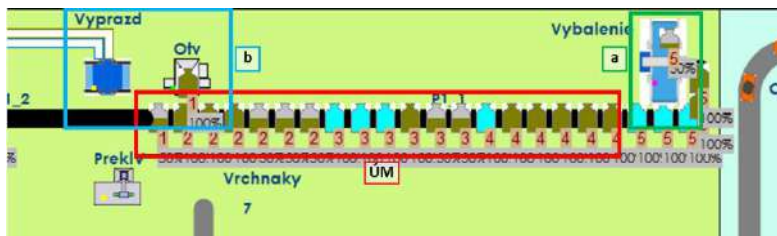
fyzickom výrobnom systéme. Taktiež je možné tvrdiť, že vytvorený digitálny model je možné použiť ako digitálne dvojča na potreby simulačných experimentov a validačných testov navrhovaných metód.

4.3 Simulačné experimenty

Proces verifikácie a validácie vytvoreného simulačného modelu bol podložený sériou simulačných experimentov, ktoré obsahovali rôzne vstupné dáta, pričom vstupným parametrom s najvyššou mierou variability bol interval príchodu objednávok do systému. Experimenty boli primárne zamerané na využitie strojov s cieľom identifikovať problémové miesta v systéme. Všetky odvodené experimenty boli založené na testovaní modelu s objednávkou obsahujúcou 15 dávok vo veľkosti 6 kusov, celkovo 90 fľašiek, ktoré musel simulačný model spracovať. Tieto objednávky boli generované pomocou softvéru popísaného v kapitole 3.4. Pri všetkých odvodených experimentoch bol simulačný model spúšťaný z rovnakého inicializačného súboru z dôvodu zjednodušenia interpretácie a vyhodnocovania výsledkov.

4.3.1 Prvý simulačný experiment

Úlohou prvého z troch simulačných experimentov zameraných na analýzu toku výrobkov vo výrobnom systéme bolo zistenie potenciálnych problémových miest. Vstupný parameter zistený ako hlavný zdroj vzniku týchto miest bola zvolená frekvencia príchodu objednávok do výrobného systému. Počas prvého experimentu bol časový interval medzi vstupmi jednotlivých dávok fľašiek do systému definovaný náhodne v rozmedzí 10 až 100 sekund. Správanie simulačného modelu bolo prísne sledované po celú dobu trvania experimentu, pričom ešte pred vyhodnotením výsledkov získaných z daného simulačného behu bolo identifikované úzke miesto vo výrobnom systéme (Obrázok 9).

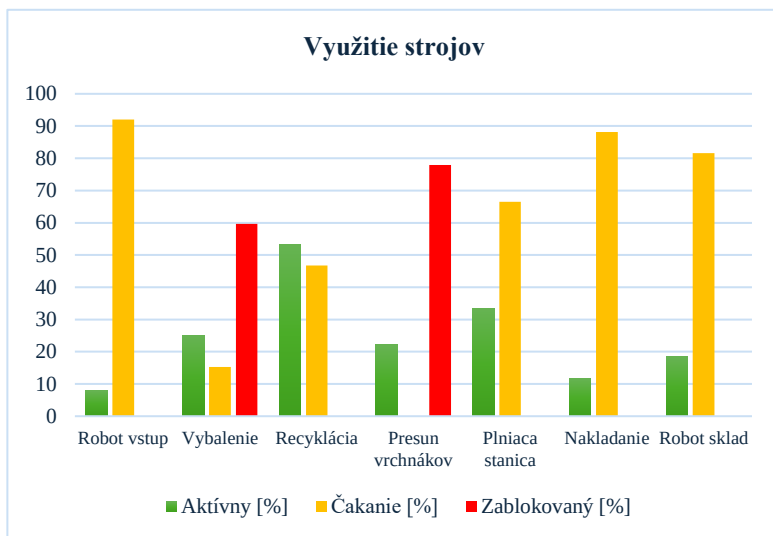


Obrázok 9 Identifikované úzke miesto; (a) vykladacia stanica; (b) recyklačná stanica; (UM) úzke miesto - problémový úsek

Problémovým miestom sa ukázal byť úsek medzi vybaľovacou a recyklačnou stanicou. Po analýze získaných dát bolo zistené, že recyklačná stanica pri 100% využití robotického ramena nie je schopná pri danej frekvencii príchodu fľašiek do systému vykonávať svoju činnosť dostatočnou rýchlosťou. Vďaka tejto skutočnosti bola aj priemerná doba výroby jedného produktu na alarmujúcej hodnote vo výške 957 sekund, pričom vypočítaná hodnota vrátane odhadovaných časov priebehu bola viac než o 50% nižšia.

Celková dĺžka výroby vyplývajúca zo simulácie bola 2467 sekund, resp. približne 41 minút. V priebehu simulácie bol okrem už spomenutých hodnôt sledovaný aj pomer času strávený

v troch vyčlenených stavoch na jednotlivých pracoviskách (Obrázok 10). Z nižšie uvedeného grafu je možné usúdiť, že v systéme existujú celkovo dve pracoviská, ktoré vykazujú nadpriemernu vysokú mieru blokovanosti: presun vrchnákov takmer 80% a vykladanie takmer 60%. Dôkladnejšou analýzou toku výrobkov a polovýrobkov v systéme bolo zistené, že príčinou vysokej miery blokovanosti na pracovisku, ktoré zabezpečuje presun vrchnákov v systéme, je nízka kapacita skladovacieho priestoru. V dôsledku tejto skutočnosti je potrebné aby toto pracovisko bolo dočasne obsluhované operátorom, počas aktívnej výroby.



