

**EKONOMICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
PODNIKOVĽHOSPODÁRSKA FAKULTA
SO SÍDLOM V KOŠICIACH**

Evidenčné číslo: 107002/D/2021/36069194041279748

**IMPLEMENTÁCIA OPTIMALIZAČNÝCH
METÓD PRI LOGISTICKÝCH OPERÁCIÁCH
VO VYBRANEJ SPOLOČNOSTI**

Dizertačná práca

**EKONOMICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
PODNIKOVĽHOSPODÁRSKA FAKULTA
SO SÍDLOM V KOŠICIACH**

**IMPLEMENTÁCIA OPTIMALIZAČNÝCH
METÓD PRI LOGISTICKÝCH OPERÁCIÁCH
VO VYBRANEJ SPOLOČNOSTI**

Dizertačná práca

Študijný program:	ekonomika a manažment podniku
Študijný odbor:	ekonómia a manažment
Školiace pracovisko:	Katedra kvantitatívnych metód
Vedúci záverečnej práce:	Dr. h. c. prof. RNDr. Michal Tkáč, CSc.

2021

Ing. Miroslava Horváthová

Zadanie záverečnej práce (vo vytlačenej verzii nahradit' stranou z AIS-u).

Čestné vyhlásenie

Čestne vyhlasujem, že záverečnú prácu som vypracovala samostatne a že som uviedla všetku použitú literatúru.

Dátum:

.....

(podpis študenta)

Podakovanie

Chcela by som sa poďakovať vedúcemu mojej záverečnej práce, ktorým je pán Dr. h. c. prof. RNDr. Michal Tkáč, CSc. za jeho čas, ochotu, cenné rady a podnety, ktoré mi počas môjho výskumu poskytol. Zároveň moja vďaka patrí zamestnancom spoločnosti, v ktorej výskum realizujem, za poskytnutie cenných dát a možnosti nahliadnuť do chodu interných procesov. V neposlednom rade sa chcem poďakovať všetkým, ktorí mi poskytli podporu a pomoc počas písania tejto práce a zároveň počas môjho celého doktorandského štúdia.

ABSTRAKT

HORVÁTHOVÁ, Miroslava: Implementácia optimalizačných metód pri logistických operáciách vo vybranej spoločnosti – Ekonomická univerzita v Bratislave. Podnikovohospodárska fakulta so sídlom v Košiciach; Katedra kvantitatívnych metód. – Vedúci záverečnej práce: Dr. h. c. prof. RNDr. Michal Tkáč, CSc. – Košice: PHF EU, 2021, počet strán 125. Cieľom tejto dizertačnej práce je tvorba systémového modelu na optimalizáciu logistických procesov vo vybranej spoločnosti, identifikácia logistických operácií a ich významu pre manažérske rozhodovanie na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky. Práca je rozdelená do piatich kapitol. Obsahuje 12 ilustrácií, 12 grafov, a 20 tabuliek.

Prvá kapitola obsahuje prehľad relevantnej dostupnej literatúry so zameraním na logistické operácie a ich význam pre manažérske rozhodovanie na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky. **V druhej kapitole** uvádzame hlavný cieľ a parciálne ciele tejto dizertačnej práce. Po štúdiu dostupnej literatúry realizujeme návrh systémového modelu na meranie a následné zvyšovanie výkonnosti v procese plánovania a rozvrhovania výroby. Navrhovaný model implementujeme v podmienkach vybraného výrobného podniku. Následne vyhodnocujeme mieru navrhovaných zlepšení a ich potenciálnych prínosov pre prax. **V tretej kapitole** prezentujeme metódy použité na dosiahnutie vytýčených cieľov. Používame prevažne logické metódy vedeckej práce, ukazovateľ OEE na meranie výkonnosti, metódu štíhleho manažmentu SMED a konštruktívne heuristické algoritmy na zvýšenie výkonnosti skúmaného procesu. **Štvrtá kapitola** obsahuje výsledky práce. **Výsledkom riešenia danej problematiky** je návrh modelu merania výkonnosti resp. optimalizácie procesu plánovania a rozvrhovania výroby, v súlade s DMAIC cyklom, čoho súčasťou je aj návrh metód na zvyšovanie výkonnosti daného procesu. Preukázali sme **dosiahnutie synergického efektu** pri použití navrhovaných metód, ktorých implementáciou by bolo možné dosiahnuť **zoštíhlenie procesu, zvýšenie dostupných kapacít** strojov pre prichádzajúce objednávky a vytvorenie priestoru pre prijatie objednávok väčšieho objemu či variability **bez potreby dodatočných investícií**. **Záverečná kapitola** je venovaná diskusii.

Kľúčové slová:

optimalizácia, logistika, riadenie dodávateľského reťazca

ABSTRACT

HORVÁTHOVÁ, Miroslava: Implementation of optimization methods in logistics operations of selected company – University of Economics in Bratislava. Faculty of Business Economy with seat in Košice; Department of Quantitative Methods. – Thesis supervisor: Dr. h. c. prof. RNDr. Michal Tkáč, CSc. – Košice: PHF EU, 2021, 125 p. The aim of this thesis is to design a system model to optimize logistics processes in a selected company, identification of logistics operations and their importance for managerial decision-making at the operational-tactical level of input logistics. The thesis is divided into five chapters. It contains 12 pictures, 12 graphs, and 20 tables.

The first chapter contains a review of relevant available literature with a focus on logistics operations and their importance for managerial decision-making at the operational-tactical level of input logistics. **In the second chapter** we present the main objective and partial objectives of this thesis. After studying the available literature, we design a system model for measuring and then increasing performance in the production planning and scheduling process. We implement the proposed model in the conditions of the selected manufacturing company. We then evaluate the extent of the proposed improvements and their potential benefits for practice. **In the third chapter**, we present the methods used to achieve the set objectives. We mainly use logical methods of scientific work, OEE indicator for performance measurement, SMED as a lean management method and constructive heuristic algorithms for increasing of the performance of the investigated process. **The fourth chapter** contains the results of our research. **Our results lie in** the design of a model for measuring performance or optimization of the production planning and scheduling process, in accordance with the DMAIC cycle, which also includes the proposal of methods to increase the performance of the process. We have demonstrated **the achievement of a synergistic effect** using the proposed methods, the implementation of which could **make the process leaner, increase the available machine capacity** for incoming orders and create space for accepting orders of larger volume or variability, **without the need for additional investment**. **The final chapter** is devoted to the discussion.

Key words:

optimization, logistics, supply chain management

OBSAH

Úvod	11
1 Súčasný stav riešenej problematiky doma a v zahraničí.....	13
1.1 <i>Logistika ako súčasť dodávateľsko-odberateľského reťazca</i>	13
1.2 <i>Plánovanie a rozvrhovanie výroby</i>	15
1.2.1 Výkonnosť procesu plánovania a rozvrhovania výroby	16
1.3 <i>Optimalizácia logistických operácií</i>	20
1.3.1 Metódy štíhleho riadenia.....	20
1.3.2 Metódy modelovania	23
1.3.3 Heuristické a metaheuristické metódy	30
1.4 <i>Problémy rozvrhovania výroby</i>	34
1.4.1 Problémy rozvrhovania výroby s paralelným usporiadaním strojov.....	38
2 Cieľ práce	41
3 Metodika práce a metódy skúmania	44
3.1 <i>Metóda SMED</i>	46
3.2 <i>Heuristické metódy</i>	47
3.3 <i>Charakteristika vybraného podniku</i>	58
4 Výsledky práce	65
4.1 <i>Vstupné dáta</i>	65
4.2 <i>Súčasná výkonnosť procesu</i>	68
4.3 <i>Analýza súčasnej výkonnosti</i>	71
4.4 <i>Navrhované zlepšenia</i>	71
4.5 <i>Výkonnosť procesu po navrhovaných zlepšeniach</i>	85
5 Diskusia.....	107
Záver	111
Bibliografické zdroje	114

Zoznam ilustrácií, zoznam grafov a zoznam tabuliek

Obr. 1 Ganttov diagram pre výrobný rozvrh	16
Obr. 2 Flow shop vs. Job shop problém	37
Obr. 3 DMAIC model zlepšovania procesu.....	44
Obr. 4 Fázy metódy SMED	47
Obr. 5 Metóda injekčného vstrekovania plastov	58
Obr. 6 Prestrek	60
Obr. 7 CNC stroje	61
Obr. 8 Formy.....	61
Obr. 9 Výlisky.....	61
Obr. 10 Forma a výlisok	62
Obr. 11 Výrobný rozvrh spoločnosti	63
Obr. 12 Tracker.....	64
Graf 1 Ideálny celkový výrobný čas pre jednotlivé stroje	79
Graf 2 Dostupnosť strojov	95
Graf 3 Priemerná dostupnosť strojov.....	96
Graf 4 OEE strojov	97
Graf 5 Priemerné OEE strojov	97
Graf 6 Makespan strojov M1 - M5	99
Graf 7 Makespan strojov M6 - M10	100
Graf 8 Makespan strojov M11 - M15	100
Graf 9 Makespan strojov M16 - M20	101
Graf 10 Makespan strojov M21 - M25	101
Graf 11 Porovnanie dostupnosti	106
Graf 12 Porovnanie OEE	106

Tab. 1 Dispečerské prioritné pravidlá.....	32
Tab. 2 Porovnanie problémov rozvrhovania.....	36
Tab. 3 Maticový zápis vstupných dát pre stroj M1.....	56
Tab. 4 Rozvrh na január 2019 - reálny stav	68
Tab. 5 OEE za január 2019 - reálny stav	70
Tab. 6 Súhrn výsledkov - reálny stav	71
Tab. 7 Prestavbové aktivity po zlepšení	72
Tab. 8 Porovnanie súhrnných prestavbových časov pred/po SMED.....	74
Tab. 9 Porovnanie prestavbových časov jednotlivých strojov pred/ po SMED	75
Tab. 10 Dĺžka ideálneho výrobného času pre jednotlivé stroje.....	78
Tab. 11 Optimálna dávka výrobkov pre vybrané stroje.....	80
Tab. 12 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => ST	85
Tab. 13 OEE za január 2019 - po algoritme SL => ST	87
Tab. 14 Súhrn výsledkov SL=>ST	88
Tab. 15 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => LT	89
Tab. 16 OEE za január 2019 - po algoritme SL => LT	91
Tab. 17 Súhrn výsledkov SL=>LT	92
Tab. 18 Súhrnné porovnanie dostupnosti a OEE	92
Tab. 19 Výsledky po uplatnení 3. & 4. variantu algoritmu	104
Tab. 20 Výsledky po uplatnení 5. & 6. variantu algoritmu	105

Úvod

Neustále zlepšovanie procesov v zmysle japonskej filozofie kaizen je nevyhnutnou podmienkou pre zabezpečenie udržateľnej konkurencieschopnosti podnikov. Implementácia učenia kaizen do podnikových procesov si vyžaduje zvýšené úsilie manažmentu, a to obzvlášť v súčasnosti, kedy je výrobný priemysel postavený pred mnohé výzvy. Globalizácia zintenzívnila konkurenčný boj medzi výrobnými podnikmi, čo prirodzene vyústilo do súčasného trendu, ktorým je snaha podnikov o zabezpečenie flexibility a customizácie pre svojich zákazníkov. V súvislosti s týmto trendom dochádza k produkcii v malých až stredných výrobných dávkach, a tým k zvýšeniu početnosti prestavbových aktivít vo výrobnom procese, ktoré predstavujú zdroj neefektívnosti a ktorých dôsledkom je nežiadúce zvyšovanie nákladov pre podnik. Súčasná pandemická situácia spojená s koronavírusom (COVID-19) ohrozila plynulý chod, ako aj existenciu mnohých výrobných podnikov vo svete, a podnietila ich k ešte intenzívnejšiemu hľadaniu spôsobov zlepšovania procesov za účelom perspektívnej úspory nákladov, a to bez potreby výrazných investícií do ľudských zdrojov, strojového vybavenia či informačno – komunikačných technológií. Možno predpokladať, že meranie výkonnosti procesov na základe stanovených ukazovateľov a ich následné zlepšovanie pomocou metód štíhleho manažmentu, či optimalizácie s využitím heuristických metód, je súčasťou know how väčšiny úspešných manažérov. Výzvou však často býva nájdenie vhodných prístupov pre systematické implementovanie týchto metód do praxe bez potreby výrazných investícií.

V rámci tejto práce sa zameriavame na meranie a zvyšovanie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby, v ktorom zohrávajú významnú úlohu stroje a ich dostupnosť. Zvýšením dostupnosti strojov, respektíve využitím dostupných kapacít strojov čo najefektívnejšie, je možné dosiahnuť úsporu nákladov, zvýšenie výkonnosti celého procesu a zároveň vytvoriť priestor pre prijatie ďalších výrobných objednávok. Na mieru dostupnosti jednotlivých strojov má priamy vplyv aj počet prestavbových aktivít realizovaných na daných strojoch v rámci výrobného procesu, respektíve dĺžka prestavbových časov. Zvýšenie dostupnosti resp. efektívnejšie využitie dostupných kapacít výrobných zariadení v rámci tejto štúdie dosahujeme prostredníctvom redukcie počtu prestavbových aktivít, redukcie času venovaného aktivitám súvisiacim s prestavbou výroby, ako aj návrhov pre efektívnejšie zostavenie výrobného rozvrhu. Za účelom redukcie počtu prestavbových aktivít neprinášajúcich v procese hodnotu využívame v tejto štúdii metódu SMED (angl.

„Single Minute Exchange of Dies“ t. j. „Výmena foriem za krátky čas“), ktorá patrí medzi metódy štíhleho manažmentu. Prioritne zabezpečujeme zoštíhlenie procesu, na ktoré následne nadväzujeme zvyšovaním jeho výkonnosti s využitím ďalších metód. Za účelom redukcie času venovaného prestavbovým aktivitám uplatňujeme myšlienku „súhrnnej výroby“. Efektívnejšie zostavenie výrobného rozvrhu realizujeme s využitím konštruktívnych heuristických algoritmov. Za účelom kvantifikácie prínosov navrhovaných zlepšení oproti pôvodnému stavu využívame ukazovateľ OEE (angl. „Overall Equipment Effectiveness“ t. j. Celková efektívnosť výrobného zariadenia) ako kritérium merania výkonnosti, v rámci ktorého sa zameriavame predovšetkým na faktor dostupnosti výrobných zariadení. Zároveň preukazujeme dosiahnutie synergického efektu po uplatnení uvedených navrhovaných riešení v zmysle zvýšenia výkonnosti v procese plánovania a rozvrhovania výroby.

Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce je tvorba systémového modelu na optimalizáciu logistických procesov vo vybranej spoločnosti, identifikácia logistických operácií a ich významu pre manažérske rozhodovanie na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky. Zameriavame sa na **meranie a následné zvyšovanie výkonnosti v procese plánovania a rozvrhovania výroby** s využitím vhodných metód a nástrojov, pričom poskytujeme **efektívne riešenia z hľadiska času a nákladov**. Navrhované riešenia implementujeme na podmienky vybranej spoločnosti v sektore automobilového priemyslu.

1 Súčasný stav riešenej problematiky doma a v zahraničí

V tejto kapitole prezentujeme súčasný stav problematiky, ktorou sa zaoberáme v rámci tejto dizertačnej práce, na základe prieskumu relevantnej domácej a zahraničnej literatúry. Definujeme pojmy, koncepty, a prístupy týkajúce sa logistických operácií na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky a ich optimalizácie.

1.1 Logistika ako súčasť dodávateľsko-odberateľského reťazca

Dodávateľsko-odberateľský reťazec (ďalej: „SC“ = Supply Chain) a jeho riadenie je rozsiahlou a komplexnou témou, o čom svedčí signifikantné množstvo vedeckých publikácií. V dostupnej literatúre sa stretávame s rozličnými interpretáciami dodávateľsko-odberateľského reťazca jednotlivými autormi, medzi ktorými je možné nájsť podobnosti, a to aj pri porovnávaní pôvodných autorov so súčasnými. Je tiež možné identifikovať viacero rozličných prístupov autorov pri definovaní SC. Porter (1985) definuje SC ako reťazec navzájom prepojených aktivít, ktoré podniku prinášajú hodnotu, pričom niektoré z nich presahujú fyzické hranice samotného podniku a zahŕňajú rôznych stakeholderov s prepojením na podnik. Brinza (2012) definuje SC ako množinu položiek, ktoré postupne prechádzajú jednotlivými fázami ponuky a vytvárajú tak reťazec vo vnútri podniku, ako aj mimo samotného podniku. Autori Bottani a Montanari (2010), vychádzajú z identifikácie funkčných oblastí podniku, ktoré sú súčasťou SC, pričom uvádzajú oblasť zásobovania, výroby, či logistiky. Campuzano a Mula (2011) uplatňujú podobný prístup, pričom vychádzajú z určenia funkcií SC, kde spadajú funkcie zabezpečenia zásobovania materiálom, jeho transformácie na medziprodukty a hotové výrobky, a ich distribúcie zákazníkom. Autori Eruguz a kol. (2016) definujú SC ako viacúrovňový systém pozostávajúci z fáz, ktoré predstavujú proces zásobovania, výroby či prepravy.

Iný pohľad poskytujú autori Abdel-Aal a kol. (2008) a Viera a kol. (2019), ktorí poukazujú na SC z hľadiska subjektov, ktoré zahŕňa. Abdel-Aal a kol. (2008) opisuje SC ako cyklus začínajúci a končiaci u zákazníka, pričom tento cyklus zahŕňa aj ďalšie subjekty, ako sú dodávatelia, výrobcovia a maloobchodníci, ktorých spoločným cieľom je zvýšenie výkonnosti SC. Podľa Viera a kol. (2019), SC pozostáva z entít ako sú dodávatelia a zákazníci, pričom zahŕňa tok materiálu a informácií na základe interakcií medzi dopytom a ponukou, s finálnym cieľom zabezpečenia spokojnosti zákazníkov pri minimálnych nákladoch a za súčasného zvýšenia konkurencieschopnosti podniku.

Riadenie dodávateľsko-odberateľského reťazca (ďalej: „SCM“ = supply chain management) predstavuje prostriedok integrácie procesov v rámci SC (Campuzano a Mula, 2011), a to vo forme plánovania, kontroly, predikcie, komunikácie, koordinácie a spolupráce v rámci SC. SCM zahŕňa riadenie aktív, ako strojov, zariadení, produktov, ale aj finančných, materiálových a informačných tokov medzi jednotlivými procesmi a operáciami (Abdel-Aal a kol., 2008; Arisha a Abo-Hamad, 2010; Eltantawy a kol., 2014; Pasandideh a kol., 2015; Graves a Schoenmeyr, 2016; Kocaoğlu a kol., 2018; Mital a kol., 2018; Hu, 2019). Porter, ale aj mnoho súčasných autorov (Bottani a Montanari, 2010; Li, 2014; Pasandideh a kol., 2015; Aouam a Kumar, 2019) sa zhoduje na tom, že efektívne riadenie dodávateľsko-odberateľského reťazca je jedným z hlavných predpokladov pre prosperitu a konkurencieschopnosť podniku.