Obrázok 10 Graf využitia pracovných staníc počas prvého experimentu

Druhým problémovým pracoviskom z hľadiska miery blokovanosti v systéme je vykladacia stanica. Zablokovaný stav je zapríčinený neschopnosťou recyklačnej stanice vykonávať potrebné úlohy dostatočnou rýchlosťou, čo má za následok vytváranie fronty fľašiek na dopravnom páse medzi vykladacou stanicou a recykláciou, ako aj v dopravnom podsysteme s vozíkmi prevážajúcimi jednotlivé výrobné dávky. Tento problém je možné odstrániť dvomi spôsobmi: znížiť frekvenciu príchodu objednávok do systému (softvérové riešenie), alebo vykonať zmeny vo výrobnom systéme formou pridania paralelnej recyklačnej stanice, čím sa zdvojnásobi kapacita tohto pracoviska (hardvérové riešenie). Všetky ďalšie postupy popísané v tejto dizertačnej práci boli založené na vyriešení nastoleného problému za pomoci softvérových metód a existujúcich nástrojov, nakoľko hardvérové riešenie je buď finančne niekoľko-násobne náročnejšie, alebo požadované zmeny z topologického hľadiska nie je možné vykonať.

Tabuľka 3 Výsledky prvého simulačného experimentu

Názov pracoviska	Aktívny [%]	Čakanie [%]	Zablokovaný [%]
Robot vstup	7,99	92,01	0,00
Vykladanie	25,01	15,32	59,67
Recyklácia	53,26	46,74	0,00
Presun vrchnákov	22,09	0,00	77,91
Plniaca stanica	33,51	66,49	0,00
Nakladanie	11,82	88,18	0,00
Robot sklad	18,44	81,56	0,00

Z Tabuľka 3 Výsledky prvého simulačného experimentu je taktiež možné usúdiť, že priemerná hodnota aktívneho využitia pracovísk vo výške 24,58% je príliš nízka, čo taktiež znamená, že väčšinu času pracovné stanice trávia v stave čakania. Toto je zapríčinené formou vykonávaných experimentov, nakoľko sa jednalo o jednu izolovanú objednávku prichádzajúcu do výrobného systému s nízkym množstvom rozpracovaných výrobkov. Tento experiment bol následne niekoľkokrát zopakovaný s variabilnými hodnotami v rámci definovaného rozsahu vstupných parametrov, pričom vo všetkých navrhnutých scenároch boli výsledky vo vysokej miere podobné pôvodným.

4.3.2 Posledný simulačný experiment

Počas posledného experimentu bol interval medzi príchodmi výrobných dávok do systému navýšený na konštantných 150 sekund. Zlepšenia spôsobené touto úpravou boli zrejme už počas samotného simulačného behu, v ktorom vo vizuálnej reprezentácii výrobného systému už neprichádzalo k výraznému hromadeniu flášiek pred recyklačným ani vozíkov pred vykladacím pracoviskom. Analýza výsledných dát tento predpoklad potvrdila, čo znamenalo, že úzke miesto pri recyklačnej stanici bolo takmer úplne odstránené a miera blokovanosti pracoviska vybalenia klesla na 1,25%.

Tabuľka 4 Výsledky posledného simulačného experimentu

Názov pracoviska	Aktívny [%]	Čakanie [%]	Zablokovaný [%]
Robot vstup	7,23	92,77	0,00
Vybalenie	32,93	65,82	1,25
Recyklácia	48,71	51,29	0,00
Presun vrchnákov	18,20	0,00	81,80
Plniaca stanica	38,92	61,08	0,00
Nakladanie	10,81	89,19	0,00

STU

Robot sklad	26,25	73,75	0,00
-------------	-------	-------	------

Z výsledkov posledného experimentu bolo taktiež zistené, že priemerná doba strávená fľaškami v systéme klesla na 450 sekund, čím sa priblížila k pôvodnej odhadovanej hodnote vo výške 442 sekund. Navýšenie intervalu vstupu dávok do systému na hodnotu 150 sekund malo aj negatívne účinky na celkový priebeh simulácie. Čas potrebný na spracovanie celej objednávky stúpol na 2684 sekundy (približne 45 minút), pričom bol zaznamenaný aj pokles v celkovom aktívnom využití pracovísk vo výške 26,15%.

4.4 Validáčn é testy pre metódu MOR

Navrhnuté validačné testy metódy slúžia ako dôkaz o funkčnosti a aplikovateľnosti navrhnutého konceptu metódy MOR ako aj odrazový kameň pri vývoji metódy AOR, ktorá vznikla za účelom automatizácie procesu dátovej integrácie medzi MES a simulátorom. Pri validačných testoch pre metódu MOR boli zvolené dva parametre, ktorých sledovanie malo poukázať na úspešnosť tejto metódy ako aj na potenciálne nedostatky. Ako prvý parameter bol zvolený čas nutný na prenos dát medzi MES a simulátorom, vrátane nutných rozhraní a práce s aplikáciou OMI. Druhý parameter bol binárneho charakteru, vďaka ktorému bola sledovaná schopnosť systému dokončiť danú objednávku bez vzniku nedostatku materiálu na naplnenie fliašiek. Za účelom urýchlenia procesu testovania boli použité emulované alebo už vopred vytvorené objednávkové dáta, vďaka ktorým sa v zložení jednotlivých objednávk mohli nachádzať aj rôzne umelo vytvorené extrém y.

Prvý parameter, ktorý bol predmetom validácie metódy MOR možno definovať v podobe rovnice nasledovne:

$$X = N * (O + e) + sim + \sum_{i=1}^k T_i \quad (4)$$

V Tabuľka 5 sú popísané jednotlivé premenné ako aj ich predpokladané hodnoty pre potreby validácie výsledkov s odvádzaných testov. Hodnota X je priamo závislá na počte dávok v sledovanej objednávke, pričom hodnota e predstavuje rozdiel medzi nameranou hodnotou X podľa rovnice (4) a ideálnym scenárom pre danú veľkosť objednávky (N) za predpokladu nulovej chybovosti operátora. Časové referenčné hodnoty boli získané testovaním jednotlivých modulov v izolovaných scenároch.

Tabuľka 5 Popis premenných a referenčné hodnoty pre rovnicu (4)

Premenná	Referenčná hodnota	Udávané v	Význam
X	-	[s]	dĺžka trvania simulácie vrátane úpravy dát pomocou OMI a prenosu dát medzi systémami
N	1 – 15	[ks]	počet dávok v objednávke
O	5	[s]	čas modifikácie jednej dávky
e	-	[s]	oneskorenie spôsobené ľudskou chybou
sim	3	[s]	dĺžka trvania simulácie pomocou .wcl

STU

T	1,5	[s]	čas prenosu dát medzi MES, OMI a simulátorom
k	3	[ks]	počet komunikačných rozhraní

Na sledovanie druhého validačného parametra boli použité dáta o úrovniach surovín v kľúčových nádržiach výrobného systému. Nižšie uvedený príklad obsahuje pseudokód obsahujúci jednoduchý algoritmus na vyhodnotenie schopnosti úspešne dokončiť objednávku.

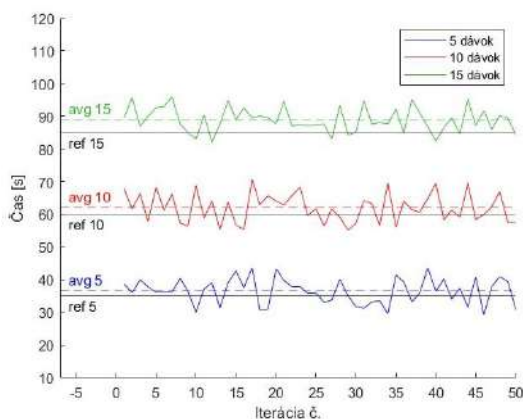
```

V1 = úroveň_nádrž1 + úroveň_nádrž2 + úroveň_nádrž3 + úroveň_nádrž_plnička
V2 = objem_surovin_v_potrubiciach
R = požadovaný_objem
IF V1 > R OR V1 > R*0,85 AND V2 > R*0,15
    možná_výroba = true;
ELSE
    možná_výroba = false;
ENDIF

```

Box 6 Pseudokód na vyhodnotenie schopnosti úspešnej výroby - granulát

Z analýzy a sledovania procesu výroby v systéme AFB vyplynulo, že úroveň dostupných surovín v nádržiach musí byť minimálne 85% z požadovanej hodnoty v prichádzajúcej objednávke, pričom zvyšných 15% tohto objemu môže byť vykryté surovinami aktuálne sa nachádzajúcimi v procese predspracovania. Tieto hodnoty sú odzrkadlené v podmienke IF.



Obrázok 11 Graf porovnania priemerných a referenčných hodnôt časového parametra

Počas simulácie bola úroveň surovín v nádržiach na plniacom pracovisku priebežne sledovaná pre prípad, že úroveň dostupných surovín klesne pod hodnotu 10% celkového objemu. V týchto prípadoch bola simulácia pozastavená a vyhodnotená ako neúspešná.

Pre potreby validačných testov metódy MOR bolo navrhnutých 150 jedinečných iterácií vstupných objednávok, 50 pre každú z troch veľkostí objednávok: 5 dávok, 10 dávok a 15 dávok. Prítomnosť operátora bola nutná po dobu celého testovacieho z dôvodu obsluhy aplikácie OMI. Odchylky od referenčných hodnôt zobrazené na Obrázok 11 sú primárne zapríčinené ľudským faktorom z dôvodu nedostatku konzistencie alebo pozornosti počas manipulácie s OMI.

Z vyššie uvedeného grafu je možné vydedukovať, že čas potrebný na obojsmerný prenos dát medzi MES a simulátorom, úpravu dát a samotnú simuláciu zodpovedá predpokladanej lineárnej závislosti od počtu dávok v konkrétnej objednávke. Taktiež je možné zaznamenať lineárny nárast vo veľkosti časovej odchylky spôsobenej ľudskou chybou pri vyššom počte dávok. Pri menších objednávkach je táto odchylka zanedbateľná, ale pri objednávkach s niekoľkonásobne väčším obsahom dávok by mohla ľudská chybovosť začať spôsobovať zásadne oneskorenia vo výrobe.

4.5 Validačné testy pre metódu AOR

Validácia metódy AOR spočívala v testovaní a analýzy výsledkov získaných z procesu úpravy výrobných objednávok algoritmami navrhnutými v podobe modulov rozširujúcich funkcionality simulátora Witness. Počas validačných testov metódy AOR boli z dôvodu prehľadnejšej kontroly výsledkov a ich porovnania s očakávanými výsledkami oba navrhnuté algoritmy implementované v izolovanom prostredí v podobe Matlab skriptu. Následne boli tieto dva algoritmy implementované aj v prostredí simulátora a bol sledovaný ich vplyv na dĺžku trvania simulácie, kde pri veľkosti objednávok (5, 10, 15 dávok) vytváraných pre daný výrobný systém, nepredstavovali žiadne navýšenie v sledovaných parametroch.

4.5.1 Rozbitie zhlukov dávok

Algoritmus rozbitia zhlukov rovnakých typov dávok v objednávke (RZD) bol prvým testovaným algoritmom, pri ktorom bola testovaná schopnosť identifikácie typu dávky, identifikácia zhlukov dávok a usporiadanie daných dávok do podoby špecifikovanej na začiatku simulácie (maximálny počet rovnakých typov dávok v jednom zhluku). Identifikácia typov dávok je založená na presnom formáte dát získaných z MES systému, kde každá hodnota v riadku má špecifický význam, reprezentujúci úroveň náplne fľašky určitého druhu. Presný formát týchto dát a ich interpretácia je popísaná v kapitole 3.6.2. Keďže sa pri identifikácii typu objednávky jedná o použitie jednoduchých počítadiel, algoritmus správne priradil označenie typu ku každej dávke (Obrázok 12).