Všeobecne je logistika považovaná za jednu z oblastí v rámci riadenia dodávateľsko-odberateľského reťazca. Logistika je zameraná na manažment toku tovarov medzi „miestom pôvodu“ a „miestom spotreby“, za účelom dosiahnutia vopred definovaných požiadaviek, pričom zahŕňa oblasti ako riadenie toku informácií, inventarizácia, manipulácia s materiálom, výroba, balenie, skladovanie, preprava, či bezpečnosť. Logistický systém predstavuje sieť organizácií, ľudí, aktivít, informácií a zdrojov zahrnutých v rámci fyzického toku produktov od dodávateľov smerom k zákazníkovi, pričom medzi jeho základné podsystemy môžeme zahrnúť oblasť zásobovania, výroby a distribúcie produktov (Farahani a kol., 2011).

Porter (1985) vníma logistiku ako jednu z primárnych zložiek v rámci hodnotového reťazca, pričom rozlišuje oblasť vstupnej a výstupnej logistiky. Predmetom manažérskych rozhodnutí prijímaných na úrovni vstupnej logistiky sú procesy smerujúce od dodávateľov k podniku, ako zásobovanie, doprava, prijímanie a skladovanie vstupného materiálu prichádzajúceho do podniku, ktoré bezprostredne súvisia s procesom plánovania a rozvrhovania výroby. Manažérske rozhodnutia prijímané na úrovni výstupnej logistiky sa týkajú procesov smerujúcich od podniku k odberateľom, ako balenie, expedícia a doprava, prostredníctvom ktorých sú zákazníkovi doručené výsledky výrobných činností podľa zadanej objednávky (Li, 2014).

Rozhodnutia prijímané manažermi v oblasti logistiky môžu mať charakter strategických, taktických či operatívnych rozhodnutí, v závislosti od ich charakteru a s ohľadom na dĺžku plánovacieho obdobia. Do skupiny strategických rozhodnutí všeobecne radíme rozhodnutia prijímané na obdobie minimálne piatich rokov, ktoré sa týkajú napríklad výberu dodávateľov, distribučných centier, zákazníkov, skladovacích miest a kapacít. Taktické rozhodnutia sa zvyčajne spájajú s rozhodnutiami realizovanými na ročnej či mesačnej báze, ktoré

sa môžu týkať plánovania v oblasti zásobovania, skladovania, výroby, distribúcie či predikcie dopytu. Operatívne rozhodnutia sú prijímané na dennej báze a môžu súvisieť napríklad s prípravou výroby pre konkrétny deň (Kocaoğlu a kol., 2018).

V tejto dizertačnej práci sa ďalej zameriavame na oblasť plánovania a rozvrhovania výroby, ktorá patrí do kategórie manažérskych rozhodnutí realizovaných na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky.

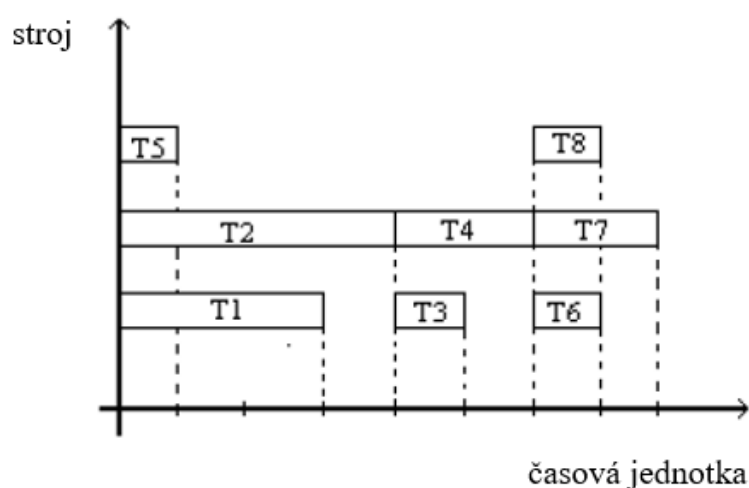
1.2 Plánovanie a rozvrhovanie výroby

Procesy plánovania a rozvrhovania výroby je nevyhnutné chápať ako integrovaný celok (Kreipl a Pinedo, 2004; Erden a kol., 2019; Georgiadis a kol., 2019; Gudehus a Kotzab, 2009). Zabezpečenie integrácie týchto procesov je pre manažérov často veľkou výzvou, čo pramení z ich odlišností. Kým proces plánovania výroby má skôr komplexnejší charakter, je zameraný na dlhšie obdobie, a jeho cieľ spočíva predovšetkým v optimalizácii vynaložených nákladov a s tým súvisiacich použitých zdrojov, proces rozvrhovania výroby má konkrétnejší charakter, je orientovaný skôr na kratšie obdobie, a jeho cieľom je zvyčajne optimalizácia výrobných časov a s tým spojenej výkonnosti (Kempf a kol., 2000; Kreipl a Pinedo, 2004; Georgiadis a kol., 2019).

V procese plánovania výroby sa manažéri snažia zabezpečiť efektívne využitie dostupných zdrojov a zároveň uspokojiť zákaznícke požiadavky pri transformácii vstupov na výstupy. Proces plánovania výroby zodpovedá za dizajn výrobných systémov, rozvoj výrobných stratégií a metód, organizáciu výrobných procesov, zadávanie výrobných príkazov, zabezpečenie kapacitných požiadaviek, ako aj materiálových, ľudských, finančných, informačných a iných zdrojov, ktoré si vyžaduje výrobný proces vzhľadom na charakter prijatej objednávky (Gudehus a Kotzab, 2009; Erden a kol., 2019). Rozhodnutiam prijatým v procese plánovania výroby musia manažéri venovať zvýšenú pozornosť a úsilie, pretože od nich potom závisí efektívnosť procesu rozvrhovania výroby.

Podľa autorov Kempf a kol. (2000) možno proces rozvrhovania výroby definovať ako proces priradovania vzácných zdrojov navzájom konkurenčným činnostiam na určité časové obdobie, za účelom dosiahnutia čo najvyššej výkonnosti. Autori Zelenka a kol. (2010) definujú problém rozvrhovania výroby ako proces, počas ktorého dochádza k vytvoreniu postupnosti úloh a ich alokovaniu na dostupné zdroje v danom časovom horizonte. Proces rozvrhovania výroby sa realizuje na základe informácií o spracovávaných objednávkach a ich dodacej lehote, o trvaní a postupnosti jednotlivých výrobných operácií potrebných k zrealizovaniu danej

objednávky, ako aj o úrovni skladových zásob či miere vyťaženia pracovnej sily, strojov a výrobných zariadení. Možno preto tvrdiť, že výstupy procesu plánovania výroby sú vstupmi do procesu rozvrhovania výroby. Výstupom procesu rozvrhovania výroby je výrobný rozvrh, v rámci ktorého sú alokované realizovaným aktivitám jednotlivé typy zdrojov, po zohľadnení definovaných cieľov, vzácnosti zdrojov a iných obmedzení (Zaied, 2008; Baroni a kol., 2013). Výrobný rozvrh predstavuje konkrétny návod, podľa ktorého následne prebieha výrobný proces. Graficky možno výrobný rozvrh efektívne zobrazit' pomocou Ganttovho diagramu, na ktorom os x reprezentuje časovú jednotku, a os y reprezentuje jednotlivé stroje. Obr. 1 znázorňuje príklad Ganttovho diagramu pre rozvrhovanie úloh $T = \{T1, T2, \dots, Tn\}$ vo výrobnom prostredí s identickými paralelnými strojmi za predpokladu, že úlohy sú navzájom nezávislé (Paralič, 2010). Takéto schematické znázornenie výrobného rozvrhu zodpovedá potrebám tejto práce.



Obr. 1 Ganttov diagram pre výrobný rozvrh

Zdroj: Paralič (2010)

1.2.1 Výkonnosť procesu plánovania a rozvrhovania výroby

Meranie a hodnotenie výkonnosti procesov je dôležitou súčasťou práce manažérov a predstavuje východisko pre zvyšovanie výkonnosti procesov v budúcnosti. Odporúča sa merať výkonnosť procesov v rámci celého dodávateľsko-odberateľského reťazca, pričom sa môže realizovať na strategickej, taktickej či operatívnej úrovni organizácie, alebo v rámci jednotlivých funkčných oblastí podniku ako oblasť výroby, marketingu, ľudských zdrojov, predaja, a i. (Ambe, 2014; Leończuk, 2016). V prípade, že podnik disponuje viacerými strojmi

vo výrobnom procese, je možné pri hodnotení výkonnosti vziať do úvahy len vybrané stroje, ktoré predstavujú tzv. „úzke miesta“ vo výrobnom procese, čo znamená, že vykazujú najnižšiu výkonnosť spomedzi všetkých strojov, čím ovplyvňujú výkonnosť celého výrobného procesu. Podľa Urban a Rogowska (2018), úzke miesta systému znižujú celkovú produktivitu systému tým, že limitujú jeho kapacity a prispievajú k akumulácii zásob. Zvýšením výkonnosti úzkych miest je možné zvýšiť výkonnosť celého procesu (Zobolas a kol., 2008), čo je v súlade s filozofiou Teórie obmedzení. Proces identifikácie úzkych miest v súlade s Teóriou obmedzení pozostáva podľa Nowakowska a Moroz (2013) z krokov:

- 1) Identifikácia úzkych miest a ich vplyvu na ciele organizácie.
- 2) Rozhodnutie o tom, ako zvýšiť výkonnosť existujúcich úzkych miest.
- 3) Prioritizácia zvýšenia výkonnosti úzkych miest a prispôsobenie ostatných rozhodnutí tomuto cieľu.
- 4) Neustále zvyšovanie výkonnosti úzkych miest opakovaním uvedených krokov, v zmysle japonskej filozofie Kaizen.

Meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby, ktorého konkrétnym výstupom je výrobný rozvrh, umožňuje manažérom navzájom porovnávať alternatívy výrobných rozvrhov, ako aj analyzovať svoje rozhodnutia pri tvorbe výrobných rozvrhov v minulosti a na základe toho zlepšiť svoje budúce rozhodnutia. Meraniu výkonnosti procesov predchádza definovanie ukazovateľov, ktoré budú predstavovať kritériá pre meranie výkonnosti. Po výpočte hodnôt jednotlivých ukazovateľov je možné hodnotiť a porovnávať výkonnosť viacerých procesov navzájom, a tým aj identifikovať, či došlo v priebehu času k zvýšeniu alebo zníženiu výkonnosti, a následne analyzovať potenciálne príčiny. V rámci merania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby je vhodné hodnotiť výkonnosť na základe výstupov tohto procesu, t. j. vytvoreného rozvrhu výroby. Kritériá na meranie výkonnosti rozvrhu sa líšia v závislosti od konkrétnych autorov. Môžu pritom zohľadňovať explicitne kvalitu samotných výrobných rozvrhov, alebo aj robustnosť výrobných rozvrhov, t. j. ich odolnosť voči nepredvídaným zmenám prostredia. Kempf a kol. (2000) zdôrazňujú, že podniky by sa nemali výlučne zamerať na dosiahnutie najvyššej možnej výkonnosti procesu rozvrhovania výroby, ale zároveň aj na to, aby nedochádzalo k významnej variabilite vo výkonnosti v rámci tohto procesu. Odporúča sa tiež určiť si váhy jednotlivých kritérií podľa ich dôležitosti, alebo na meranie použiť agregované ukazovatele.

Ukazovatele výkonnosti procesu v rámci problému rozvrhovania najčastejšie vyjadrujú mieru splnenia cieľov týkajúcich sa celkového výrobného času, dodacej lehoty alebo úrovne zásob. V rámci zamerania tejto práce uvádzame vybrané príklady kritérií týkajúce sa dĺžky výrobného času (Oyetunji 2009).

- Celkový výrobný čas (C_{tot}) = $\sum_{i=1}^n C_i$
 - predstavuje súčet výrobných časov pre jednotlivé výrobné úlohy,
 - cieľom je jeho minimalizácia pri súčasnom dodržaní potrebnej kvality výrobkov, dodacích podmienok a iných definovaných obmedzení.
- Celkový vážený výrobný čas (wC_{tot}) = $\sum_{i=1}^n W_i * C_i$
 - predstavuje súčet výrobných časov pre jednotlivé výrobné úlohy vynásobený ich relatívnymi váhami.
- Priemerný výrobný čas (C_{avg}) = $\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n C_i$
 - vyjadruje priemer výrobných časov pre jednotlivé výrobné úlohy.
- Priemerný vážený výrobný čas (wC_{avg}) = $\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n W_i * C_i$
 - vyjadruje celkový vážený výrobný čas predelený počtom uvažovaných výrobných úloh.
- Maximálny výrobný čas (ďalej: makespan) (C_{max}) = $\max(C_1, C_2, \dots, C_n)$
 - označuje výrobný čas celej množiny úloh, t. j. dĺžku výrobného rozvrhu,
 - toto kritérium sa zvyčajne využíva aj pri meraní vyťaženia stroja.

Medzi kľúčové indikátory využívané na hodnotenie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby a štíhlych metód patrí aj ukazovateľ OEE, ktorého využívanie ako kvantitatívneho nástroja na meranie výkonnosti je čoraz populárnejšie (Muchiri a Pintelon 2008). Viaceré výrobné spoločnosti zakladajú ich zlepšovacie aktivity práve na optimalizácii hodnoty tohto ukazovateľa. Jeho použitie je vhodné obzvlášť vo výrobných procesoch

s vysokým objemom výroby, kde je efektívne využitie dostupných kapacít jednou z hlavných priorít (Dal a kol. 2012). Ukazovateľ OEE vyjadruje celkovú efektívnosť výrobného zariadenia prostredníctvom súčinu troch faktorov, a to dostupnosti, výkonnosti a kvality. Dostupnosť vyjadruje, aký čas v rámci rozvrhutej produkcie bol skutočne využitý na výrobu. Rozdiel medzi týmito časmi je tvorený neplánovanými prestojmi, nastavovacími a prestavbovými aktivitami, a inými neplánovanými prerušeniami výroby. Výkonnosť porovnáva skutočne vyrobené množstvo výrobkov v porovnaní so štandardom. Kvalita predstavuje pomer výrobkov spĺňajúcich kvalitatívne štandardy voči celkovému množstvu vyrobených výrobkov. Každý faktor, z ktorých pozostáva ukazovateľ OEE, vyjadruje podiel konkrétnych parametrov a môže nadobúdať hodnoty v intervale $<0;1>$, resp. od 0 % do 100 %. Výsledná hodnota OEE je preto taktiež z uvedeného intervalu. Na základe indikátora OEE môžeme výrobný proces považovať za ideálny v prípade, že sú vyrábané len zhodné výrobky, pričom výrobný čas je minimálny a bez prestojov. Straty v rámci dostupnosti zariadenia môžu byť zapríčinené plánovanými prestojmi, pod ktoré môžeme zaradiť čas potrebný na spustenie výroby, preventívnu údržbu zariadenia, či plánované prestávky, a neplánovanými prestojmi, pod ktoré spadajú poruchy zariadenia, čakanie či odstavenie výroby z dôvodu chýbajúceho materiálu alebo iných technických príčin, a i. Príčinou strát v oblasti výkonnosti môže byť narušenie plynulého chodu výroby napríklad z dôvodu zaseknutia komponentov, znížená rýchlosť zariadenia z dôvodu jeho opotrebenia, či neefektívna práca operátora. Straty týkajúce sa kvality môžu byť spôsobené napríklad nedodržaním pracovného postupu zo strany operátora či vstupným materiálom nespĺňajúcim kvalitatívne štandardy. Za výnimočne dobré hodnoty OEE sa považuje dosiahnutie úrovne dostupnosti nad 90 %, výkonnosti nad 95 % a kvality nad 99 %. Za celkovú výnimočne dobrú úroveň efektívnosti možno považovať hodnoty ukazovateľa OEE nad 85 %. V reálnych výrobných systémoch dosahuje OEE ukazovateľ väčšinou hodnoty v rozsahu 40 % až 60 % (Stamatis 2010; Dal a kol. 2012; Naik a kol. 2015; Plinere a Aleksejeva 2018; Villamizar a kol. 2019).

V rámci merania výkonnosti procesov je tiež možné vytvoriť tzv. etalón, resp. benchmark, t. j. vzor procesu, v ktorom budú hodnoty vybraných kritérií zodpovedať maximálnej novej výkonnosti procesu za daných podmienok, a podľa ktorého bude následne hodnotená a porovnávaná výkonnosť jednotlivých procesov. Autori Kempf a kol. (2000) upozorňujú na to, že porovnávanie výkonnosti výrobného rozvrhu s optimálnym rozvrhom je nepraktické z hľadiska nárokov na výpočtovú techniku, čo vyplýva aj z klasifikácie problému rozvrhovania do kategórie NP-tiažkých problémov. Z tohto dôvodu autori navrhujú alternatívy

v podobe porovnávania výkonnosti výrobného rozvrhu so špecifickým benchmarkom, s historickými dátami, alebo s tzv. „ideálnym rozvrhom“ zohľadňujúcim „ideálne“ podmienky. V rámci tejto práce vytvárame „ideálny“ výrobný rozvrh na podmienky vybraného podniku ex-post, ktorý bude slúžiť ako benchmark hodnotenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby, ktorého výstupom je plán výroby a výrobný rozvrh.

Výstupy z merania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby slúžia ako podklad pre následné zvyšovanie výkonnosti tohto procesu. V rámci iniciatív zvyšovania výkonnosti procesov sa odporúča v prvom kroku zamerať sa na zoštíhlenie daných procesov (Plinere a Aleksejeva 2018), a následne prejsť k implementácii optimalizačných, simulačných, heuristických a metaheuristických metód a ich kombinácií.

V ďalšej časti tejto práce je charakterizovaná metóda SMED, ktorá sa využíva za účelom zoštíhlenia výrobného procesu prostredníctvom redukcie plytvania spôsobeného prestavbovými časmi. Plytvanie je v japonskom manažmente všeobecne označované pojmom „muda“. Muda v podobe prestavbových časov vo výrobe predstavuje jeden z potenciálnych zdrojov neefektívnosti, ktorého redukcia môže mať významný vplyv na zvýšenie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby. Následne sú v práci prezentované ďalšie metódy na zvýšenie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby, ktoré patria do skupiny optimalizačných, simulačných, heuristických a metaheuristických metód, a ich kombinácií.