STU

Zloženie výrobných objednávok					
Granulát			Tekutina		
0%	50%	100%	0%	50%	100%
0	2	2	0	1	1
0	1	3	0	0	2
0	4	1	0	1	0
0	1	5	0	0	0
0	2	3	0	0	1
0	1	1	0	2	2
0	0	1	0	3	2
0	1	0	0	1	4
0	2	0	0	1	3
0	1	4	0	1	0
0	2	3	0	0	1
0	0	0	0	0	6
0	0	6	0	0	0
0	1	4	0	1	0
0	2	1	0	1	2

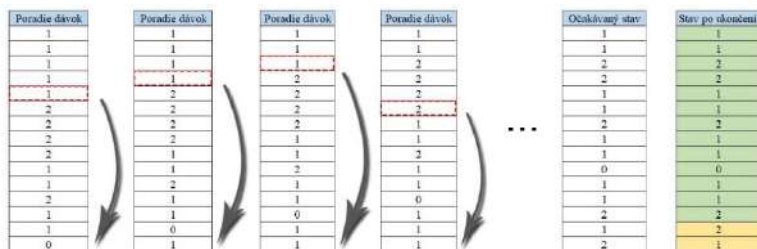
Počty výrobkov	
Granulát	Tekutina
4	2
4	2
5	1
6	0
5	1
2	4
1	5
1	5
2	4
5	1
5	1
0	6
6	0
5	1
3	3

Očakávaný stav
1
1
1
1
1
2
2
2
2
2
1
1
1
2
1
1
0

Vyhodnotený algoritmom
1
1
1
1
1
2
2
2
2
2
1
1
1
2
1
1
0

Obrázok 13 Vyhodnotenie dávok vo výrobných objednávkach algoritmom RZD

V druhej časti algoritmu RZD bolo potrebné špecifikovať veľkosť zhlukov, ktoré musia byť rozbité a tým pádom jednotlivé dávky postupne presúvané na koniec objednávky. V uvedenom príklade bola počas testovania použitá maximálna veľkosť zhlukov v počte 2. Zároveň bol vytvorený referenčný stav, s ktorým boli výsledky práce algoritmu porovnávané. Po analýze výsledkov bolo zistené, že sa upravená objednávka líšila v dvoch položkách od referenčného stavu (Obrázok 13). Napriek tomuto zisteniu nebola porušená základná požiadavka na maximálny počet dávok v jednom zhluku a vďaka tomu bolo možné daný validačný test považovať za úspešný.



Obrázok 12 Priebeh úpravy objednávky pomocou algoritmu RZD

Pre algoritmus RZD bol navrhnutý ešte jeden test, v ktorom vstupná objednávka predstavovala extrém z pohľadu usporiadania. V tejto objednávke bolo prvých sedem objednávok typu „1“, a zvyšok bol typu „2“. Na dosiahnutie usporiadania s maximálnou veľkosťou zhlukov dávok v počte 2 (podobné očakávanému stavu na Obrázok 13) bolo nutné prispôbiť maximálny počet opakovaní cyklu FOR na $2 \cdot N$ (kde N je počet dávok v objednávke), z pôvodných N , nakoľko v priebehu úpravy opakovane vznikali menšie zhluky.

STU

4.5.2 Bodové ohodnotenie dávok

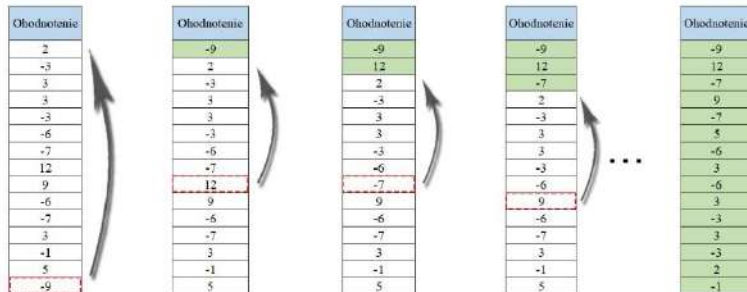
Druhý algoritmus navrhnutý pre metódu AOR založený na bodovom ohodnotení dávok vo výrobnjej objednávke (BOD) bol testovaný rovnakým spôsobom ako algoritmus RZD. V prípade algoritmu BOD sa jedná o komplexnejší spôsob identifikácie a vyhodnocovania jednotlivých dávok a preto bolo nutné vytvoriť transformačnú tabuľku. Do tejto tabuľky boli v procese vyhodnocovania objednávky algoritmom umiestnené hodnoty korešpondujúce s hodnotami v pôvodnej objednávke, vynásobené príslušným koeficientom podľa významu a pozície danej hodnoty. Hodnoty reprezentujúce množstvo výrobkov obsahujúcich granulát boli násobené zápornými hodnotami, pričom množstvo výrobkov obsahujúcich tekutinu bolo násobené kladnými. V transformačnej tabuľke sa oproti pôvodnej nachádza nový stĺpec obsahujúci súčty hodnôt z jednotlivých riadkov, čo zároveň predstavuje aj bodové ohodnotenie danej dávky (Obrázok 14).

Pôvodná objednávka					
Granulát			Tekutina		
0%	50%	100%	0%	50%	100%
0	2	1	0	0	3
1	0	3	0	1	1
0	3	0	0	0	3
0	1	1	0	2	2
0	2	2	0	1	1
0	0	4	0	2	0
0	5	1	0	0	0
0	0	0	0	0	6
0	0	0	0	3	3
1	0	4	0	0	1
0	2	3	0	1	0
0	0	1	0	5	0
0	3	1	0	0	2
0	1	1	0	0	4
0	0	5	0	1	0

Transformačná tabuľka					
Granulát			Tekutina		
X*0	X*(-1)	X*(-2)	X*0	X*1	X*2
0	-2	-2	0	0	6
0	0	-6	0	1	2
0	-3	0	0	0	6
0	-1	-2	0	2	4
0	-2	-4	0	1	2
0	0	-8	0	2	0
0	-5	-2	0	0	0
0	0	0	0	0	12
0	0	0	0	3	6
0	0	-8	0	0	2
0	-2	-6	0	1	0
0	0	-2	0	5	0
0	-3	-2	0	0	4
0	-1	-2	0	0	8
0	0	-10	0	1	0

Obrázok 14 Ukážka úplného vyhodnotenia jednej objednávky algoritmom BOD

Po úspešnom vyhodnotení objednávky, pokračovanie práce algoritmu spočívalo v postupnom presúvaní a zoradení dávok na základe ich ohodnotenia a to striedaním najnižšej a najvyššej zostávajúcej hodnoty. Po dokončení každej iterácie cyklu a úspešnom presunutí požadovanej hodnoty na správne miesto, presunutá hodnota bola do konca behu cyklu ignorovaná. Ukážka priebehu činnosti algoritmu BOD je zobrazená na Obrázok 15.



Obrázok 15 Ukážka priebehu práce algoritmu BOD

Po ukončení úpravy objednávky, usporiadanie dávok vo výrobnjej objednávke zodpovedalo očakávanému stavu, čo naznačilo, že algoritmus je vhodne navrhnutý a funguje presne podľa požiadaviek. Vďaka spôsobu spracovania každej objednávky, v prípade algoritmu BOD je počet opakovaní cyklu vždy N (počet dávok v objednávke) nezávisle od pôvodného zloženia a charakteristiky objednávky, narozdiel od algoritmu RZD, kde túto hodnotu bolo z dôvodu výskytu extrémnych prípadov potrebné navýšiť na dvojnásobok.

Následne boli oba algoritmy testované na časovú náročnosť spracovania jednotlivých objednávok. Z týchto testov vyplynulo, že ich vplyv na trvanie procesu úpravy dát a následnej simulácie objednávok s nízkym množstvom dávok, ktoré je výrobný systém AFB schopný reálne spracovať, je zanedbateľný.

5 ZHODNOTENIE NAVRHNUTÝCH METÓD A ICH APLIKOVATELNOSTI

Táto kapitola je venovaná vyhodnoteniu všetkých metód navrhnutých pre potreby dátovej integrácie medzi MES systémom a simulátorom. Každá metóda taktiež obsahuje vyjadrenie k jej aplikovateľnosti z pohľadu dosiahnutia proaktivity v riadení výrobných systémov pomocou digitálneho dvojčata, v ktorej fázy simulácie je danú metódu vhodné použiť ako aj prípadné vylepšenia do budúcnosti.

5.1 Použitie „Generátora objednávok“ v tvorbe digitálnych dvojčat

Metóda tvorby výrobných objednávok pomocou aplikácie s názvom „Generátor objednávok“ popísaná v kapitole 3.4 bola navrhnutá pre potreby rýchlej verifikácie a validácie vytvorených simulačných modelov. Na použitie tejto metódy je nutná iba identifikácia formátu a obsahu výstupných dát z nadradeného MES systému. Najväčším prínosom tejto metódy je urýchlenie procesu verifikácie simulačných modelov a zistenie všeobecného vplyvu rôznych profilov vstupujúcich prvkov na celkový beh simulačného modelu. V Tabuľka 6 sú sumarizované výhody a nevýhody použitia tejto metódy.

Tabuľka 6 Výhody a nevýhody použitia metódy náhodného generovania objednávok

Výhody	Nevýhody
Rýchla tvorba objednávkových súborov	Nutné manuálne ovládanie
Možnosť simulovať poruchy systému	Absencia prepojenia s MES systémom
Rôzne časové profily objednávok	Náhodne generované objednávky

Vďaka jednoduchosti softvéru je možné danú metódu použiť aj na iné potreby než generovanie výrobných objednávok. Po minimálnych úpravách je aplikácia schopná vytvárať aj inicializačné súbory obsahujúce procesné dáta, ako sú napr. kapacita nádrží v systéme alebo operačné časy pracovísk. Na základe tejto skutočnosti je možné tvrdiť, že túto metódu je vhodné použiť vo fáze tvorby simulačných modelov alebo aj digitálnych dvojčat bez prítomnosti výrobného alebo nadradeného MES systému. Hlavnou nevýhodou tejto metódy je veľmi nízky potenciál na automatizáciu procesu, nakoľko hlavnou podmienkou jej aplikácie je prítomnosť operátora a aplikácia skúsenosti s výrobnými systémom pri tvorbe potrebných súborov.

5.2 Dátová integrácia pomocou MOR

Metóda dátovej integrácie, ktorá vznikla a bola navrhnutá ako priama odpoveď na identifikované nedostatky predchádzajúcich dvoch metód. MOR predstavuje kompletný koncept dátového toku z MES systému, cez sadu špecifikovaných rozhraní, simulátor a návrat modifikovaných objednávkových dát späť do MES. V navrhnujej podobe je daná metóda úzko špecializovaná na úpravu objednávkových dát, pričom nie je vylúčená ani možnosť integrácie iných procesných dát, nakoľko rozhranie OMI, ktoré je stredobodom celej metódy, obsahuje nástroje na tvorbu všeobecných simulačných súborov s definíciou jednotlivých pracovísk. Špecializácia nástrojov použitých v tejto metóde za účelom sledovania a dosiahnutia iných výrobných cieľov si vyžaduje komplexnú úpravu všetkých subsystémov vytvárajúcich súbory kolujúce v dátovom toku v akejkoľvek forme ako aj tvorbu nových funkcií alternatívneho rozhrania aplikácie OMI.

Tabuľka 7 Výhody a nevýhody integrácie dát pomocou metódy MOR

Výhody	Nevýhody
Kompletný obojsmerný dátový tok	Operátor musí byť dobre zoznámený s výrobným systémom
Možnosť práce s reálnymi dátami s pridaným časovým údajom	MES neposkytuje nastavenie časového oneskorenia
Špecializované rozhranie na úpravu dát	Úprava môže trvať dlhší čas
Rozhrania sú funkčné online a offline	Nutnosť umiestnenia v jednej lokálnej sieti
Použiteľná vo fázy verifikácie a výroby	

Ako je možné vidieť v Tabuľka 7, spomenuté výhody pri použití metódy MOR nasvedčujú o možnostiach jej využitia nielen v aktívnom riadení výrobného systému ale aj v procese tvorby digitálnych dvojčat fyzických systémov. Keďže rozhranie OMI navrhnuté pre túto metódu ponúka možnosť úpravy všetkých dát obsiahnutých v objednávkových súboroch, efektivita tejto metódy je priamo závislá na rýchlosti práce operátora. Táto skutočnosť je odzrkadlená aj vo validačných testoch vykonaných pre túto metódu v kapitole 4.4. Najväčšia nevýhoda, ktorá pretrváva vo všetkých metódach je absencia možnosti úpravy časových oneskorení vstupu dávok v MES systéme. Na odstránenie tohto nedostatku je potrebný zásah a úprava samotného softvéru MES systému, čo môže predstavovať jeden z cieľov do budúcnosti. Aplikovateľnosť metódy MOR leží v kusovej výrobe, kde skúsenosti operátora môžu napomáhať v zabezpečení plynulosti toku výroby vďaka úprave poradia vyrábaných produktov.