1.3 Optimalizácia logistických operácií

Za účelom optimalizácie akéhokoľvek procesu je nevyhnutné dosiahnuť v prvom rade jeho zoštíhlenie. Mnoho autorov v dostupnej literatúre sa zhoduje na tom, že už pri samotnom zoštíhlení existuje vysoký potenciál zlepšenia resp. zvýšenia výkonnosti daného procesu. Zoštíhlenie procesu preto považujú za základ pre jeho ďalšiu optimalizáciu. V nasledujúcej časti tejto práce prezentujeme metódy štíhleho riadenia, pričom sa zameriavame na metódu SMED, ktorú využívame na zoštíhlenie procesu plánovania a rozvrhovania výroby v rámci tejto práce. Následne prezentujeme metódy zamerané na ďalšiu optimalizáciu daného procesu.

1.3.1 Metódy štíhleho riadenia

Koncept štíhleho riadenia je uznávaným smerom, ktorý našiel svoje uplatnenie medzi manažermi na celom svete, a jeho prínosy sú vysoko cenené. Jeho podstatou je zbaviť proces všetkých aktivít, ktoré doň neprinášajú hodnotu. V rámci konceptu štíhleho riadenia sa často skloňuje pojem Kaizen, ktorý označuje japonskú filozofiu zameranú na neustále zlepšovanie

vo všetkých oblastiach dodávateľsko-odberateľského reťazca podniku. V rámci japonského manažmentu sa v súlade s neustálym zlepšovaním procesov skloňuje pojem „3MU“, označujúci nedostatky, ktoré majú negatívny vplyv na efektívnosť procesov v podniku, a to „muda“, „muri“, a „mura“. Pojmom „muda“ sa označujú všetky činnosti, ktoré predstavujú zdroj odpadu, plytvania resp. podniku neprinášajú hodnotu, a preto je potrebné zamerať sa na ich elimináciu. Medzi takéto činnosti patrí napr. hromadenie nadbytočných zásob, nedokončenej výroby, nadprodukcie, chybných materiálov a produktov vyžadujúcich si opravy, preplnená pracovná plocha a neprehľadné pracovné prostredie, nadbytočné pohyby, či prestoje t. j. stratové časy vo výrobnom procese. „Muri“ označuje nadbytočné preťaženie a námahu strojov, ľudských zdrojov, či ďalších zložiek v rámci výrobného procesu. „Mura“ súvisí s nerovnomernosťou a odchýlkami vo výrobnom procese. Aby sa procesy stali štíhlymi, je potrebné eliminovať resp. redukovať odpad, prestojové a prestavbové časy v rámci procesu výroby, nadbytočné pohyby, nadprodukcii, nadbytočné zásoby, problémy súvisiace s nedostatočnou úrovňou kvality produktov, a vytvoriť podmienky pre efektívnu a plynulú výrobu (Kádárová, 2012; Pankajkumar a Mukesh 2015; Rossini a Staudacher 2016). Je nevyhnutné neustále analyzovať dodávateľsko-odberateľský reťazec v podniku a jeho časti, identifikovať zdroje neefektívnosti, ktoré brzdia podnik na ceste k dosiahnutiu vytýčených cieľov, a prinášať riešenia smerujúce k zlepšeniu súčasného stavu.

Efektívne zoštíhlenie výrobného procesu podniku je možné dosiahnuť už vo fáze plánovania a rozvrhovania výroby, a to prostredníctvom plánu redukcie prestavbových časov. Prestavbové časy sú jedným z hlavných zdrojov strát vo výrobnom procese, keďže môžu ovplyvniť široké spektrum ďalších faktorov, ako je dodacia lehota, veľkosť zásob, produktivita, či náklady na výrobok. Súčasná požiadavka kladená na výrobný sektor sa týka predovšetkým potreby flexibilne reagovať na meniace sa preferencie odberateľov, a to výrobou produktov v menších množstvách a zároveň s vysokou variabilitou. Prirodzene, dĺžka prestavbových časov sa v dôsledku tohto fenoménu zväčšuje (Mendhe a Rathi 2017). Podľa autorov Mali a Inamdar (2012) možno prestavbový čas definovať ako čas potrebný na prípravu výmeny zariadenia, stroja alebo systému, ktorý uplynie od výroby posledného zhodného výrobku poslednej výrobnéj dávky až po výrobu prvého zhodného výrobku novej výrobnéj dávky. Možnosti pre redukciiu prestavbových časov predstavujúcich mudu v rámci výrobného procesu je možné odhaliť podrobným mapovaním výrobného procesu a následným implementovaním získaných poznatkov pri procese plánovania a rozvrhovania výroby. Prestavbové časy sú

jednou zo zložiek prestojových časov, t. j. stratových časov vo výrobe, počas ktorých sú výrobné zariadenia alebo pracovné sily nútené „stáť“.

Metóda „SMED“ (angl. „Single Minute Exchange of Dies“ t. j. „Výmena foriem za krátky čas“) slúži na systematické mapovanie a analýzu výrobného procesu za účelom redukcie tých prestavbových časov, ktoré predstavujú zdroj neefektívnosti vo výrobnom procese (Desai a Warkhedkar 2011; Jadhav a kol. 2015; Joshi a Naik 2012; Almomani a kol. 2013). Implementácia metódy SMED umožňuje flexibilnejšie reagovať na rôzne a meniace sa požiadavky zákazníkov, keďže podporuje výrobu v relatívne malých výrobných dávkach s relatívne krátkou dodacou lehotou. Uplatnenie nachádza predovšetkým vo výrobných systémoch s vysokou variabilitou vyrábaných produktov, keďže poskytuje návod na relatívne rýchlu výmenu výrobných nástrojov a foriem, a tým redukuje prestavbových časov tvoriacich mŕtvolu, avšak je možné ju použiť pre akýkoľvek typ stroja v akomkoľvek sektore priemyslu (Almomani a kol. 2013). Metóda SMED je z uvedených dôvodov považovaná za jeden z efektívnych nástrojov štíhleho riadenia, a zároveň za východisko pre optimalizáciu prestavbových časov. Pri implementácii metódy SMED v podmienkach spoločnosti, ktorá je dodávateľom pre automobilový priemysel, autori Ferradás a Salonitis (2013) dosiahli redukciiu prestavbového času o 33 %. Autori Mendhe a Rath (2017) implementovali metódu SMED vo výrobnom sektore pre pásový rezací stroj, pričom dosiahli zníženie prestavbového času o 75 %, zo štyridsiatich na desať minút. Implementáciou metódy SMED je podľa autorov Desai a Warkhedkar (2011) možné dosiahnuť až 90 %-né zníženie prestavbového času.

Implementáciu metódy SMED možno rozdeliť do piatich základných fáz. V prvej fáze je potrebné identifikovať a analyzovať operácie vo výrobnom procese, vrátane operácií súvisiacich s prestavbovou činnosťou. Zaznamenáva sa trvanie operácií, ich sled, organizácia práce a komunikácia medzi jednotlivými pracovníkmi, ich motivácia, výkonnosť, koordinácia, potenciálne problémy, existujúce štandardy a ich dodržiavanie, a dochádza k identifikácii mŕtvy, t. j. všetkých oblastí vo výrobnom procese, ktoré podniku neprinášajú úžitok. V druhej fáze dochádza ku klasifikácii prestavbových operácií na interné a externé a k vyčísleniu ich dĺžky trvania. Interné operácie predstavujú operácie vykonávané počas nečinnosti stroja, napr. upevnenie či odstránenie výrobnej formy. Externé operácie sú vykonávané počas toho, ako je stroj v činnosti, kde patrí napr. príprava materiálu pre ďalšiu výrobnú dávku. V ďalšej fáze dochádza ku konvertovaniu interných operácií na externé u všetkých operácií, ktorých charakter to umožňuje, za účelom redukcie interných prestavbových časov, t. j. časov interných prestavbových operácií, čím dôjde k navýšeniu externých prestavbových časov, t. j. časov

externých prestavbových operácií. Nasleduje celkové zvýšenie výkonnosti prestavbových operácií a to prostredníctvom eliminácie zbytočných operácií, alebo vykonávania niektorých operácií paralelne, ak to charakter procesu umožňuje. V záverečnej fáze dochádza k hodnoteniu efektívnosti riešení implementovaných v súlade s metódou SMED (Desai a Wakhedkar 2011).

Implementovanie metódy SMED je vhodným riešením pre zoštíhlenie výrobného systému pred ďalším zvyšovaním jeho výkonnosti pomocou optimalizačných a simulačných metód. Tamás (2017) navrhuje doplnenie metódy SMED o simuláciu, za účelom zvýšenia jej efektívnosti. Simuláciou môžu byť vytvorené viaceré alternatívy v rámci plánovania prestavbových aktivít a na základe stanovených kľúčových indikátorov výkonnosti procesu (ďalej: „KPI“ = Key Performance Indicators) môže byť zvolené najvhodnejšie riešenie. Následne je možné prostredníctvom analýzy citlivosti vyhodnocovať mieru citlivosti rozličných faktorov vo vzťahu k definovaným KPI, za účelom nielen zvýšenia výkonnosti skúmaného procesu, ale aj dosiahnutia jeho stability (Kempf a kol. 2000).

1.3.2 Metódy modelovania

Ak sa chcú spoločnosti neustále usilovať o zlepšenie svojich procesov, bolo by veľmi nepraktické a nákladné prerušiť alebo odstaviť chod výroby. Oveľa racionálnejším riešením je preto nahradiť reálny systém modelom. Použitie metód modelovania umožňuje porovnávať výkonnosť alternatívnych riešení v rámci skúmanej oblasti bez toho, aby bolo nutné potrebné experimenty realizovať priamo vo výrobnom procese. Na zlepšovanie procesov v oblasti plánovania a rozvrhovania výroby sa používajú rozličné metódy, nástroje, modely, a algoritmy, pričom ich výber závisí od charakteristík riešeného problému a od prístupu daného autora (Biswas a Narahari, 2003). Jednou z rozhodujúcich charakteristík riešeného problému je úroveň abstrakcie. Problémy s vyššou úrovňou abstrakcie sú spojené predovšetkým s komplexným pohľadom na dodávateľsko-odberateľský reťazec, pričom môžu zahŕňať rozhodnutia typu kde postaviť distribučné centrá alebo sklady. Problémy so strednou úrovňou abstrakcie sú o niečo detailnejšie, pričom sa môžu týkať plánovania dopravy, zdrojov, analýzy rizika, plánovania zásobovania a skladovania, či odhadovania kapacít. Problémy s relatívne nízkou úrovňou abstrakcie sú orientované na konkrétne procesy, zdroje v nich a optimalizáciu, a to napríklad v oblasti plánovania výroby či identifikácie úzkych miest vo výrobe (The AnyLogic Company 2010). Výskum v oblasti plánovania a rozvrhovania výroby bol na začiatku zameraný predovšetkým na riešenie zjednodušených problémov s limitovanou aplikáciou v reálnych podmienkach. Väčšina týchto problémov bola zameraná na optimalizáciu jedného cieľa

vo výrobnom prostredí s jedným strojom, a zohľadňovala zjednodušené predpoklady. Všeobecne, pre relatívne jednoduché problémy v rámci dodávateľsko-odberateľského reťazca s relatívne vysokou úrovňou abstrakcie je postačujúce použiť kalkulácie a tabuľkový procesor Ms Excel na riešenie príslušných problémov. Odvtedy bolo identifikovaných viacero typov problémov rozvrhovania výroby a metód na ich riešenie. Pre komplexnejšie a zložitejšie problémy s nižšou úrovňou abstrakcie a detailnejším pohľadom na danú problematiku sa odporúča využiť sofistikovanejšie riešenia v podobe optimalizácie či simulácie (The AnyLogic Company 2010). Medzi najpoužívanejšie metódy na riešenie logistických problémov, ako aj iných problémov v rámci dodávateľsko-odberateľského reťazca patria optimalizačné metódy, simulačné metódy, heuristické a metaheuristické metódy, a ich kombinácie (Farahani a kol. 2011).

Optimalizačné metódy

Optimalizačné (matematické, analytické) metódy predstavujú efektívny nástroj na podporu manažérskych rozhodnutí a optimalizáciu procesov. Ich aplikovanie je vhodné v prípade, že úroveň komplexnosti daného problému je medzi úrovňou, pre ktorú je postačujúce získanie riešenia s využitím tabuľkového procesora, a úrovňou, pri ktorej sa vyžaduje použitie simulačných metód. Pomocou optimalizačných metód je možné získať najlepšie možné riešenie po zohľadnení existujúcich obmedzení a zvolení primeranej úrovne abstrakcie.

Pri formulovaní optimalizačného problému je nevyhnutné zjednodušiť podmienky reálneho sveta a to prostredníctvom abstrahovania a generalizácie, aby sme boli schopní v rámci optimalizačného modelu vyjadriť vzťahy medzi premennými prostredníctvom lineárnych závislostí a znížiť tak mieru komplexnosti daného problému, ktorý sa vyskytuje v reálnom svete. Zjednodušenie uvažovaných predpokladov však môže viesť k zníženiu vypovedacej schopnosti daného modelu z dôvodu podcenenia aspektov, ktoré môžu mať na prvky v modeli a výstupy signifikantný vplyv. Optimalizačné modely je preto nevyhnutné navrhnuť tak, aby boli zrozumiteľné, široko aplikovateľné a zároveň relevantné vzhľadom na charakter skúmaného problému (Ge a kol. 2016).

Účelová funkcia optimalizačného problému môže byť zameraná na minimalizáciu resp. maximalizáciu hodnoty ukazovateľa, ktorý je považovaný za hlavnú charakteristiku systému. Spoločnosti sa zväčša zameriavajú na maximalizáciu zisku, minimalizáciu nákladov, výrobných časov, prestavbových časov, a i. Optimalizácia sa dosahuje systematickou selekciou

najlepších možných hodnôt premenných v modeli z množiny dostupných alternatív, po zohľadnení existujúcich obmedzení, ktoré sa môžu týkať obmedzenej úrovne výrobných a skladovacích kapacít, dostupnosti výrobných zdrojov, špecifických preferencií spoločnosti, a i. V rámci matematických metód využívaných za účelom hľadania optimálneho riešenia rozlišujeme metódy lineárneho, nelineárneho, celočíselného, či zmiešaného celočíselného programovania (Zaied 2008; Farahani a kol. 2011).

Podľa Blum a Roli (2003), problém optimalizácie rozvrhovania výroby možno matematicky definovať ako problém kombinatorickej optimalizácie, v ktorom je daná:

- usporiadaná dvojica $P = (S, f)$
- množina premenných $X = \{x_1; x_2; \dots; x_n\}$
- obor definície premenných $D_1, \dots, D_n$
- obmedzenia premenných
- účelová funkcia f , ktorej riešenie hľadáme tak, aby bol dosiahnutý určený cieľ minimalizácie / maximalizácie¹, kde: $f : D_1 \dots D_n \rightarrow \mathbb{R}^+$

Množinu všetkých prípustných riešení problému kombinatorickej optimalizácie $P = (S, f)$ možno následne definovať ako:

$$S = \{s = \{(x_1, v_1), \dots, (x_n, v_n)\} \mid x_i \in D_i, s \text{ spĺňa všetky ohraničenia}\}$$

S (prehľadávací priestor) predstavuje množinu všetkých kandidátnych prípustných riešení. Riešenie v rámci prehľadávacieho priestoru, ktoré minimalizuje/ maximalizuje účelovú funkciu pri rešpektovaní definovaných obmedzení, predstavuje globálne optimum.

Optimalizačné modely patria do kategórie deterministických modelov. Deterministická povaha optimalizačných modelov znamená, že každý parameter v rámci modelu je vopred určený, pričom jeho hodnota je priemerom reálnych hodnôt v rámci skúmanej oblasti, ako je dopyt, doba dodania, atď. Optimalizačný model však nie je schopný zohľadniť náhodné vplyvy a zmeny, ktoré môžu v danom procese dodatočne nastať. V prípade zmien je preto nutné upraviť formuláciu optimalizačného problému a vyriešiť ho odznova, alebo zvoliť na riešenie alternatívny typ metódy. Analytické, resp. optimalizačné modely tiež predpokladajú, že všetky

¹ cieľ maximalizácie účelovej funkcie f je totožný s cieľom minimalizácie účelovej funkcie $-f$

parametre modelu sú rovnomerne rozdelené v rámci modelu. V reálnom svete však ani objednávky nemusia prichádzať stále v rovnakom čase. V prípade, že do modelovania daného procesu chceme zahrnúť aj prvok náhodnosti či dynamický vývoj v čase, využitie výlučne optimalizačných modelov sa neodporúča. Optimalizačné modely môžeme použiť za účelom získania prvej aproximácie riešenia, avšak to je vhodné následne podporiť využitím dynamickej simulácie, za účelom získania detailnejšieho riešenia pre hĺbkovú analýzu (The AnyLogic Company 2010).

Na súčasné výrobné podniky je kladená predovšetkým požiadavka flexibilne reagovať na dopyt zákazníkov a zmeny v ňom, čo si vyžaduje výrobu v skôr malých až stredných výrobných dávkach a realizáciu väčšieho množstva prestavbových aktivít súvisiacich so zmenou výroby z jedného stroja na iný. Prestavbové časy predstavujú aktivitu neprinášajúcu úžitok a preto je pri plánovaní a rozvrhovaní výroby nutné aktívne hľadať spôsoby ich eliminácie. Podľa Allahverdi (2015), väčšina (až do 90 %) dostupnej literatúry týkajúcej sa problému rozvrhovania explicitne nezahŕňa do riešenia tohto problému prestavbové časy a potrebu ich eliminácie. Zároveň však autor poukazuje na postupný nárast publikácií zohľadňujúcich tento aspekt. Optimalizácia prestavbových časov je komplexnou problematikou, obzvlášť vo výrobných systémoch schopných vyrábať viacero typov produktov s rozdielnymi výrobnými a prestavbovými časmi. Rozhodujúcim faktorom je v tomto procese stanovenie optimálnej veľkosti výrobnej dávky. Problematika stanovenia optimálnej veľkosti výrobnej dávky je v súčasnosti veľmi aktuálnou témou. Výrobné systémy s konštantnou veľkosťou výrobných dávok evidujú problém flexibilne reagovať na rozmanité požiadavky zákazníkov. Určenie veľkosti optimálnej dávky je rozhodujúcim faktorom pre efektívne plánovanie a rozvrhovanie flexibilných výrobných systémov a má priamy vplyv na dĺžku celkového času skompletizovania objednávky. Optimálnu veľkosť výrobnej dávky (ďalej: „EBQ“ = Economic Batch Quantity) môžeme definovať ako veľkosť výrobnej dávky, pri ktorej sú minimalizované celkové náklady (Akhtar a kol. 2018; Ali 2020).