5.3 Integrácia dát pomocou AOR

Koncept metódy AOR bol vytváraný paralelne s metódou MOR, ako jej alternatíva, nakoľko už v samých začiatkoch implementácie MOR bolo jasné, že priama závislosť na rýchlosti práce a znalostiach operátora pri úprave dát je kľúčovým faktorom efektivity danej metódy. Na odstránenie tejto závislosti bola úloha tvorby simulačných súborov presunutá do MES systému prostredníctvom používateľských skriptov. Vďaka tomuto kroku bol vyriešený problém prístupu k rôznym procesným dátam, ku ktorým nebolo možné priamo pristupovať

z prostredia aplikácie OMI. Nutná prítomnosť skúseného operátora v procese úpravy objednávok bola v koncepte metódy AOR vyriešená presunutím celého procesu do prostredia simulátora. Počas simulácie je možné použiť jeden z dvoch navrhnutých typov algoritmov, ktoré majú za úlohu upraviť prichádzajúcu objednávku podľa zvolených kritérií. Tieto kritéria sú: vyváženie toku výrobkov v systéme (RZD) a vyváženie toku surovín (BOD). Algoritmus BOD po vykonaných validačných testoch vykázal schopnosť aplikovateľnosti na širšiu škálu scenárov a lepšie zvládol extrémne prípady zloženia objednávok.

Tabuľka 8 Výhody a nevýhody použitia metódy AOR

Výhody	Nevýhody
Úplne automatizovaný obojsmerný dátový tok	Operátor môže objednávku kontrolovať až po ukončení procesu simulácie
Všetky nutné súbory vytvárané priamo v MES	MES neposkytuje nastavenie časového oneskorenia
Úpravu dát vykonáva samotný simulátor	Nutnosť umiestnenia v jednej lokálnej sieti

Odstránenie prítomnosti operátora v procese rozhodovania a úpravy objednávkových dát predstavuje veľkú výhodu použitia tejto metódy pri dátovej integrácii medzi MES a simulátorom. Toto znamená, že metódu AOR je možné aplikovať v prostredí, kde sa operátori pri výrobnom systéme často sriedajú alebo majú menší prehľad o prebiehajúcom procese. Negatívnym vedľajším efektom tohto prístupu je absencia možnosti priameho odsúhlasenia prichádzajúcej objednávky a okamžité zahájenie procesu výroby priamo v MES. Tento nedostatok je možné odstrániť pri ďalšom iterovaní a konečnej implementácii tejto metódy.

5.4 Zhodnotenie simulačných experimentov a validačných testov

Procesu vyhodnocovania účinnosti výrobného systému pomocou simulačných experimentov predchádzala validácia simulačného modelu. Referenčným bodom pre výsledky zo simulácie boli výsledky z výroby vo fyzickom systéme pri spracovaní identických objednávok. Proces validácie simulačného modelu vykázal mieru zhody 98,5% vo výsledkoch medzi dvomi systémami, vďaka ktorým bolo možné daný model považovať za digitálne dvojča východiskového výrobného systému.

Výsledky prvého simulačného experimentu potvrdili existenciu úzkeho miesta v systéme pri stanici recyklujúcej suroviny zo vstupných fľašiek. Za účelom odstránenia tohto problému bolo možné aplikovať dve rôzne riešenia. Prvé riešenie je popísané v druhom a treťom simulačnom experimente (softvérové riešenie), kde interval vstupu výrobných dávok do výrobného systému bol umelo navyšovaný, pričom toto úzke miesto bolo takmer úplne odstránené pri intervale vstupu v hodnote 150 sekúnd. Nevýhodou tohto prístupu bolo navýšenie doby potrebnej na dokončenie výroby celej objednávky. Druhé riešenie, ktoré je možné aplikovať za účelom odstránenia identifikovaného úzkeho miesta spočíva v technologickom zásahu do topológie výrobného systému a to pridaním paralelného pracoviska k recyklácii s identickou funkcionalitou. Toto riešenie si vyžaduje vynaloženie

veľkých finančných prostriedkov, pričom existuje pravdepodobnosť výskytu scenáru, v ktorom by sa toto úzke miesto presunulo do oblasti plniaceho pracoviska. Z tohto dôvodu boli navrhnuté ďalšie metódy, ktoré okrem problému dátovej integrácie medzi MES a simulátorom riešili problém úzkeho miesta na úrovni softvérových úprav.

Za účelom validácie metódy MOR bolo nutné navrhnuť rovnicu, na základe ktorej bol vyhodnocovaný priebeh procesu dátovej integrácie medzi MES a simulátorom. Táto rovnica pozostávala z empirických hodnôt, sledovaných a získaných v implementačnej fáze danej metódy. Kľúčovou hodnotou pri porovnaní výsledkov je časový údaj vykazujúci účinnosť operátora v sledovanom procese. Pri vyhodnotení výsledkov bola potvrdená predpokladaná lineárna závislosť trvania procesu dátovej integrácie, simulácie a prenosu dát medzi systémami od množstva dávok vo vnútri objednávky. Taktiež bola zistená aj lineárne sa navyšujúca priemerná odchylka od referenčných hodnôt s narastajúcim počtom dávok.

Predmetom posledných vykonaných validačných testov bolo sledovanie chovania a úspešnosti algoritmov navrhnutých pre metódu AOR. Oba algoritmy (RZD a BOD) boli podrobené testom, v ktorých bola v kontrolovanom prostredí sledovaná ich schopnosť upraviť prichádzajúce objednávky podľa definovaných pravidiel, pričom výsledky boli porovnávané s očakávanou formou výstupu. Algoritmus RZD ukázal menšie nedostatky pri úprave dát, ktoré v konečnom dôsledku nepredstavovali značnú odchylku od referenčného stavu a boli v limite očakávaných výsledkov. Výsledky validácie algoritmu BOD ukázali 100% zhodu s očakávanými výsledkami v každej fáze činnosti algoritmu aj v prípade extrémnych prípadov v zložení objednávok.