Simulačné metódy

Simulácia patrí medzi najpoužívanejšie nástroje na skúmanie správania dodávateľsko-odberateľského reťazca a jeho výkonnosti, ako aj na hodnotenie efektívnosti manažérskych rozhodnutí v rámci tohto reťazca, obzvlášť v prípade, keď dochádza k zmenám v dopyte v čase (Bottani a Montanari 2010; Owen a kol. 2010; Othman a kol. 2012; Law 2013; Ingalls 2014;

Vieria a kol. 2019). Simulácia predstavuje efektívny nástroj využívaný manažérmi na podporu rozhodovania, konkrétne aj v procese plánovania a rozvrhovania výroby (Vavřík a kol. 2017). Hlavnou myšlienkou simulácie je nahradiť reálny systém modelom, ktorý bude zobrazovať realitu čo najviac autenticky a relevantne.

Simulačný model obsahuje informácie o reálnom skúmanom systéme a pravidlách v ňom pomocou logických a kvantitatívnych vzťahov medzi jednotlivými komponentmi systému, čím poskytuje možnosť detailne charakterizovať komplexný systém. Simulačné modely môžeme z časového hľadiska rozdeliť na statické a dynamické. Statické simulačné modely umožňujú skúmať väzby v rámci konkrétneho systému v konkrétnom čase, alebo za predpokladu, že časový aspekt nezohráva významnú úlohu. Na ich riešenie sa často využíva metóda Monte Carlo (Law 2013). Na druhej strane, dynamické simulačné modely umožňujú skúmať zmeny správania systému v čase. V tomto ohľade ich možno považovať za digitálne dvojča reálneho systému. Dynamické simulačné modely sa používajú predovšetkým v prípade, že skúmaný systém je vystavený relatívne vysokej miere neurčitosti a požaduje sa detailná analýza jeho komponentov. Z hľadiska absencie resp. prítomnosti prvku neistoty možno simulačné modely rozdeliť na deterministické a stochastické. Deterministické modely, na rozdiel od stochastických modelov, nezahŕňajú aspekt neistoty, a v prípade zaznamenania vstupných dát a vzťahov medzi nimi poskytujú výsledky v deterministickom vyjadrení. V reálnom prostredí podniku je však prvok neistoty prítomný takmer vo všetkých procesoch. Z toho dôvodu sú stochastické simulačné modely používané v praxi oveľa frekventovanejšie.

Pomocou simulácie je možné testovať a porovnávať rozličné scenáre, zrealizovať hĺbkovú analýzu jednotlivých komponentov modelu, a pozorovať zmeny v čase v rámci dodávateľsko-odberateľského reťazca. Simulácia umožňuje testovať zmeny vo výstupných hodnotách definovaných ako KPI pri zmenách vstupných hodnôt parametrov modelu, ktoré predstavujú pravdepodobnostné odhady. Viacnásobné spustenie modelu, t. j. realizácia viacerých iterácií je nevyhnutná na získanie štatistického rozdelenia reprezentujúceho výsledky bližšie realite. Pri tvorbe simulačného modelu je dôležité vhodne zvoliť úroveň abstrakcie, ktorý chceme v rámci modelu zohľadniť, a ktorý ovplyvní dĺžku výpočtového času (Bottani a Montanari 2010; The AnyLogic Company 2010). Analýza procesu pomocou simulácie všeobecne pozostáva z nasledovných fáz: zber vstupných dát, ich kódovanie a verifikácia, validácia modelu, dizajn experimentu, analýza výstupov a implementácia poznatkov (Abdel-Aal a kol. 2008).

Simulačné modely možno klasifikovať do viacerých skupín, a to z časového hľadiska, aspektu neistoty, charakteru zmien premenných, a charakteru skúmaného problému (Abdel-Aal a kol. 2008; Owen a kol. 2010; Campuzano a Mula 2011; Law 2013; Kersten a Saeed 2014; Grigoryev 2018; Golroudbary a kol. 2019).

Klasifikácia simulačných modelov podľa uvedených kritérií:

- časové hľadisko
 - statické modely – analýza systému v konkrétnom čase alebo časový aspekt nie je dôležitý (napr. simulácia Monte Carlo)
 - dynamické modely – zahrnutie zmien v čase do modelu
- aspekt neistoty
 - deterministické modely – neobsahujú aspekt neistoty; pri definovaní vstupných parametrov a vzťahov medzi vstupnými a výstupnými parametrami je možné určiť výstupné parametre
 - stochastické modely – obsahujú náhodnú (pravdepodobnostnú) zložku
- charakter zmien premenných
 - diskkrétne modely – zmena premenných v konkrétnych časových okamihoch (napr. príchod zákazníkov do obchodu)
 - spojité modely – zmena premenných v priebehu času (napr. rýchlosť lietadla letiaceho vo vzduchu)
- charakter skúmaného problému
 - simulácia v tabuľkovom procesore (najčastejšie Ms Excel)
 - najjednoduchšia forma simulácie
 - staticko – deterministický charakter modelu
 - možnosť využiť v rozličných oblastiach SC pri riešení jednoduchých problémov

- systémová dynamika
 - berie do úvahy kontinuálne zmeny stavu systému v čase; používa sa pri skúmaní dlhodobého vývoja správania systému
 - uvažuje s vysokou úrovňou abstrakcie; používa sa pri riešení strategických problémov (dizajn SC, a i.)
- diskrétna simulácia
 - berie do úvahy zmeny stavu systému v diskrétnych bodoch v čase; uvažuje s individuálnou udalosťou v danom čase (napr. príchod zákazníckej objednávky)
 - uvažuje s nízkou až strednou úrovňou abstrakcie; používa sa pri riešení operatívnych problémov
 - jej použitie je vhodné aj pri problémoch, v ktorých významnú úlohu zohráva poradie operácií
- multiagentná simulácia
 - využíva agentov, ktorí predstavujú autonómne (reálne alebo virtuálne) entity situované do definovaného kontextu prostredia, v ktorom konajú a reagujú
 - úroveň abstrakcie závisí od miery komplexnosti objektu reprezentovaného agentmi (napr. celý podnik alebo vybraná funkčná oblasť)

Simulácia sa zvykne dopĺňať o analýzu citlivosti, pomocou ktorej je možné analyzovať zmenu výsledného riešenia pri zmene vstupných parametrov modelu. Autori Arisha a kol. (2003) navrhujú model, v rámci ktorého analyzujú vplyv zmien v objeme produkcie, v poradí spracovania jednotlivých úloh, a v produktovom mixe, na stanovené kritériá výkonnosti. Využívajú pritom simuláciu, analýzu citlivosti, analýzu rozptylu („ANOVA“ = Analysis of Variance) a analýzu stredných hodnôt („ANOM“ = „Analysis of Means“). Analýzu rozptylu na podporu výsledkov simulácie použili vo svojej štúdii aj autori Muhammad a JengFeng (2014). Ramírez a kol. (2016) vo svojej publikácii navrhujú využitie systémovej dynamiky ako typu simulácie a následné použitie analýzy citlivosti na určenie vplyvu vybraných premenných na výkonnosť dodávateľsko-odberateľského reťazca spoločnosti v automobilovom sektore. Belvárdi a kol. (2012) navrhujú využitie Monte Carlo simulácie a následnej analýzy citlivosti

na definovanie vzťahu medzi rozhodovacími premennými a definovanými kľúčovými indikátormi výkonnosti. Autori Darom a kol. (2018) používajú analýzu citlivosti za účelom zistenia vplyvu rozličných nákladových položiek na celkové náklady.

Optimalizačno-simulačná metóda

Spojenie metód optimalizácie a simulácie sa javí ako efektívne riešenie, umožňujúce dosiahnuť synergický efekt z ich výhod. Zatiaľ čo optimalizačné modely umožňujú získať optimálne riešenie za predpokladu, že všetky vstupné parametre modelu sú známe, simulačné modely, naopak, sú oboznámené s výstupom, a do vstupných parametrov začleňujú prvok náhodnosti (Thiers a McGinnis 2011). Optimalizačno-simulačné metódy predstavujú vhodný nástroj na analýzu a zlepšovanie dodávateľsko-odberateľského reťazca (The AnyLogic Company 2010). Odporúča sa buď nájsť optimálne riešenie s využitím optimalizácie a kvalitu a validitu získaného riešenia následne overiť pomocou simulácie výsledného riešenia, alebo využiť simuláciu pre lepšie pochopenie dynamiky skúmaného systému, a následne na ňu nadviazať relevantným optimalizačným modelom, ktorý bude vychádzať z poznatkov zistených vďaka simulácii a lepšie tak odrážať skutočný stav (The AnyLogic Company 2010). Podľa autorov Arisha a Abo-Hamad (2010) je pomocou optimalizačných modelov možné nájsť optimálnu množinu rozhodovacích premenných vo vzťahu k účelovej funkcii a následne s využitím simulačných modelov je možné skúmať vzťahy medzi jednotlivými prvkami v rámci modelu a vyhodnotiť vplyv rozhodovacích premenných na výkonnosť celého skúmaného systému.

Teória rozvrhovania je disciplína súvisiaca s riešením problémov rozvrhovania výroby s využitím matematických modelov a metód. Problém rozvrhovania výroby patrí do kategórie NP-ťažkých problémov, čo znamená, že sa doposiaľ pre tento typ problému nenašiel efektívny algoritmus poskytujúci optimálne riešenie. Preto došlo k vývoju heuristických a metaheuristických metód poskytujúcich aproximačné (približné) riešenia, ktoré sa približujú optimálnemu riešeniu (Kempf a kol. 2000; Baker a Trietsch 2009).

1.3.3 Heuristické a metaheuristické metódy

Heuristické metódy sú schopné poradiť si s relatívne komplexnými problémami rozvrhovania výroby v primeranom čase, pričom využívajú aproximačné algoritmy, ktoré vedú k riešeniu, ktoré nie je optimálne, ale blíži sa k nemu. Pri výbere vhodnej heuristickej metódy

je potrebné zohľadniť charakter skúmaného problému, a nájsť potrebný kompromis medzi kvalitou potenciálne získaného riešenia a dĺžkou výpočtového času. Zdokonaľovaním heuristických metód došlo ku vzniku tzv. metaheuristických metód, ktoré poskytujú väčšiu robustnosť a môžu byť použité na väčšiu škálu problémov. Kombinácia heuristických a metaheuristických algoritmov vyústila do vzniku hybridných algoritmov (Zobolas a kol., 2008).

- **Heuristické algoritmy**

- Algoritmy lokálneho prehľadávania

- sú založené na lokálnom prehľadávaní okolia prípustného riešenia
 - vychádzajú z počiatočného riešenia (väčšinou generovaného konštruktívnou heuristikou alebo náhodne) a v rámci jednotlivých iterácií sa usilujú nahradiť časť alebo celé riešenie lepším riešením v definovanej množine susedných riešení

- Konštruktívne algoritmy

- sú založené na postupnom pridávaní časti riešenia k pôvodnému riešeniu
 - majú menšie požiadavky na výpočtovú techniku ako algoritmy lokálneho prehľadávania
 - pre väčšinu algoritmov je známy pomer najhoršieho riešenia získaného heuristikou k optimálnemu riešeniu
 - prevažná časť konštruktívnych algoritmov využívaných v probléme rozvrhovania je založená na dispečerských prioritných pravidlách

Na základe vybraného **dispečerského prioritného pravidla** dochádza k prideleniu priority nerozvrhnutým úlohám. Následne je v rámci každej iterácie algoritmu pridelená priorita doposiaľ nerozvrhnutým úlohám, a postupným systematickým pridávaním úloh s najväčšou prioritou až po úlohy s najmenšou prioritou dochádza k vytváraniu výrobného rozvrhu (Ladovský 2011). Tab. 1 obsahuje vybrané príklady dispečerských prioritných pravidiel.

Tab. 1 Dispečerské prioritné pravidlá

Prioritné pravidlo	Charakteristika prioritného pravidla
RPT (random processing time first)	priorita je úlohám pridelená náhodne
LPT (longest processing time first)	úloha s dlhším časom spracovania má väčšiu prioritu
WLPT (weighted longest processing time first)	úloha s váženým dlhším časom spracovania má väčšiu prioritu
LRPT (largest remaining processing time first)	úloha so zostávajúcim dlhším časom spracovania má väčšiu prioritu
SPT (shortest processing time first)	úloha s kratším časom spracovania má väčšiu prioritu
WSPT (weighted shortest processing time first)	úloha s váženým kratším časom spracovania má väčšiu prioritu
SRPT (shortest remaining processing time first)	úloha so zostávajúcim kratším časom spracovania má väčšiu prioritu
FCFS (first come first serve)	úloha vstupujú do systému skôr má väčšiu prioritu

Zdroj: Ladovský (2011)

- **Metaheuristické algoritmy**

- skúmajú priestor prehľadávania s využitím logických pohybov a ich znalosť efektov pohybov uľahčuje únik z lokálne optimálnych riešení do globálne optimálnych riešení
- únik z lokálne optimálnych riešení je založený na „inteligentnej náhodnosti“ (umožňujú nové, dokonca zhoršujúce sa pohyby, ale skôr inteligentným ako náhodným spôsobom) alebo zaujatosti“ (zaujatosť vo vzťahu k účelovej funkcii, k predchádzajúcim pohybom a rozhodnutiam)
- môžu byť založené buď na diverzifikačnej stratégii, pomocou ktorej sa efektívne preskúmajú všetky možné oblasti riešenia, alebo na stratégii intenzifikácie, pomocou ktorej sa použijú zhromaždené vedomosti z vyhľadávania a preskúma sa užší podpriestor riešenia
- môžu iteratívne nahradzovať existujúce riešenie novými riešeniami, ktoré lepšie vyhovujú definovaným podmienkam, alebo zdokonaľovať získané riešenie skúmaním jeho okolia pomocou množiny pohybov

- môžu využívať krátkodobú pamäť, na základe ktorej dochádza k zapamätaniu posledných krokov, čo napomáha vyhnúť sa pohybom, ktoré by mohli viesť k určitým riešeniam považovaným za neefektívne, alebo dlhodobú pamäť, kedy dochádza k postupnému ukladaniu a zapamätaniu pohybov a k uplatneniu takto získaných vedomostí v definovaných fázach algoritmu

Medzi najznámejšie metaheuristické metódy a algoritmy patria:

- evolučné výpočtové algoritmy (genetické algoritmy, evolučné stratégie, evolučné programovanie)
 - sú zamerané na hľadanie a zapamätanie korelácií medzi rozhodovacími premennými, čo uľahčí identifikáciu oblastí vysokej kvality v prehľadávanom priestore
- simulované žihanie
 - jedna z najstarších metaheuristických metód
 - únik z lokálneho optima je zabezpečený umožnením riešeniu horšej kvality nahradiť súčasné riešenia (pravdepodobnosť takéhoto kroku sa s postupným hľadaním znižuje)
- tabu vyhľadávanie
 - často používaná metaheuristická metóda
 - je súčasťou viacerých algoritmov na riešenie problému rozvrhovania výroby
 - na únik z lokálneho optima využíva krátkodobú pamäť s cieľom vyhýbať sa naposledy navštevovaným riešeniam (ktoré sú umiestnené na „tabu zozname“)
 - v rámci každej iterácie je vybrané najlepšie riešenie mimo tabu zoznamu, následne sa pridá do tabu zoznamu a tým jedno riešenie z tabu zoznamu „vytlačí“ (zvyčajne v poradí FIFO), kým nie je splnená definovaná podmienka a teda algoritmus ukončený

- hybridné metódy
 - obsahujú kombinácie rôznych metaheuristických algoritmov

1.4 Problémy rozvrhovania výroby

Všeobecne možno problém rozvrhovania výroby definovať nasledovne (Palúch a Peško 2006):

- je daná množina úloh J , ktoré sa majú v rámci objednávky vykonať; $J = \{1, 2, \dots, n\}$
- je daná množina strojov M , na ktorých sa majú úlohy vykonať; $M = \{1, 2, \dots, m\}$
- je daná množina operácií O , ktoré sa majú vykonať v rámci úloh; $O = \{1, 2, \dots, o\}$
- pre každú operáciu ľubovoľnej úlohy je daná časová dĺžka jej spracovania a stroj, na ktorom sa môže táto operácia vykonať
- každý stroj môže v danom časovom okamihu vykonávať práve jednu operáciu
- v danom časovom okamihu sa nemôžu vykonávať dve alebo viac operácií jednej úlohy
- sú dané ďalšie relevantné obmedzenia a kritériálna funkcia rozvrhu
- podstatou problému rozvrhovania je následne rozhodnúť, na ktorom stroji sa vykoná každá operácia v rámci jednotlivých úloh a časový interval vykonania daných operácií

Problémy rozvrhovania výroby môžeme začleniť do skupín z hľadiska vstupných informácií, prostredia rozvrhovania, počtu fáz výroby, počtu strojov, usporiadania strojov, kritéria rozvrhovania a charakteru výrobných požiadavky. Výskum v priebehu posledných desaťročí sa orientoval predovšetkým na viacstupňové, deterministické, statické problémy rozvrhovania (Palúch a Peško 2006; Zobolas a kol. 2008; Paralič 2010; Strohhecker a kol. 2016; Georgiadis a kol. 2019; Villamizar a kol. 2019).

- vstupné informácie
 - deterministický problém
 - informácie o dobe spracovania jednotlivých úloh a dostupnosti strojov sú vopred známe

- do systému vstupuje naraz celá množina úloh a až po ich spracovaní vstúpi do systému ďalšia množina úloh
- stochastický problém
 - informácie o dobe spracovania jednotlivých úloh a dostupnosti strojov nie sú vopred známe
 - jednotlivé úlohy vstupujú do systému priebežne
- prostredie rozvrhovania
 - statický problém – uvažuje sa s počtom úloh a ich charakteristikami známymi pred začiatkom rozvrhovania
 - dynamický problém – úlohy prichádzajú do systému v rôznom čase a dochádza k dynamickej modifikácii rozvrhu
- počet fáz výroby
 - jednostupňová výroba
 - viacstupňová výroba
- počet strojov
 - jeden stroj
 - viacero strojov
- typ strojov z hľadiska rozvrhovania
 - paralelné – úloha môže byť vykonávaná na ľubovoľnom stroji
 - dedikované (špecializované) – úloha môže byť vykonávaná na vybraných konkrétnych strojoch
- usporiadanie strojov
 - sériové (za sebou)
 - paralelné (vedľa seba)
 - identické – vykonanie danej úlohy si vyžaduje rovnaký čas spracovania na všetkých strojoch

- uniformné – vykonanie danej úlohy si vyžaduje rozdielny čas spracovania na jednotlivých strojoch, nezávislý od charakteru konkrétnej úlohy
 - nesúvzťažné – vykonanie danej úlohy si vyžaduje rozdielny čas spracovania v závislosti od konkrétneho stroja a konkrétnej úlohy
- kritérium rozvrhovania
 - minimalizácia celkového času výroby, maximalizácia využitia zdrojov, a i.
 - charakter výrobnej požiadavky
 - otvorený problém (Open shop problém) – vyrába sa na sklad na základe predikcie dopytu
 - uzavretý problém – vyrába sa len na základe prijatých objednávok
 - Flow shop problém
 - Job shop problém

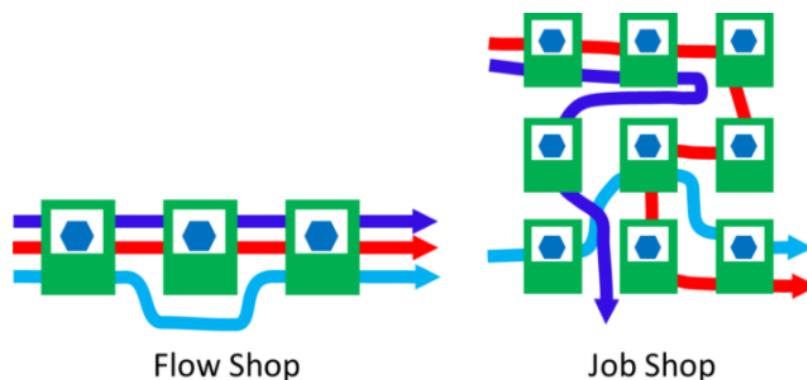
Porovnanie Open shop, Job shop a Flow shop problémov rozvrhovania sumarizuje Tab. 2.

Tab. 2 Porovnanie problémov rozvrhovania

Problém rozvrhovania	Počet úloh v rámci zákaziek n_k	Poradie úloh v rámci zákaziek J_k
Open shop	Rovnaký pre všetky zákazky J_k	Ľubovoľné
Flow shop	Rovnaký pre všetky zákazky J_k	Pevne dané, rovnaké pre všetky zákazky J_k
Job shop	Rôzny pre jednotlivé zákazky J_k	Pevne dané, rôzne pre jednotlivé zákazky J_k

Zdroj: Paralič (2010)

Rozdiel medzi Job shop a Flow shop problémom rozvrhovania vizuálne zobrazuje Obr. 2.



Obr. 2 Flow shop vs. Job shop problém

Zdroj: Roser, 2017

Flow shop problém rozvrhovania

Ak J predstavuje množinu úloh $(1,2,...,n)$, ktoré sa majú vykonať a M predstavuje množinu strojov $(1,2,...,m)$, všetky úlohy sú spracované sekvenčne na viacerých strojoch v rovnakom poradí, pričom platí, že každá úloha môže byť spracovaná v danom čase práve na jednom stroji, flow shop rozvrhovací problém môžeme definovať ako problém, ktorého cieľom je nájsť poradie úloh, pri ktorom by bolo optimalizované zvolené kritérium výkonnosti (Zobolas a kol. 2008).

Job shop problém rozvrhovania

Ak O predstavuje množinu operácií $(1,2,...,o)$, ktoré sa majú spracovať a M predstavuje množinu strojov $(1,2,...,m)$, každá operácia pozostáva zo série operácií, ktoré je nutné rozvrhnúť vo vopred určenom poradí špecifickom pre konkrétnu úlohu, pričom platí, že každá úloha môže byť spracovaná v danom čase práve na jednom stroji, každý stroj môže v danom čase spracovávať práve jednu úlohu, a prestavbové časy sú zahrnuté v čase spracovania a nezávislé na rozhodnutiach o poradí spracovania, job shop rozvrhovací problém môžeme definovať ako problém, ktorého cieľom je nájsť poradie úloh pre každý stroj, pri ktorom by bolo optimalizované zvolené kritérium výkonnosti. Komplexnosť job shop problému rozvrhovania vyplýva z mnohých obmedzení, ako charakteristika a priorita jednotlivých úloh, dodacie lehoty, kapacity strojov a ich dostupnosť a i. (Zobolas a kol. 2008). Špeciálnym hybridným prípadom job shop problému je job shop problém v prostredí s paralelnými strojmi, v rámci ktorého

dochádza k spracovaniu úloh na jednom stroji z množiny dostupných paralelných strojov. Autori Geetha a Hemamalini (2020) na riešenie tohto typu problému využívajú metaheuristickú metódu nazývanú Kolónia mravcov.

V rámci tejto práce sa ďalej zameriavame na problém rozvrhovania výroby v prostredí s paralelným usporiadaním strojov a skúmame metódy využívané na jeho riešenie v dostupných publikáciách. V praktickej časti navrhujeme a realizujeme riešenie pre problém rozvrhovania, ktorý možno klasifikovať ako deterministický, statický, hybridný z hľadiska charakteru výrobných požiadavky, ktorého cieľom je zvýšenie dostupnosti strojov a tým zvýšenie celkovej výkonnosti v procese plánovania a rozvrhovania výroby, ktorého výstupom je výrobný rozvrh, pri rešpektovaní definovaných obmedzení v prostredí s jednostupňovou výrobou a paralelným usporiadaním strojov vstupujúcich do výrobného systému.

1.4.1 Problémy rozvrhovania výroby s paralelným usporiadaním strojov

V rámci doposiaľ realizovaných výskumov boli na riešenie problému paralelných strojov (PMSP problému) využívané prevažne heuristické a metaheuristické metódy. Autori Strohhecker a kol. (2016) vyzdvihujú používanie jednoduchších heuristických metód, ktoré predstavujú flexibilné a praktické riešenie najmä v prípade potreby častej aktualizácie výrobného rozvrhu, čo si vyžaduje aj súčasný trend customizácie výroby. Po priradení jednotlivých úloh strojom sa často využíva určenie poradí spracovania daných úloh podľa zvolenej priority, resp. dispečerského prioritného pravidla (Ladovský 2011). Autori Kim a kol. (2002) na riešenie problému rozvrhovania v prostredí nesúvzťažných paralelných strojov, ktorého cieľom je minimalizácia času oneskorenia, využívajú metaheuristickú metódu simulovaného žihania. Cheng a kol. (2012) sa zaoberajú problémom rozvrhovania v prostredí paralelných strojov s neidentickým rozsahom úloh, ktoré sú spracovávané v dávkach a stroje majú rovnakú kapacitu. Autori formulujú daný problém ako problém celočíselného programovania, ktorého cieľom je minimalizovať maximálny výrobný čas a celkový výrobný čas, a na jeho riešenie využívajú aproximačný algoritmus. Yang-Kuei a Chi-Wei (2013) riešia vo svojej publikácii problém rozvrhovania paralelných nesúvzťažných strojov za účelom minimalizácie makespanu, celkového váženého výrobného času a celkového váženého času oneskorenia.

V praxi sa frekventovane vyskytuje problém rozvrhovania v prostredí nesúvzťažných paralelných strojov („UPMSP“ problém = „Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem“) s prestavbovými časmi, ktoré sú závislé na poradí, t. j. na ktorých veľkosť vplyva

predchádzajúca a nasledujúca úloha. Tento problém možno podľa Ezugwu a Akutsah (2018) definovať nasledovne:

- je potrebné spracovať n úloh dostupných v čase 0 na m strojoch s odlišnými vlastnosťami
- $P_{j,k}$ označuje požadovaný čas spracovania pre každú úlohu j ($j = 1, 2, \dots, n$) na každom stroji k ($k = 1, 2, \dots, m$), pričom tento čas závisí od typu úlohy j a stroja k
- informácie o dĺžke času spracovania $P_{j,k}$ úlohy j na stroji k a prestavbovom čase pri zmene prechode z úlohy i na úlohu j sú fixné a známe vopred
- cieľom optimalizácie je zvyčajne minimalizovať makespan $C_{\max}$ pre problém rozvrhovania v prostredí nesúvzťažných paralelných strojov

Tomuto problému bolo z dôvodu narastajúcej komplexnosti a zložitosti venované v literatúre menej pozornosti ako ekvivalentnému problému v prostredí s identickými alebo uniformnými strojmi (Strohhecker a kol. 2016; Ezuwu a Akutsah 2018). Algoritmy na riešenie tohto typu problému môžu podľa Yang-Kuei a Chi-Wei (2013) priniesť spoľahlivé výsledky pri ich uplatnení na riešenie všetkých druhov problémov rozvrhovania pre paralelné stroje.

Autori Helal a kol. (2006) riešia problém rozvrhovania vo výrobnom prostredí s nesúvzťažnými strojmi s prestavbovými časmi závislými na poradí pomocou metaheuristickej metódy tabu vyhľadávania. Rabadi a kol. (2006) navrhujú na riešenie tohto typu problému, ktorého cieľom je minimalizácia makespanu, využitie metódy Meta-RaPS (angl. „Metaheuristic for Randomized Priority Search“ t. j. Metaheuristika pre randomizované prioritné vyhľadávanie), ktorej výkonnosť podľa autorov Strohhecker a kol. (2016) a Alharkan a Qamhan (2017) prevyšuje výkonnosť niektorých iných existujúcich heuristických metód na riešenie tohto typu problému. Podľa Ezugwu a Akutsah (2018), využitie metódy Meta-RaPS sa osvedčilo a prinieslo riešenia dobrej kvality aj pre problémy väčšieho rozsahu. Strohhecker a kol. (2016) navrhujú riešenie problému rozvrhovania s prestavbovými časmi závislými na poradí vo výrobnom prostredí s dvomi paralelnými linkami, z ktorých každá pozostáva z jedného stroja. Využívajú heuristiku s cieľom zlepšiť výkonnosť výrobného procesu s ohľadom na prestavbové časy, časy spracovania a celkové využitie kapacít. Autori definujú opísaný problém rozvrhovania pomocou metódy zmiešaného celočíselného programovania a riešia ho pomocou heuristiky. Afzalirad a Rezaeian (2017) prezentujú vo svojej publikácii využitie metaheuristických metód na riešenie opísaného problému rozvrhovania, konkrétne genetického algoritmu a simulovaného žihania. Alharkan a Qamhan (2017) uplatňujú

pri riešení UPMSP problému rozvrhovania hybridný prístup, t. j. využívajú kombináciu heuristických a metaheuristických metód, vrátane metódy simulovaného žihania. Autori Ezugwu a Akutsah (2018) využívajú na riešenie tohto typu problému heuristickú metódu lokálneho prehľadávania v spojení s metaheuristickým algoritmom svetlušiek. V publikácii od Ezugwu (2019) sú navrhnuté variácie metódy simulovaného žihania na riešenie daného problému. Gao a kol. (2020) riešia UMPSP problém s prestavbovými časmi závislými na poradí, v rámci ktorého nie sú známe konkrétne časy spracovania, len ich intervaly, a ktorého cieľom je minimalizácia makespanu, s využitím heuristického algoritmu.

2 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce je tvorba systémového modelu na optimalizáciu logistických procesov vo vybranej spoločnosti, identifikácia logistických operácií a ich významu pre manažérske rozhodovanie na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky. Za účelom dosiahnutia hlavného cieľa definujeme parciálne ciele.

Prvým parciálnym cieľom je štúdium relevantnej dostupnej literatúry a tvorba prehľadu literatúry so zameraním na oblasť logistických operácií a ich významu pre manažérske rozhodovanie na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky.

V rámci prvého parciálneho cieľa tejto práce sa venujeme vysvetleniu pojmov, konceptov, prístupov a metód týkajúcich sa dodávateľsko-odberateľského reťazca a jeho riadenia. Uvádžeme postavenie logistiky v dodávateľsko-odberateľskom reťazci, a poukazujeme na súvis jednotlivých typov manažérskych rozhodnutí s logistickými operáciami. Následne sa zameriavame na proces plánovania a rozvrhovania výroby, ktorý je úzko a priamo prepojený s tokom materiálu smerujúceho od dodávateľov k podniku v rámci vstupnej logistiky, a súvisí s prijímaním operatívno-taktických manažérskych rozhodnutí. Poukazujeme na vzťah medzi procesmi plánovania a rozvrhovania výroby a potrebu chápať ich ako integrovaný celok. Následne, po vysvetlení základných pojmov a súvislostí spájajúcich sa s procesom plánovania a rozvrhovania výroby sa zameriavame na jeho výkonnosť a meranie výkonnosti. Poukazujeme na dôležitosť merania pre kvantifikáciu potenciálnych zlepšení skúmaného procesu. Uvádžeme najčastejšie využívané kritériá na meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby. Prioritne sa zameriavame na ukazovateľ OEE ako všeobecne uznávané kritérium pre meranie výkonnosti, a vysvetľujeme jeho podstatu. V ďalšej časti literárneho prehľadu sa venujeme optimalizácii logistických operácií. Poukazujeme na nevyhnutnosť prioritne zoštíhliť proces, ktorý má byť predmetom ďalšej optimalizácie. Vysvetľujeme koncept štíhleho riadenia, ktorého podstatou je predovšetkým eliminovať zdroje neefektívnosti v danom procese. Poukazujeme na potrebu redukovať dĺžku prestavbových časov, ktoré predstavujú významný zdroj neefektívnosti v procese výroby. V rámci metód štíhleho manažmentu sa zaoberáme metódou SMED, ktorá sa zameriava na redukciiu dĺžky prestavbových časov. Následne sa venujeme predstaveniu optimalizačných, simulačných, heuristických a metaheuristických metód, a možnostiam ich využitia v procese plánovania a rozvrhovania výroby. Prezентujeme typy heuristických algoritmov so zameraním

na konštruktívne heuristické algoritmy, a všeobecne využívané dispečerské prioritné pravidlá, na ktorých sú založené. Taktiež diskutujeme o problémoch rozvrhovania výroby a metódach využívaných na ich riešenie na základe dostupnej literatúry.

Druhým parciálnym cieľom je návrh systémového modelu na meranie výkonnosti logistických procesov, resp. optimalizačného modelu.

Navrhovaný model znázorňujeme prostredníctvom cyklu DMAIC, ktorý predstavuje schému neustáleho zlepšovania procesov v zmysle japonskej filozofie Kaizen. V rámci cyklu DMAIC prioritne definujeme cieľ a predmet zlepšovania, a to zvýšiť výkonnosť v procese plánovania a rozvrhovania výroby. Ako kritérium pre meranie výkonnosti daného procesu navrhujeme použitie ukazovateľa OEE, pozostávajúceho z troch parciálnych ukazovateľov, a to dostupnosti, výkonnosti, a kvality. Na základe dostupnej literatúry uvádzame vzorce na výpočet jednotlivých parciálnych ukazovateľov OEE. Ďalším krokom je hodnotenie výsledkov merania s preukázateľným priestorom na zlepšenie súčasného stavu. Následne dochádza k použitiu vhodných metód na zvýšenie súčasnej výkonnosti. Navrhujeme použitie metódy štíhleho manažmentu SMED a heuristické metódy. Následne vyhodnocujeme mieru navrhovaných zlepšení, pomocou opätovného využitia ukazovateľa OEE.

Tretím parciálnym cieľom je implementácia a overenie navrhovaného modelu v podmienkach vybranej slovenskej spoločnosti, ktorá je dodávateľom pre automobilový priemysel.

V rámci tretieho parciálneho cieľa tejto práce sa venujeme implementácii navrhovaného modelu v podmienkach vybraného subjektu. Realizujeme získavanie a spracovanie relevantných vstupných dát pre náš výskum. Na základe vstupných dát realizujeme pomocou ukazovateľa OEE meranie súčasnej výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby. Následne, v rámci aplikácie metódy SMED definujeme podstatu a druh prestavbových činností realizovaných v procese výroby vo vybranom podniku, a konvertujeme interné prestavbové aktivity na externé u všetkých aktivít, ktorých charakter to umožňuje. V rámci heuristických metód navrhujeme relevantné konštruktívne heuristické algoritmy využívajúce štandardné dispečerské prioritné pravidlá a aplikujeme ich na relevantné dáta z vybraného podniku. Následne vyhodnocujeme mieru dosiahnutých zlepšení na základe ukazovateľa OEE a ich synergický efekt.

Štvrtým parciálnym cieľom je zhrnutie poznatkov a prínosov výskumu pre vedu, prax a študijný odbor Ekonomika a manažment podniku.

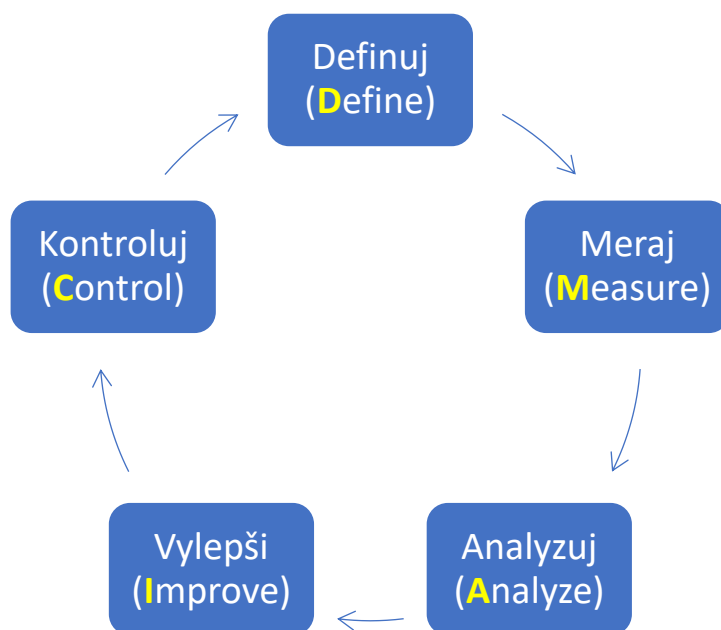
V rámci štvrtého parciálneho cieľa tejto práce sumarizujeme potenciálne prínosy pri implementácii navrhovaného modelu. Poukazujeme na vhodnosť jeho využitia obzvlášť pre malé a stredné podniky a na univerzálnosť a systematickosť navrhovaných riešení, ktoré sú efektívne a nenáročné na implementáciu z hľadiska času, nákladov či nárokov na výpočtovú techniku. Uvádzame relevantnosť a prínos využitia modelu predovšetkým pri súčasnom trende customizovanej výroby a rastúcej cene práce. Zároveň diskutujeme o možnostiach rozšírenia výskumu v budúcnosti.

3 Metodika práce a metody skúmania

V tejto kapitole uvádzame metódy použité v tejto práci za účelom dosiahnutia stanovených cieľov. Následne predstavujeme spoločnosť, v ktorej sme navrhli implementáciu riešení prezentovaných v rámci tejto práce.

Vo fáze štúdia dostupnej literatúry za účelom splnenia prvého parciálneho cieľa sme využili **logické metódy vedeckej práce**, a to **analýzu a syntézu, indukciu a dedukciu, komparáciu, abstrakciu**. Prevažne sme pracovali s vedeckými databázami Web of Science, Scopus, a Google Scholar, za účelom vytvorenia prehľadu súčasného stavu skúmanej problematiky v domácej a zahraničnej literatúre, čo slúžilo ako východisko pre náš výskum.