6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo vytvorenie vlastného konceptu použitia on-line simulácie s využitím digitálneho dvojčata, ktorého účelom je najmä proaktívna podpora riadenia výrobného systému. Zároveň ako súčasťou tohto konceptu boli vypracované pravidlá a obmedzenia pre konkrétny spôsob zberu údajov z IoT a z PLC ako aj ich prenos a spôsob uloženia v MES systéme. Vďaka úspešnej realizácii všetkých čiastkových úloh je možné tvrdiť, že hlavný cieľ dizertačnej práce bol naplnený.

Prínosy dizertačnej práce pre teóriu:

- Analýza a spracovanie teoretických východísk a poznatkov z oblasti tvorby DD pre výrobné systémy,
- Kategorizácia digitálnych modelov fyzických systémov podľa stupňa dátovej integrácie,
- Špecifikácia použiteľnosti dát nachádzajúcich sa v MES systémoch na základe ich dostupnosti a návrh vhodného spôsobu ich využitia v simulácii výrobného procesu za účelom dosiahnutia proaktivity v riadení výrobných procesov.

Prínosy dizertačnej práce pre prax:

- Zhrenutie teoretických poznatkov a aktuálne dostupných riešení o existujúcich implementáciach simulačných modelov a ich prepojení s výrobnými procesmi,
- Identifikácia nedostatkov v existujúcich riešeníach prepojenia výrobných systémov so simulačnými platformami,
- Definovanie požiadaviek kladených na MES systémy ako aj simulačné platformy pre potreby dátovej integrácie a sprostredkovania komunikácie medzi týmito systémami (bližšie popísané v kapitole 3.6.1),
- Návrh sady metód aplikovateľných v rôznych fázach prevádzky výroby alebo tvorby DD výrobných systémov so špecifikáciou formátu a obsahu dát a dátových súborov nutných na tvorbu verných kópií systémov a prebiehajúcich procesov,
- Použitie DD pre školenie pracovníkov priemyslu.

Prínosy dizertačnej práce pre vedu:

- Riešenie dizertačnej práce zamerané na proaktivitu v riadení výrobných systémov ako aj integráciu dát medzi systémami MES a simulačnou platformou potvrdilo nutnosť existencie ďalších komunikačných rozhraní z pohľadu novovzniknutého ISO 23247 štandardu, pričom v skúmanej literatúre tieto rozhrania neboli podrobené žiadnej, alebo iba veľmi obmedzenej analýze,
- Výsledky dizertačnej práce boli publikované v karentovaných časopisoch Q2 a prezentované na medzinárodných konferenciách,
- Výsledky dizertačnej práce vykazujú potenciál na pokračovanie vo výskume aplikovateľnosti metód dátovej integrácie pre potreby zefektívnenia výrobných procesov.

ZÁVER A ĎALŠIE SMEROVANIE VÝSKUMU

Problematika dosiahnutia proaktivity v riadení výrobných procesov najmä v malých a stredných podnikoch v súčasnosti stále predstavuje nedosiahnuteľný cieľ, nakoľko existujúce riešenia sú úzko špecializované a navrhnuté pre konkrétne výrobné systémy. Vďaka novovzniknutému štandardu ISO 23247 a kategorizácii digitálnych modelov je možné jednoduchšie definovať požiadavky na simuláciu procesov prebiehajúcich v sledovaných výrobných systémoch. Špecifikácia a triedenie dát potrebných na vytvorenie vernej kópie akéhokoľvek systému umožňuje jednoduchšie pochopenie procesu tvorby proaktívne zameraného DD, pričom taktiež napomáha v príprave potenciálnych kandidátov na proces priebežného získavania dát z výroby.

Priebeh procesu analýzy ľubovoľného systému je priamo závislý na zložitosti sledovaného systému ako aj procesov v ňom prebiehajúcich. Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim výsledky analýzy je dostupnosť dát. Vďaka rôznorodosti MES systémov používaných v praxi sa v individuálnych prípadoch mení aj dostupnosť konkrétnych typov dát ako aj spôsob ich získavania. V prípade dát zatriedených do skupiny nedostupných dát je dôležité zohľadniť faktor ľudskej chybovosti pri ich získavaní, pričom odchylka od reálnych hodnôt je priamo závislá na charakteristiky sledovanej veličiny.

Metódy dátovej integrácie medzi systémami MES a simulačnou platformou navrhnuté v tejto dizertačnej práci predstavujú riešenia aplikovateľné v už existujúcich MES systémoch pri splnení definovaných vstupných podmienok. Väčšina navrhnutých metód však počíta s prítomnosťou operátora v procese integrácie. Najmä metóda MOR, ktorú možno považovať za pilotné riešenie tejto dizertačnej práce, poukazuje na dôležitosť zásahu operátora, ktorý vďaka získaným skúsenostiam môže značným spôsobom ovplyvniť priebeh procesu spracovania dát a simulácie. S aktuálne dostupnými nástrojmi v praxi táto metóda predstavuje omnoho realistickejšie riešenie proaktivity než metóda AOR, ktorá je založená na kompromisoch, vyplývajúcich z náhrady ľudského faktora pri rozhodovaní presne definovanými algoritmami priamo v prostredí simulátora.

Predmetom budúceho výskumu je za účelom automatizácie procesu dátovej integrácie medzi dvomi dátovo odlišnými systémami použiť techniky umelej inteligencie, ktoré by umožnili primeranú náhradu operátora v danom procese. Tento spôsob úpravy dát má potenciál niekoľkonásobného urýchlenia procesu proaktívnej simulácie a pri správnom použití AI zaručuje podstatne nižšiu mieru chybovosti v porovnaní s výsledkami získanými pri validačných testoch doposiaľ navrhnutých metód. Z vykonaných analýz systémov popísaných v dizertačnej práci bol identifikovaný potenciál na ďalší posun v tvorbe simulačných modelov, ktorým by bolo možné vytvárať digitálne modely priamo v skriptovacom prostredí MES systémov. Z aktuálnych poznatkov o ponúkaných nástrojoch zvoleného simulátora je zatiaľ nejasný spôsob, možnosti a rozsah vykonávaných experimentov na tomto druhu simulačných modelov. Do budúca taktiež existuje potenciál rozšírenia navrhnutých metód a ich použitie na integráciu širšieho spektra výrobných dát, ako sú napr. operačné časy strojov.

VÝBER Z BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

BERGMANN, S., STELZER, S., STRAßBURGER, S. 2011. Initialization of simulation models using cmd. In Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), s. 2223–2234. IEEE.

BÍLIK, Peter. 2019. Digitální dvojče: Vůdčí technologie inteligentního průmyslu. [online]. [cit. 2022-02-08]. Dostupné na internetu: <https://www.vseoprumsly.cz/digitalizace/digitalniprototypovani/digitalni-dvojce-vudci-technologie-inteligentniho-prumyslu.html>

FRANK, A. G., DALENOGARE, L. S., AYALA, N. F. 2019. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics. doi:10.1016/j.ijpe.2019.01.004

HOTZ, I. 2007. “Ein Simulationsbasiertes Frühwarnsystem zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und planung in der Automobilindustrie” (A simulations based early warning system to support the operational production planning and scheduling in the automotive industry (in German)). Dozertáčná práca, Otto-von-Guericke University Magdeburg, [cit. 28-09-2023]. <http://diglib.unimagdeburg.de/Dissertationen/2007/inghotz.pdf>.

Lanner Group, Ltd. 2016. Learning WITNESS Book One Manufacturing Performance Edition. ISBN 978-1-291-47674-3.

Lanner Group, Ltd. 2016. Learning WITNESS Book Two Manufacturing Performance Edition. ISBN 978-1-291-47878-5.

MORHÁČ, M. 2016. Digitálne dvojča ako jeden zo základných konceptov Industry 4.0. AUTOMOTIVE ENGINEERING JOURNAL. 01/2016, s. 22-23.

POPJAKOVÁ, D., MINTÁLOVÁ, T. 2019. Priemysel 4.0, čo mu predchádzalo a čo ho charakterizuje – geografické súvislosti. Acta Geographica Universitatis Comenianae, 63(2), s. 173-192. ISSN 1338-6034.

VDI. 2000. “VDI 3633-1: Simulation of Systems in Materials Handling, Logistics and Production – Fundamentals.” VDI-Society Production and Logistics. Berlin: Beuth Verlag.

SISO. 2010. “Standard for: Core Manufacturing Simulation Data – UML Model.” Core Manufacturing Simulation Data Product Development Group, Simulation Interoperability Standards Organization. [cit. 28-09-2023].

QI, Q., TAO, F. 2018. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. IEEE Access 2018, 6, s. 3585–3593, doi:10.1109/ACCESS.2018.2793265.

ZHANG, Z., LI, X., WANG, X., CHENG, H. 2017. Decentralized Cyber-Physical Systems: A Paradigm for Cloud-Based Smart Factory of Industry 4.0. Cybersecurity for Industry 4.0, s. 127–171. doi:10.1007/978-3-319-50660-9_6

ZHONG, R. Y., XU, X., KLOTZ, E., NEWMAN, S. T. 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. Engineering, 3(5), s. 616 – 630. doi:10.1016/j.eng.2017.05.015

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

V2_01 BURČIAR, Fedor - VAŽAN, Pavel. Integration of a Digital Twin into Production Line Control. In *Cybernetics Perspectives in Systems : 11th Computer Science On-line Conference 2022, Vol. 3 (CSOC 2022)*. 1. vyd. Cham : Springer Nature, 2022, S. 302-311. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-09072-1. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-09073-8_26 ; SCOPUS: 2-s2.0-85135088018 ; WOS: 000892638700026. [Vnútrofakultná kategória: M].

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_02 BURČIAR, Fedor - KOVÁČ, Szabolcs - VAŽAN, Pavel. Proactive Control of Production Systems Using Proposed Data Integration Strategies. In ŠILHAVÝ, Petr. *Software Engineering Methods in Systems and Network Systems : Proceedings of 7th Computational Methods in Systems and Software 2023, Vol. 2*. 1. vyd. Cham : Springer Nature, 2024, S. 346-357. ISSN 2367-3370. ISBN 978-3-031-54812-3. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-54813-0_32 ; SCOPUS: 2-s2.0-85187793073. [Vnútrofakultná kategória: M].

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

V3_01 BURČIAR, Fedor - VAŽAN, Pavel - PULISOVÁ, Simona. Case study of building a digital twin for a production system. In Vedecké práce MTF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava. Vol. 29, no. 49 (2021), s. 51-58. ISSN 1336-1589. V databáze: INSPEC ; DOI: 10.2478/rput-2021-0024. [Vnútrofakultná kategória: M].

Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADF

V3_02 BURČIAR, Fedor - VAŽAN, Pavel - JUHÁSOVÁ, Bohuslava - JUHÁS, Martin. Methodical Approach to Proactivity Using a Digital Twin of Production Process. In *Electronics*. Vol. 12, iss. 15 (2023), s. 1-17. ISSN 2079-9292 (2022: 2.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.628 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/electronics12153335 ; SCOPUS: 2-s2.0-85167786277 ; WOS: 001046113500001 ; CC: 001046113500001. [Vnútrofakultná kategória: M].

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

Akceptované:

KOVÁČ, Szabolcs - STŘELEČ, Peter – HORÁK, Tibor – BURČIAR, Fedor – NEMLAHA, Eduard. Understanding Consumers Heat Load Demand via Wavelet Transformation for Daily Production Planning Purposes. V 13th Computer Science On-line Conference 2024. Dátum konania konferencie: 25. – 27. 4. 2024.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	2
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	2
Súčet		4