Následne sme navrhli **systémový model na meranie výkonnosti logistických procesov, resp. optimalizačný model** v zmysle druhého parciálneho cieľa, ktorý znázorňujeme na Obr. 3 prostredníctvom **cyklu DMAIC** („Define“ = Definuj; „Measure“ = Meraj; „Analyze“ = Analyzuj; „Improve“ = Vylepši; „Control“ = Kontroluj), ktorý predstavuje metódu zlepšovania procesov.



Obr. 3 DMAIC model zlepšovania procesu

Zdroj: vlastné spracovanie

Navrhovaný model predstavuje spôsob zvyšovania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby v súlade s DMAIC cyklom. Pozostáva z piatich hlavných opakujúcich sa krokov za účelom neustáleho zlepšovania procesu, v zmysle japonskej filozofie Kaizen.

1. krok: „Define“ = Definuj

Prvým krokom je definovanie cieľov a predmetov zlepšovania procesu. V tejto práci sme sa zamerali na zlepšovanie procesu plánovania a rozvrhovania výroby. Za týmto účelom sme definovali dáta vstupujúce do procesu plánovania výroby. V rámci tohto procesu sme zohľadnili prijaté objednávky od zákazníkov, ktoré charakterizuje ich identifikačné číslo, dátum prijatia, požadovaný termín dodania a objednané množstvo. V procese plánovania spoločnosť zohľadňuje aj ďalšie parametre týkajúce sa objednaných výrobkov, ako dĺžku výrobného cyklu, počet dutín pre výrobnú formu na základe charakteru a veľkosti objednávky, čas potrebný na lisovanie, či zoznam potenciálne vhodných strojov na lisovanie vrátane ich priority.

2. krok: „Measure“ = Meraj

V druhom kroku dochádza k meraniu výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby vo vybranom podniku, ktoré bude predstavovať východisko pre zlepšovanie výkonnosti tohto procesu. **Meranie** patrí do kategórie **empirických vedeckých metód**. Meranie výkonnosti sme realizovali na základe dát získaných z procesu výroby, a výrobného rozvrhu navrhnutého spoločnosťou, podľa ktorého prebehol výrobný proces v skúmanom období. Počas realizovaného výrobného procesu bolo zabezpečené sledovanie a zaznamenanie vhodných parametrov, ktoré sme využili pri ďalšej analýze. Pre každý z analyzovaných strojov bol realizovaný zber dát týkajúcich sa časov venovaných nastavbovým aktivitám a iným neplánovaným prestojom, teoretického a skutočného výkonu, počtu všetkých vyrobených výrobkov a počtu všetkých vyrobených výrobkov spĺňajúcich kvalitatívne požiadavky. Výrobný rozvrh spoločnosti obsahoval zoznam úloh s príslušným časom spracovania pridelených jednotlivým strojom, poradie spracovania a časový harmonogram realizácie jednotlivých úloh.

Za účelom merania výkonnosti skúmaného procesu sme navrhli využitie **ukazovateľa OEE**, ktorého relevantnosť potvrdilo viacero autorov, ako sme uviedli v prehľade literatúry. Ukazovateľ OEE zohľadňuje tri aspekty a to dostupnosť, výkonnosť a kvalitu, a súhrnne vyjadruje celkovú efektívnosť výrobného zariadenia.

Ukazovateľ OEE a jeho parciálne zložky budeme kalkulovať nasledovne:

$$OEE = D * V * K \quad (3.1)$$

kde:

$$\text{Dostupnosť (D)} = \frac{\text{Čas spracovania}}{(\text{Čas spracovania} + \text{prestavbový čas} + \text{čas neplánovaných prestojov})}$$

$$\text{Výkonnosť (V)} = \frac{\text{Skutočný výkon}}{\text{Teoretický možný výkon}}$$

$$\text{Kvalita (K)} = \frac{\text{Počet zhodných ks}}{\text{Celkový počet vyrobených ks}}$$

3. krok: „Analyze“ = Analyzuj

V treťom kroku sme analyzovali výsledky zistené v procese merania a identifikovali priestor na zlepšenie súčasného stavu.

4. krok: „Improve“ = Vylepši

Vo štvrtom kroku sme navrhli spôsob zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby s využitím vhodných metód.

5. krok: „Control“ = Kontroluj

V piatom kroku sme realizovali opätovné meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby po implementácii navrhovaných metód a vyhodnotili mieru zlepšenia.

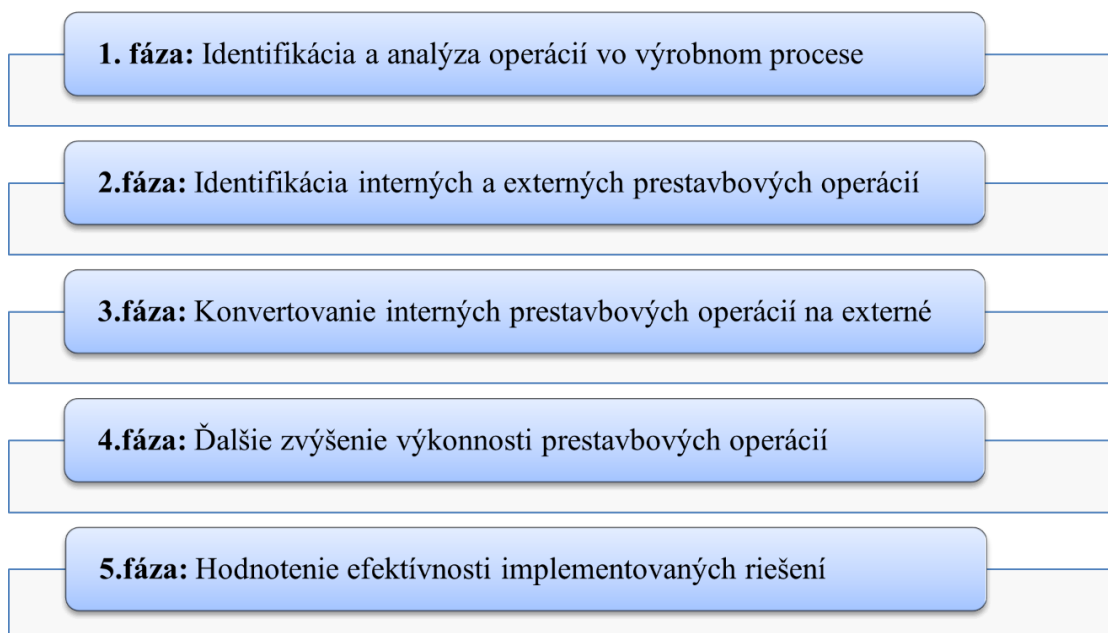
Za účelom potenciálneho zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby sme navrhli implementáciu metód štíhleho riadenia a metód modelovania. Meranie efektívnosti týchto metód sme realizovali s využitím ukazovateľa OEE.

3.1 Metóda SMED

V rámci **metód štíhleho riadenia** sme využili metódu **SMED**, pomocou ktorej sme navrhli spôsob redukcie interných prestavbových časov v procese výroby, a tým zvýšenie

dostupnosti strojov pre realizáciu ďalších výrobných objednávok. Zároveň sme odhadli potenciálnu ročnú úsporu nákladov pri implementácii navrhovaného zlepšenia.

Pri realizácii metódy SMED sme nasledovali kroky znázornené na Obr. 4.



Obr. 4 Fázy metódy SMED

Zdroj: vlastné spracovanie

3.2 Heuristické metódy

Po zoštíhlení procesu plánovania a rozvrhovania výroby sme pokračovali v ďalšom zvyšovaní jeho výkonnosti, a to s využitím **metód pre optimalizáciu procesu**. Matematickým zápisom **sme formulovali problém optimalizácie** rozvrhovania výroby v prostredí paralelných strojov. Tento problém patrí do kategórie NP-ťažkých problémov pri uvažovaní s dvoma a viac strojmi, preto sme na jeho riešenie využili **konštruktívny heuristický algoritmus**, ktorý pracuje na princípe postupného pridávania častí riešenia k pôvodnému riešeniu. V rámci každej iterácie algoritmu je pridelená priorita doposiaľ nerozvrhnutým úlohám, a postupným systematickým pridávaním úloh s najväčšou prioritou až po úlohy s najmenšou prioritou dochádza k vytváraniu výrobného rozvrhu. Tento algoritmus sme uplatnili na **súhrnné dáta týkajúce sa objednaného množstva daného typu výrobku pre skúmané obdobie**. Navrhli sme výrobu celého objednaného množstva daného typu výrobku na daný mesiac naraz, čo je v ďalšej časti práce označené pojmom „**súhrnná**“ výroba, vďaka ktorej bolo umožnené dosiahnuť **redukciu počtu prestavieb**. Za účelom definovania,

do akej miery existuje priestor pre ďalšiu redukciiu prestavieb a prestojov v skúmanej spoločnosti, sme kalkulovali v rámci myšlienky súhrnnej výroby ideálne celkové výrobné časy pre jednotlivé stroje spoločnosti za rok 2019. Ako ideálny čas pre daný stroj sme uviedli celkový ročný čas výroby na danom stroji, pričom sme nebrali do úvahy prestavby, plánované či neplánované prestoje. Takto vytvorené ideálne výrobné časy možno považovať za benchmark, ktorého následné porovnanie s reálnymi výrobnými časmi umožnilo identifikovať priestor na zlepšenie v zmysle ďalšej redukcie činností predstavujúcich mudu. Zároveň sme poukázali na skutočnosť, že myšlienka súhrnnej výroby nie je vhodná pri jej implementovaní na relatívne dlhé časové obdobie, a to z hľadiska potenciálnych nákladov na skladovanie. Pri uvažovaní s dlhším časovým horizontom sme navrhli kalkuláciu optimálnej výrobnéj dávky, po dosiahnutí ktorej by sa súhrnná výroba mala zastaviť, aby nevznikali dodatočné náklady na skladovanie.

Kalkuláciu **optimálnej veľkosti výrobnéj dávky** sme realizovali pre vybranú množinu strojov, pričom sme postupovali podľa nasledovného vzorca.

$$EBQ = \sqrt{\frac{(2 * Cs * D)}{(Ch (1 - (D/P)))}} \quad (3.2)$$

kde:

Cs = prestavbové náklady pre danú dávku (eur)

D = ročný dopyt (ks)

P = ročná výrobná kapacita (ks)

Ch = ročné náklady na skladovanie hotového výrobku (eur)

V ďalšom kroku sme kalkulovali počet prestavieb na vybraných strojoch po zohľadnení optimálnej dávky (P_{EBQ}) ako podiel celkového počtu jednotlivých výrobkov produkovaných na vybraných strojoch v danej spoločnosti za rok 2019 (D) a optimálnej výrobnéj dávky pre jednotlivé výrobky (EBQ).

$$P_{EBQ} = D/EBQ \quad (3.3)$$

Následne sme vyčíslili počet prestavieb dosiahnutých spoločnosťou v rámci vybraných strojov pri výrobe podľa reálneho rozvrhu (P_R) v roku 2019 a porovnali ho s počtom prestavieb po zohľadnení optimálnej dávky (P_{EBQ}). Týmto spôsobom sme identifikovali, do akej miery existoval priestor pre redukciu prestavbových časov v spoločnosti.

V ďalšej fáze návrhov pre potenciálne zlepšenie skúmaného procesu sme vzali do úvahy myšlienku súhrnných dát, ktoré predstavovali vstupné dáta pre realizáciu heuristiky. Od veľkosti optimálnej výrobnéj dávky sme však ďalej abstrahovali, keďže navrhované algoritmy sme uplatnili na relatívne krátke časové obdobie, ktorým bol jeden mesiac.

V rámci tejto práce sme prioritne uvažovali s **dvoma variantmi konštruktívneho heuristického algoritmu** v závislosti od zvolených **dispečerských prioritných pravidiel**, ktoré sa všeobecne využívajú pri problémoch rozvrhovania výroby.

Prvý variant navrhovaného algoritmu využíva **SPT dispečerské prioritné pravidlo** (angl. SPT = „Shortest Processing Time“ t. j. najkratší čas spracovania), na základe ktorého je priorita pridelená úlohe s najkratším časom spracovania. V rámci **prvého variantu algoritmu „SL=> ST“**, na najmenej vytiažený stroj v danom čase (SL = „smallest load“) **sme alokovali úlohu s najkratším časom spracovania** (ST = „shortest time“) z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

Druhý variant navrhovaného algoritmu využíva **LPT dispečerské prioritné pravidlo** (angl. LPT = „Longest Processing Time“ t. j. najdlhší čas spracovania), na základe ktorého je priorita pridelená úlohe s najdlhším časom spracovania. V rámci **druhého variantu algoritmu „SL=> LT“**, na najmenej vytiažený stroj v danom čase (SL = „smallest load“) **sme alokovali úlohu s najdlhším časom spracovania** (LT = „longest time“) z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

Naším cieľom bolo pomocou uvedených heuristických algoritmov nadviazať na výsledky metódy SMED a navrhnúť spôsob ďalšieho **zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby** prostredníctvom zvýšenia dostupnosti jednotlivých strojov. Zvýšením dostupnosti strojov je možné potenciálne dosiahnuť **zvýšenie výrobnéj kapacity pre prichádzajúce objednávky v blízkom časovom horizonte**, ako aj **vytvoriť priestor pre prijatie objednávok väčšieho objemu či variability**.

Výkonnosť procesu plánovania a rozvrhovania výroby po uplatnení navrhovaných algoritmov sme merali pomocou **ukazovateľa OEE**. Realizovali sme výpočet hodnôt ukazovateľa OEE pred uplatnením algoritmov (t. j. na základe získaných reálnych dát skúmanej

spoločnosti) a porovnali ich s hodnotami ukazovateľa OEE na základe výrobných rozvrhov zostavených pomocou jednotlivých variant konštruktívneho heuristického algoritmu, pričom sme uviedli aj synergický efekt, ktorý by bolo možné dosiahnuť implementáciou výsledkov jednotlivých algoritmov spolu s výsledkami analýzy pri použití metódy SMED. Súčasne sme porovnali dosiahnuté hodnoty ukazovateľa OEE s jeho ideálnymi hodnotami.

Konštruktívne heuristické algoritmy sú štandardne používané a validované v procese plánovania a rozvrhovania výroby. Sú tiež súčasťou viacerých hybridných heuristických či metaheuristických algoritmov, kde patrí aj algoritmus pre náhodné prioritné vyhľadávanie (Meta-RaPS), ktorého efektívnosť pri riešení uvedeného typu problému bola overená viacerými autormi v dostupnej literatúre (Rabadi a kol. 2006; Strohhecker a kol. 2016; Alharkan a Qamhan 2017; Ezugwu a Akutsah 2018).

Pri definovaní príslušného problému rozvrhovania a uplatnení jednotlivých krokov na riešenie konštruktívneho heuristického algoritmu s použitím matíc, sme sa v rámci tejto práce opierali o poznatky uvedené v publikácii autorov Rabadi a kol. (2006), pričom daný algoritmus sme modifikovali pre potreby nášho výskumu.

Rozdiely medzi algoritmom prezentovaným autormi Rabadi a kol. (2006) a algoritmom, ktorý sme navrhli pre účely nášho výskumu, a to z hľadiska uvažovaných predpokladov, cieľov resp. sledovaných ukazovateľov, a uplatňovanej logiky pri postupe, možno sumarizovať nasledovne podľa uvedených kritérií.

Porovnanie z hľadiska predpokladov:

- ***Kritérium 1: vhodnosť strojov pre spracovanie úloh***
 - autori Rabadi a kol. (2006) uvažovali s predpokladom, že každú úlohu je možné spracovať na všetkých disponibilných strojoch
 - v tejto práci sme uvažovali s predpokladom, že spracovanie konkrétnej úlohy je z technologického hľadiska možné realizovať len u určitej skupiny strojov v rámci všetkých disponibilných strojov
- ***Kritérium 2: dĺžka spracovania jednotlivých úloh***
 - autori Rabadi a kol. (2006) vzali do úvahy predpoklad, že dĺžka spracovania konkrétnej úlohy si vyžaduje určitý čas u každého zo strojov, ktorý závisí

od charakteru danej úlohy a charakteru daného stroja (nemusi byť preto u každého stroja rovnaký)

- v tejto práci sme vzali do úvahy predpoklad, že dĺžka spracovania konkrétnej úlohy si u všetkých strojov, u ktorých je spracovanie danej úlohy realizovateľné z technologického hľadiska, vyžaduje rovnaký čas, a ten sa rovná teoretickému času spracovania, ktorý definujeme nasledovne:
 - teoretický čas spracovania (Tt_{ik}) pre konkrétnu úlohu (výrobok) i na konkrétnom stroji k sme kalkulovali na základe informácií o objednanom množstve jednotlivých výrobkov (úloh) (Q_i) vo vybranej spoločnosti s dodacou lehotou v mesiaci január v roku 2019, pričom objednávky boli známe mesiac vopred, o plánovanom čase cyklu (Ct_{ik}) a počte dutín na forme stroja (D_k) zvoleného pre daný typ výrobku, ako uvádzame v nasledovnom vzorci:

$$Tt_{ik} = Q_i * Ct_{ik}/D_k \quad (3.4)$$

- ***Kritérium 3: dĺžka prestavbových časov medzi spracovaním jednotlivých úloh***

- autori Rabadi a kol. (2006) vzali do úvahy dĺžku prestavbových časov medzi spracovaním jednotlivých úloh, pričom zohľadnili dĺžku prestavbových časov v závislosti na poradí, v akom došlo k spracovaniu úloh na jednotlivých strojoch; realizovali kalkuláciu dĺžky tzv. upraveného času spracovania, ktorý sa rovnal súčtu dĺžky spracovania a prestavbového času medzi spracovaním danej a predchádzajúcej úlohy; takto upravené časy spracovania predstavovali vstupné dáta ďalej zapísané v podobe matic
- v tejto práci sme prestavbové časy nezahrnuli do algoritmu, ale vzali sme ich do úvahy až pri analýze po ukončení algoritmu; v spoločnosti, ktorú sme si zvolili na implementáciu navrhovaných riešení, sa dĺžka prestavbových časov pre každý z individuálnych strojov doposiaľ nesledovala; je však možné využiť všeobecný odhad dĺžky prestavbových časov a považovať ho za totožný pre každý stroj - dĺžka prestavbových časov by tak na výsledky algoritmu nemala významný vplyv; taktiež, početnosť a dĺžku prestavbových časov je možné redukovať s využitím vhodných metód a nástrojov, uvádzaných aj

v rámci tejto práce (metóda SMED, súhrnná výroba, heuristické algoritmy); z týchto dôvodov sme pri navrhovaní vybraného algoritmu abstrahovali od tohto faktora

Porovnanie z hľadiska cieľov resp. sledovaných ukazovateľov:

- autori Rabadi a kol. (2006) ako cieľ optimalizácie definovaného problému rozvrhovania, následne riešeného heuristickým algoritmom, ktorý poskytuje riešenie blížiacie sa k optimálnemu riešeniu, uviedli minimalizáciu maximálneho času spracovania, t. j. makespanu
- v kontexte tejto práce sme ako cieľ optimalizácie definovaného problému rozvrhovania, následne riešeného heuristickým algoritmom, ktorý poskytuje riešenie blížiacie sa k optimálnemu riešeniu, uviedli taktiež minimalizáciu maximálneho času spracovania, t. j. makespanu pre dáta, s ktorými algoritmus pracuje; pre porovnanie výkonnosti výsledného riešenia v podobe výrobného rozvrhu s riešením pred realizáciou algoritmu (na základe výrobného rozvrhu vytvoreného v skúmanej spoločnosti pri uplatnení empirického prístupu a intuície), použitie ukazovateľa makespan ako kritéria sme však nepovažovali za vhodné; dôvodom je, že v skúmanej spoločnosti sa celé objednané množstvo daného typu výrobku nevyrobilo vždy naraz, ale častokrát sa vyrábalo po častiach, v rámci jedného alebo viacerých strojov (napr. objednávka na 10 kľúčiek sa nevyrobila na určitom stroji naraz, kým došlo k prechodu na výrobu vzťahujúcu sa k inej objednávke, ale vyrobili sa na danom stroji 4 kľučky, následne 3 zámkové mechanizmy, následne 3 kľučky, a na inom stroji sa vyrobili zvyšné 3 kľučky); v rámci algoritmov, ktoré sme použili v tejto práci, sme však za účelom redukcie počtu prestavbových aktivít navrhli použitie súhrnných dát (keďže redukciou počtu prestavbových aktivít možno dosiahnuť zvýšenie hodnoty ukazovateľa OEE, ktorý sledujeme); vzali sme teda do úvahy výrobu celého mesačného objednaného množstva daného typu výrobku naraz na určitom stroji; z tohto dôvodu použitie kritéria makespan na porovnanie výkonnosti nie je relevantným ukazovateľom; preto sme pri uvedenom porovnaní v našom prípade navrhli použitie ukazovateľa OEE

Porovnanie z hľadiska uplatňovanej logiky pri postupe:

Kritérium 1: zvolené dispečerské prioritné pravidlo a logika algoritmu

- autori Rabadi a kol. (2006) pri navrhovanom algoritme uplatnili logiku $SAP \Rightarrow SL$, v rámci ktorej bola úloha s najkratším upraveným časom spracovania alokovaná na najmenej vyťažený stroj v danom čase
- v rámci tejto práce sme pri prioritne navrhnutých dvoch variantoch algoritmu uplatnili logiku „ $SL \Rightarrow ST$ “ / „ $SL \Rightarrow LT$ “, v rámci ktorej bola na najmenej vyťažený stroj v danom čase alokovaná úloha s najkratším / najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať (logika pre ďalšie navrhnuté varianty algoritmu je objasnená v kapitole „Výsledky práce a diskusia“)
 - ak by sme len alokovali postupne úlohy s najkratším / najdlhším časom spracovania, existuje opodstatnený predpoklad, že by nebola možná ich alokácia na najmenej vyťažený stroj v danom čase, keďže sme vzali do úvahy obmedzenie, že danú úlohu bolo možné vykonať len na niektorých strojoch z dostupnej množiny strojov

• **Kritérium 2: vhodnosť strojov pre spracovanie úloh z hľadiska priority**

- autori Rabadi a kol. (2006) abstrahovali od uvažovania s vhodnosťou strojov z hľadiska ich priority
- v tejto práci sme vzali do úvahy vhodnosť strojov z hľadiska ich priority stanovenej technológmi spoločnosti, avšak len v prípade, že v priebehu algoritmu boli v danom čase minimálne zaťažené viaceré stroje, medzi ktorými bolo potrebné sa rozhodnúť; táto situácia v našom prípade nastala napríklad pred začiatkom tvorby výrobného rozvrhu, kedy boli všetky stroje dostupné v maximálnom rozsahu z hľadiska času, t. j. ich kapacity boli v časovom vyjadrení vyťažené na 0 sekúnd, t. j. všetky dostupné stroje spĺňali kritérium minimálneho vyťaženia v danom čase; preto sme v rámci prvej iterácie vyberali úlohu s najkratším časom spracovania (pri SPT pravidle) / s najdlhším časom spracovania (pri LPT pravidle) a tú alokovali na stroj s najväčšou „technologickou“ prioritou pre spracovanie danej konkrétnej úlohy; podobne

sme postupovali pri realizácii ďalších iterácií v prípade, že viaceré stroje zodpovedali kritériu minimálneho zaťaženia v danom čase; priorita bola v tomto prípade stanovená technológmi skúmanej spoločnosti, a to na základe počtosti skúšok realizovaných v predvýrobnej fáze daných výrobkov pri zohľadnení obmedzení týkajúcich sa charakteru strojov (veľkosť pracovného priestoru lisu vzhľadom na veľkosť potrebnej formy, uzatváracia sila lisu, objem šnekovacej komory lisu, vybavenosť lisu robotickým manipulátorom, periférnymi zariadeniami a pristavanou linkou); ak kritériu minimálneho zaťaženia v danom čase zodpovedal práve jeden stroj, vybrali sme tento stroj a alokovali naň úlohu s najkratším (pri SPT pravidle) / s najdlhším časom spracovania (pri LPT pravidle) z množiny úloh, ktoré bolo na danom stroji možné spracovať z technologického hľadiska

- v rámci tejto práce sme abstrahovali od uvažovania s prioritou jednotlivých úloh, keďže sme vzali do úvahy predpoklad, že objednávky s požadovaným termínom dodania v danom mesiaci boli známe mesiac vopred

- ***Kritérium 3: spôsob zápisu vstupných dát***

- autori Rabadi a kol. (2006) využili maticový zápis vstupných dát, ktorý je vhodný pri zohľadnení uvedených predpokladov (dĺžka spracovania konkrétnej úlohy závisí od charakteru danej úlohy a daného stroja; dĺžka prestavbových časov závisí na poradí, v akom dochádza k spracovaniu úloh na jednotlivých strojoch)
- v rámci algoritmu, ktorý používame v tejto práci, sme abstrahovali od uvažovania s nesúvzťažnými strojmi (pri ktorých dĺžka spracovania konkrétnej úlohy závisí od charakteru danej úlohy a daného stroja) a s prestavbovými časmi (ako aj so skutočnosťou, že prestavbové časy závisia na poradí); z tohto dôvodu je možné pre každú z úloh určiť fixný čas potrebný na jej spracovanie, a preto postačuje aj zjednodušený zápis takého typu problému (napr. do jedného stĺpca v rámci Ms Excel); na takto zapísané dáta je následne možné uplatniť uvedený algoritmus a získať výsledky v krátkom čase, a to aj manuálne, v prípade, že spoločnosť nedisponuje vhodným softvérom alebo vhodne vypracovaným algoritmom riešeným výpočtovou technikou;

v našom prípade okrem zjednodušeného zápisu vstupných údajov sme využili aj maticový zápis navrhnutý v algoritme od autorov Rabadi a kol. (2006); v tejto práci sme overili oba spôsoby realizácie navrhovaného algoritmu, pričom sme využili spôsob manuálnych výpočtov v Ms Excel a výsledky preverili aj s využitím výpočtovej techniky pre navrhovaný princíp algoritmu; maticový zápis predstavuje viac všeobecný spôsob zápisu vstupných dát algoritmu, ktorý umožňuje zohľadniť dĺžku prestavbových časov, ako aj závislosť dĺžky prestavbových časov na poradí spracovania jednotlivých úloh na daných strojoch; v rámci navrhovaných odporúčaní sme uviedli, že v prípade, že skúmaná spoločnosť bude v budúcnosti tieto dáta týkajúce sa dĺžky prestavbových časov podrobne sledovať, je možné tieto dáta zohľadniť pri maticovom zápise algoritmu;

V našom prípade sme uvedený algoritmus realizovali na podmienkach vybranej spoločnosti. Uvažovali sme s 25 strojmi ($k = 25$), na ktorých bolo potrebné v priebehu januára 2019 rozvrhnúť 72 úloh ($n = 72$). Každá z úloh pritom predstavovala výrobu jedného typu výrobku v rámci jednej realizovanej objednávky. Tab. 3 zobrazuje počiatočný maticový zápis vstupných dát pre jeden vybraný stroj M_1 , pred realizáciou prvej iterácie algoritmu. Matica $[P]_1$ zobrazuje časy spracovania jednotlivých úloh na stroji M_1 v sekundách, pričom berie do úvahy len tie úlohy, ktorých spracovanie je na danom stroji realizovateľné z hľadiska technologických parametrov. Prvý riadok a stĺpec matice predstavuje úlohy, ktoré sa majú na jednotlivých strojoch vykonať. Napr. súradnice riadka a stĺpca v tomto poradí $[0;12]$ označujú, že úloha s por. č.12 sa vykoná ako prvá (po úlohe s por. č.0). Priesečník týchto dvoch súradníc vyjadruje, za aký čas sa vykoná úloha s por. č.12, ak sa vykoná ako prvá v poradí na danom stroji. Napr. čas spracovania úlohy s por. č.12 je vyčíslený na 456 840 sekúnd, a to v prípade, že úloha s por. č.12 je vo výrobnom rozvrhu rozvrhnutá ako prvá, ale aj v prípade, že nasleduje po nejakej z úloh s por. č. 17, 30, 31, 32, 33, 34, 35 alebo 72.

Tab. 3 Maticový zápis vstupných dát pre stroj M1

M₁	12	17	30	31	32	33	34	35	72	MIN
0	456840	63000	47520	23513	11880	12240	388640	3050	28405	3050
12	-	63000	47520	23513	11880	12240	388640	3050	28405	3050
17	456840	-	47520	23513	11880	12240	388640	3050	28405	3050
30	456840	63000	-	23513	11880	12240	388640	3050	28405	3050
31	456840	63000	47520	-	11880	12240	388640	3050	28405	3050
32	456840	63000	47520	23513	-	12240	388640	3050	28405	3050
33	456840	63000	47520	23513	11880	-	388640	3050	28405	3050
34	456840	63000	47520	23513	11880	12240	-	3050	28405	3050
35	456840	63000	47520	23513	11880	12240	388640	-	28405	11880
72	456840	63000	47520	23513	11880	12240	388640	3050	-	3050

Zdroj: vlastné spracovanie

Kroky navrhovaného konštruktívneho heuristického algoritmu možno sumarizovať nasledovne:

- 1) definujeme množinu strojov, na ktorých je možné spracovať jednotlivé typy úloh, t. j. vyrobiť jednotlivé typy výrobkov, pričom uvádzame aj priority z hľadiska strojov pri jednotlivých úlohách;
- 2) vyberáme stroj vyťažný na minimum a alokujeme naň úlohu s najkratším (pri SPT pravidle) / najdlhším (pri LPT pravidle) časom spracovania; v prípade, že existuje viacero strojov, ktoré sú rovnako vyťažné na minimum, vyberáme stroj, ktorý dokáže spracovať úlohu s najkratším (pri SPT pravidle) / najdlhším (pri LPT pravidle) časom spracovania a v prípade, že je takýchto strojov viacero, vyberáme spomedzi nich stroj, ktorý má pre spracovanie danej úlohy najväčšiu prioritu;

(v prípade maticového zápisu vyberáme minimálnu / maximálnu dĺžku času spracovania z riadka s indexom nula z množiny všetkých vytvorených matíc, pričom každý stroj predstavuje jednu maticu); predpokladáme, že na začiatku nie je vyťažený žiaden stroj, t. j. že je k dispozícii 100 %-ná kapacita každého stroja, tzn., že najmenej vyťažené sú všetky stroje, s ktorými uvažujeme (kapacitu stroja vyjadrujeme v časových jednotkách);

- 3) nájdené minimum (pri SPT pravidle) / maximum (pri LPT pravidle) bude predstavovať čas, ktorým v úvode vyťažíme zodpovedajúci stroj; priebežne kalkulujeme kumulatívnu vyťaženú kapacitu na jednotlivých strojoch;
- 4) v matici stroja, ktorý sme v kroku 4 vyťažili danou úlohou, následne eliminujeme stĺpec j , v ktorom sa nachádza čas spracovania danej úlohy a príslušný riadok, v ktorom sa nachádza čas spracovania danej úlohy;
- 5) v matici ostatných strojov následne eliminujeme stĺpec j a riadok j ;
- 6) danú úlohu následne odstránime z množiny úloh, ktoré sa majú vykonať;
- 7) ak nie sú rozvrhnuté všetky úlohy z množiny úloh, vrátime sa na krok 3; inak sme získali plán rozvrhovania výroby;

Vo výsledkovej časti tejto práce zároveň navrhujeme štyri ďalšie obmeny konštruktívneho heuristického algoritmu a sledujeme potenciálne výsledky pri ich implementácii do procesu plánovania a rozvrhovania výroby.

V rámci ďalšej fázy sme sa zamerali na splnenie tretieho parciálneho cieľa, ktorým bol návrh implementácie a overenie navrhovaného modelu v podmienkach vybranej slovenskej spoločnosti, ktorá je dodávateľom pre automobilový priemysel. Realizovali sme zber informácií o vybranom podniku týkajúcich sa jeho základných charakteristík, výrobných činností a manažérskych rozhodnutí na operatívno-taktickej úrovni vstupnej logistiky so zameraním na proces plánovania a rozvrhovania výroby, pričom sme využili vedecké metódy ako **neštandardizované pozorovanie** a **interview**, a **obsahovú analýzu interných dokumentov spoločnosti**. Realizovali sme rozhovory s predstaviteľmi spoločnosti týkajúce sa existujúcich procesov s dôrazom na proces plánovania a rozvrhovania výroby, a pozorovali ich pri tvorbe výrobného rozvrhu. Metódu pozorovania sme využili aj pri oboznámení sa s výrobným procesom spoločnosti. Identifikovali sme neefektívnosť v rámci tohto procesu v súvislosti s dĺžkou prestavbových časov. Vykonali sme tiež analýzu interných dokumentov spoločnosti, vrátane rozvrhov výroby vytvorených v spoločnosti za skúmané obdobie a databáz výrobných

příkazov za dané obdobie poskytujúcich dáta týkajúce sa parametrov výrobného procesu z hľadiska dĺžky jeho trvania, prideleného stroja, výkonu či kvality.

Za účelom splnenia štvrtého parciálneho cieľa, ktorým bolo zhrnutie poznatkov a prínosov výskumu pre vedu, prax a študijný odbor Ekonomika a manažment podniku, sme využili **generalizáciu** ako vedeckú metódu.

V nasledujúcej časti sme predstavili podnik, v ktorom implementujeme prezentované návrhy v zmysle stanovených cieľov a s využitím uvedených metód.

3.3 Charakteristika vybraného podniku

Výrobný proces

Pre implementáciu navrhovaného modelu sme si vybrali slovenskú spoločnosť, ktorá je dodávateľom do automobilového priemyslu. Ide o rodinný podnik pôsobiaci na trhu viac ako 25 rokov, ktorý patrí do kategórie malých a stredných podnikov. Primárne sa zameriava na produkciu plastových dielov pre automobilový priemysel prostredníctvom metódy injekčného vstrekovania. Injekčné vstrekovanie je metóda formovania plastov za pôsobenia teploty a tlaku, pri ktorej sa roztavený granulát vstrekuje do dutiny formy v tvare budúceho výlisku. Obr. 5 zobrazuje proces vzniku plastového výlisku.



Obr. 5 Metóda injekčného vstrekovania plastov

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020

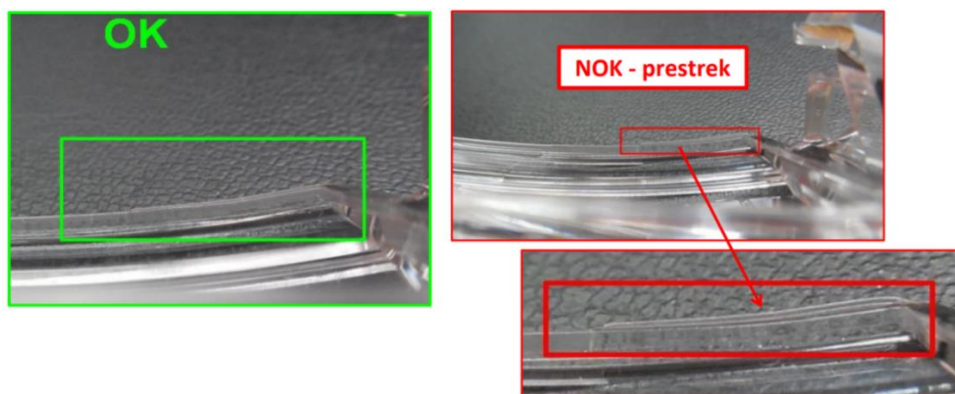
Okrem lisovne, kde prebieha injekčné vstrekovanie plastov na jednotlivých strojoch, spoločnosť disponuje aj vlastnou nástrojárnou, kde dochádza k dizajnu a výrobe výrobných foriem, vďaka čomu môže spoločnosť komplexne plniť požiadavky zákazníkov. Zákazníci

spoločnosti sú svetovými lídrami vo sfére automobilového a elektrotechnického priemyslu. Spoločnosť pre nich dodáva technicky zložité výlisky, ako kľučky, zámkové mechanizmy či časti svetiel automobilov. Pre elektrotechnický priemysel sú to napríklad statory, rotory, ventilátory, čerpadlové skrine, a i. Poslaním spoločnosti je reagovať dostatočne rýchlo a flexibilne na požiadavky svojich zákazníkov pri súčasnom efektívnom využívaní dostupných zdrojov. Dodávaním produktov v dohodnutých množstvách, kvalite, čase a splnením iných dohodnutých dodacích podmienok sa spoločnosť usiluje udržať si reputáciu spoľahlivého dodávateľa na domácom a zahraničnom trhu, a tiež nadviazať spoluprácu s inými zákazníkmi a tým zvýšiť svoju konkurencieschopnosť. S pomocou skúsenej a kvalifikovanej pracovnej sily a s využitím moderných technológií vo výrobe sa spoločnosť snaží neustále zvyšovať kvalitu vyrábaných produktov. Jej víziou je neustále zlepšovať procesy v rámci celého podniku, čo je hlavnou podstatou japonskej filozofie Kaizen.

Strojový park

Spoločnosť vyrába svoje výrobky na CNC strojoch renomovaných výrobcov, ktoré sú pripojené k centrálnemu serveru. Montáž a nastavovanie vyrábaných nástrojov vykonáva skúsený personál, ktorý sa zameriava na všetky detaily tak, aby výsledný plastový výlisk spĺňal všetky definované kvalitatívne požiadavky. Spoločnosť vyrába plastové výlisky na nástrojoch pomocou hydraulických a elektrických vstrekovacích lisov. Každý lis je vybavený automatickým nasávaním materiálu a sušičkou. Disponuje tiež prístrojmi na presné dávkovanie farieb a iných prísad. Väčšina strojov je vybavená reguláciou teplej trysky.

Strojový park oddelenia lisovne spoločnosti sa skladá z **25 vstrekovacích lisov**, ktoré vyrábajú paralelne. Vstrekovacie lisy sú rôznych veľkostí s uzatváracou silou (t. j. silou potrebnou na uzatvorenie výrobnej formy) v rozmedzí od 33 ton do 650 ton. Podľa veľkosti výrobnej formy a požadovanej uzatváracej sily sú pridelované pre výrobný proces vstrekovania najvhodnejšie lisy v záujme dosiahnutia požadovanej kvality výrobku. Ak nie je uzatváracia sila lisu dostatočne veľká na to, aby natesno uzatvorila formu, na výlisku by došlo k vzniku tzv. prestrekov. Obr. 6 ilustruje zhodný výrobok v porovnaní s nezhodným výrobkom z dôvodu vzniku prestrekov.



Obr. 6 Prestrek

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020

Niektoré vstrekovacie lisy (5 z 25) sú dedikované len pre určitý typ výrobku z dôvodu vysokej technickej náročnosti daného výrobku a potreby zabezpečenia dostatočnej lisovacej kapacity, keďže ide o strategické výrobky z hľadiska obratu spoločnosti. Ostatné lisy sú zdieľané pre viaceré výrobky s podobnými nárokmi na procesné a strojové zabezpečenie ich výroby. Spoločnosť disponuje vo väčšine prípadov aspoň dvoma lisovacími strojmi vhodnými pre daný typ výrobku, vďaka čomu je možné vyrábať daný výrobok paralelne v prípade objednávok veľkého objemu alebo pri vyššej miere vytťaženia alebo poruche jedného zo strojov využiť alternatívny stroj a splniť tak výrobné objednávky včas a v požadovanej kvalite. Výroba prebieha paralelne na rôznych strojoch, na ktorých dochádza k vykonaniu jednej výrobnej operácie, a to zhotoveniu plastového výlisku. Potreba ľudskej sily je rôzna v závislosti od typu konkrétneho stroja. Väčšina lisov je vybavená dvojosím manipulátorom – robotickým ramenom s chápateľom, ktoré odoberá výlisky z formy pri jej otvorení po každom cykle a ukladá ich na pásový dopravník. Pracovník následne vykonáva ďalšiu manipuláciu s daným výrobkom, ktorá sa týka umiestnenia výrobku do krabice, jeho váženia, označovania, kontroly kvality, balenia, atď. Zvyčajne jeden pracovník obsluhuje dva lisy. Obr. 7 zobrazuje príklad výrobných strojov v danej spoločnosti. Na Obr. 8 je zobrazený príklad výrobných foriem. Na Obr. 9 sa nachádzajú vybrané výrobky spoločnosti. Obr. 10 zobrazuje príklad výrobnej formy a vzniknutého výlisku.



Obr. 7 CNC stroje

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020



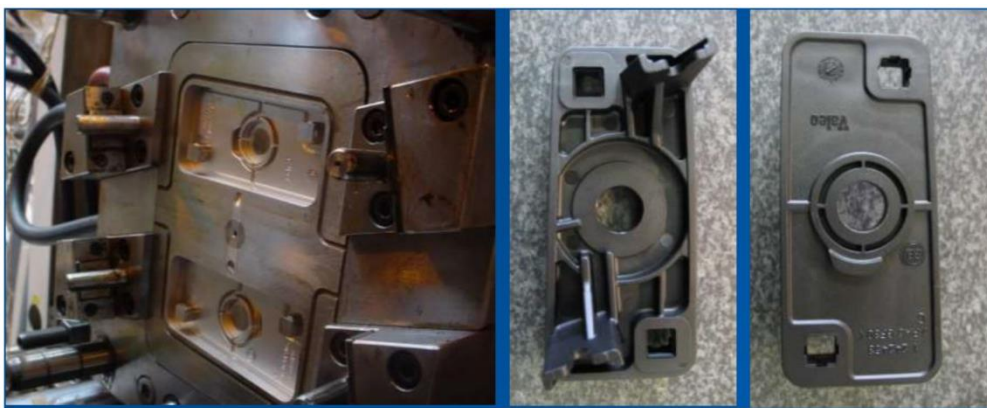
Obr. 8 Formy

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020



Obr. 9 Výlisky

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020



Obr. 10 Forma a výlisok

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020

Prestavby v rámci výrobného procesu

Prestavby predstavujú aktivity venované príprave výmeny zariadenia, stroja alebo systému. Prestavbový čas je definovaný ako čas, ktorý uplynie od výroby posledného zhodného výrobku poslednej výrobnnej dávky až po výrobu prvého zhodného výrobku novej výrobnnej dávky. V rámci každej prestavby výrobného procesu vybraného podniku sú vykonávané činnosti ako výmena vstrekovacieho nástroja, nastavenie periférneho chladiaceho zariadenia a robotického manipulátora, príprava vhodnej suroviny, a i. Všetky tieto operácie si vyžadujú relatívne dlhé prestavbové časy, ktoré však nie sú explicitne uvedené v rámci zostavených výrobných rozvrhov. Výrobný rozvrh pozostáva z výrobného plánu pre jednotlivé zmeny, ale nie je rozčlenený na hodinové plány s konkrétnymi prestavbovými časmi a z tohto dôvodu sú časy trvania prestavby len odhadované. Tento odhad však môže byť nepresný, čo môže mať nepriaznivý vplyv na výkonnosť procesu. Pri väčšine výrobných foriem využívaných v danej spoločnosti možno odhadnúť **priemernú dĺžku prestavbového času**, t. j. času potrebného na prechod od výroby posledného zhodného výrobku poslednej výrobnnej dávky k výrobe prvého zhodného výrobku novej výrobnnej dávky, **na približne 180 minút**. Tento odhad však môže byť nepresný z dôvodu špecifických vlastností jednotlivých foriem týkajúcich sa ich rozmeru, hmotnosti, komplikovanosti zapojenia periférnych zariadení atď., a teda je tu priestor na zlepšenie v zmysle zvýšenia presnosti v procese plánovania a rozvrhovania, čo má potenciál prejavíť sa v zvýšení celkovej výkonnosti procesu.

Proces plánovania a rozvrhovania výroby

Spoločnosť, ktorú sme si zvolili pre implementáciu navrhovaného modelu, funguje v režime práce na tri zmeny (na Obr. 11 ozn. R = ranná zmena; P = poobedná zmena; N = nočná zmena), štandardne po dobu piatich dní v týždni, v prípade potreby navýšenia objemu vyrábaného množstva pre vybrané výrobky aj počas víkendu. Spoločnosť vykonáva prognózy dopytu raz ročne - koncom roka sa dohodnú so zákazníkmi ročné kvóty, ktoré sa v priebehu roka spresňujú na mesačnej báze. Vzhľadom na relatívne dlhú dodaciu lehotu (6-12 týždňov), suroviny a komponenty musia byť objednávané v dostatočnom predstihu tak, aby boli dostupné na sklade v čase, kedy sa zostavuje týždenný rozvrh výroby. Na základe potvrdeného a upresneného objemu objednávok na konkrétny týždeň v danom mesiaci dochádza v spoločnosti raz týždenne k plánovaniu a rozvrhovaniu výroby spoločne manažérom výroby a logistiky. Výstupom tohto procesu je výrobný rozvrh pre každý deň v týždni. Príklad konkrétneho výrobného rozvrhu spoločnosti z 1. kalendárneho týždňa z roku 2019 je znázornený na Obr. 11. V rámci zobrazovaného týždňa nie sú uvedené údaje za utorok, keďže bol sviatočným dňom. V rozvrhu sú zobrazené jednotlivé výrobné príkazy A, B, ... Z.

Lis	PONDELOK			STREDA			ŠTVRTOK			PIATOK			VÍKEND		PONDELOK		
	R	P	N	R	P	N	R	P	N	R	P	N	So	Ne	R	P	N
L1				A	A	A	A	A	A	A	A	A			A	A	A
L2				B	B	B	B	B	B	B	B	B			B	B	B
L3				C	C	C	C	C	C	C	C	C			C	C	C
L4	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	údržba	D	D
L5	zhod'			CH	E	E	E	E	E	E	E	E			E	E	E
L6	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
L7	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
L8				H	H	H	H								H	H	H
L9	nahod'						I	I		I	I		nahod'		J		
L10				K	K	K	K	K	K	K	K	K			K	K	K
L11	nahod'				L		L			M					N		
L12															O		
L13													nahod'				
L14																	
L15	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L16	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
L17	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
L18	nahod'			T	T	T	T	T	T	T	T	T	nahod'		T	T	T
L19	U	U	nahod'	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
L20	nahod'			V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
L21	nahod'			W	W	W	W	W	W	W	W	W			W	W	W
L22				X	X	X	X	X	X	X	X	X	nahod'		X	X	X
L23				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y			Y	Y	Y
L24	nahod'			Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
L25							Z	Z	Z	Z	Z	Z			Z	Z	Z

Legenda vymien form y					
	nutná výmena		rozbeh OK		rozbeh N OK
	plánovaná výmena		skúska		technolog
	znovu rozbehnutie				
	masa prelisovať				

Obr. 11 Výrobný rozvrh spoločnosti

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020

Priebeh výrobného procesu je v prevádzke zobrazovaný v reálnom čase prostredníctvom obrazovky (tzv. „tracker“). Príklad trackera je znázornený na Obr. 12.



Legenda:

- - výroba „beží“ podľa rozvrhu
- - výroba „beží“ rýchlejšie ako rozvrh
- - výroba „beží“ pomalšie ako rozvrh
- - výroba je pozastavená z dôvodu porúch
- - výroba na danom stroji „nebeží“

Obr. 12 Tracker

Zdroj: Interné dokumenty spoločnosti, 2020

Pri pozorovaní procesu plánovania a rozvrhovania výroby v spoločnosti sme identifikovali proces prijímania rozhodnutí ako záležitosť intuície a empirického prístupu kompetentných pracovníkov, vychádzajúci z ich dlhoročných praktických skúseností, ktoré nadobudli pri práci v danom podniku. Zohľadňujú pritom aktuálne informácie o cene produktov, nákladoch, prioritě jednotlivých objednávok z hľadiska dôležitosti daného zákazníka, kapacity strojov, zariadení a pracovnej sily, a i. V procese plánovania a rozvrhovania výroby spoločnosť vôbec nevyužíva optimalizačné a iné sofistikované podporné metódy a techniky. Disponuje síce customizovanými softvérovými nástrojmi slúžiacimi na evidenciu objednávok, úrovne zásob na sklade, kapacít jednotlivých zdrojov, a i., avšak tieto nástroje neobsahujú možnosti optimalizácie či simulácie procesov. Príležitosti na zlepšenie identifikujeme v oblasti nahradenia intuitívneho a empirického rozhodovania rozhodovaním založenom na systematickom prístupe s využitím metód štíhleho manažmentu a sofistikovaných optimalizačných metód.

4 Výsledky práce

V metodologickej časti sme za účelom merania a zvyšovania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby navrhli postupovať v súlade s DMAIC cyklom. V nasledujúcej časti prezentujeme dosiahnuté výsledky v rámci jednotlivých definovaných fáz cyklu DMAIC.

4.1 Vstupné dáta

V rámci prvého kroku DMAIC cyklu sme definovali dáta vstupujúce do procesu plánovania výroby, týkajúce sa prijatých objednávok od zákazníka, ako aj disponibilných zdrojov spoločnosti. Uvažovali sme s predpokladom, že všetky výrobné objednávky, ktoré spoločnosť realizovala v mesiaci január 2019, boli známe mesiac vopred. Preto sme v procese plánovania abstrahovali od uvažovania s dátumom prijatia a požadovaným termínom dodania objednávky. Každú objednávku na konkrétny výrobok s realizáciou v rámci mesiaca január sme v ďalšej analýze považovali za jednu úlohu, ktorú bolo potrebné spracovať.

Vlastnosti každej úlohy možno charakterizovať ako usporiadanú n-ticu:

{Identifikačné číslo úlohy; Veľkosť objednávky (ks); Dĺžka výr. cyklu (s); Počet dutín na forme; Čas spracovania (s); Stroj s prioritou1, Stroj s prioritou2, ...}

Konkrétne hodnoty vstupných dát reprezentujúcich jednotlivé úlohy spoločnosti s realizáciou v mesiaci január 2019 (celkový počet úloh: 72), s ktorými sme pracovali v ďalšej analýze, možno zapísať v zmysle uvedenej usporiadanej n-tice nasledovne:

{1; 81600; 18,5; 4; 377400; M10; M11; M14; M15; M16; M19}
{2; 15000; 23; 4; 86250; M9; M10; M11; M14; M15; M20}
{3; 16000; 53,5; 4; 214000; M21; M22}
{4; 11520; 42; 4; 120960; M19; M20; M21; M22}
{5; 197640; 30; 4; 1482300; M15; M16}
{6; 199680; 38; 4; 1896960; M13}
{7; 280000; 14; 4; 980000; M3; M4; M5; M6}
{8; 301600; 17,5; 6; 879667; M3; M7; M10}
{9; 91800; 30; 4; 688500; M15; M16; M23}
{10; 114752; 55,5; 4; 1592184; M23}
{11; 156000; 39; 6; 1014000; M22}
{12; 8460; 54; 1; 456840; M25; M1}
{13; 123200; 54; 8; 831600; M17; M19; M16}
{14; 92342; 81,5; 4; 1881468; M23; M24}
{15; 4713; 65; 1; 306345; M18; M25}
{16; 183000; 25; 12; 381250; M9; M10; M11}

{17; 1000; 63; 1; 63000; M1}
 {18; 936; 23; 1; 21528; M8}
 {19; 2370; 20; 1; 47400; M8}
 {20; 7200; 22,5; 1; 162000; M14}
 {21; 1080; 22; 1; 23760; M14}
 {22; 1680; 21; 1; 35280; M14}
 {23; 39190; 67,5; 1; 2645325; M19; M20; M17}
 {24; 5146; 73,5; 1; 378231; M20}
 {25; 52000; 32; 8; 208000; M6; M7}
 {26; 19090; 32; 4; 152720; M8; M18; M20}
 {27; 228000; 27,5; 8; 783750; M7}
 {28; 51000; 20,5; 4; 261375; M2; M7}
 {29; 89200; 29; 2; 1293400; M21}
 {30; 960; 49,5; 1; 47520; M1}
 {31; 475; 49,5; 1; 23513; M1}
 {32; 240; 49,5; 1; 11880; M1}
 {33; 240; 51; 1; 12240; M1}
 {34; 6940; 56; 1; 388640; M21; M1}
 {35; 305; 10; 1; 3050; M1}
 {36; 20000; 24; 4; 120000; M7; M10; M11; M12; M20}
 {37; 168900; 36; 8; 760050; M8; M10; M11}
 {38; 150000; 30; 8; 562500; M8; M11; M12; M14; M19}
 {39; 150000; 28; 8; 525000; M8; M11; M12; M14; M19}
 {40; 340000; 24,5; 24; 347083; M10; M11}
 {41; 340000; 45; 24; 637500; M9; M10}
 {42; 544000; 33,5; 16; 1139000; M9}
 {43; 411000; 24; 16; 616500; M18; M11}
 {44; 246000; 25; 16; 384375; M18; M11}
 {45; 1000; 23; 1; 23000; M14}
 {46; 2160; 22; 1; 47520; M14}
 {47; 540; 21; 1; 11340; M14}
 {48; 1050; 21; 1; 22050; M14}
 {49; 8695; 10,5; 2; 45649; M2; M3}
 {50; 1000; 22; 1; 22000; M14}
 {51; 22980; 49; 2; 563010; M8; M9; M11; M14; M17}
 {52; 510000; 11,5; 8; 733125; M2; M4}
 {53; 1800; 15; 4; 6750; M4; M5; M7; M12}
 {54; 1800; 19,5; 4; 8775; M3; M4}
 {55; 118800; 22,5; 8; 334125; M12}
 {56; 120000; 21,5; 4; 645000; M10; M12}
 {57; 150500; 28; 4; 1053500; M18; M19; M20}
 {58; 60000; 10; 8; 75000; M2; M5}
 {59; 35000; 24; 4; 210000; M2; M7}
 {60; 20000; 17; 8; 42500; M2; M7}
 {61; 276000; 28; 16; 483000; M2; M3; M4; M7}
 {62; 72800; 31,5; 4; 573300; M10; M12}
 {63; 70200; 24; 4; 421200; M10; M12}
 {64; 22560; 51,5; 2; 580920; M8; M9; M11; M14; M17}

{65; 20832; 75; 2; 781200; M18; M19; M20; M21; M22}
 {66; 2856; 78; 2; 111384; M18; M19; M20; M21; M22}
 {67; 23760; 43; 2; 510840; M7; M4}
 {68; 21972; 61,5; 2; 675639; M4; M7; M8; M9}
 {69; 20904; 30; 2; 313560; M4; M7; M5}
 {70; 2856; 31; 2; 44268; M4; M7; M5}
 {71; 20904; 23,5; 2; 245622; M4; M7; M5}
 {72; 437; 65; 1; 28405; M1}

Podobne možno charakterizovať vlastnosti jednotlivých dostupných strojov (celkový počet strojov: 25), a to z hľadiska ich uzatváracej sily, dostupnej kapacity, výkonnosti či dosiahnutej úrovne kvality (kvalitu vyjadrujeme ako pomer zhodných kusov k celkovému počtu kusov vyrobených na danom stroji).

Každý stroj možno vyjadriť ako usporiadanú n-ticu:

{Por. č. stroja; Uzatváracia sila lisu (t); Dostupná kapacita stroja (s/mesiac); Výkonnosť (%); Kvalita (%)}

Zatiaľ čo položky *poradové číslo stroja*, *uzatváracia sila lisu* a *dostupná kapacita stroja* predstavujú všeobecné charakteristické údaje pre jednotlivé stroje, položky *výkonnosť* a *kvalita* predstavujú konkrétne údaje pre jednotlivé stroje, ktoré vznikli výpočtom po zohľadnení konkrétnych úloh realizovaných na daných strojoch.

{M1; 600; 2592000; 0,9108; 0,9797}
 {M2; 30; 2592000; 0,9977; 0,9781}
 {M3; 50; 2592000; 0,9802; 0,9968}
 {M4; 50; 2592000; 0,9815; 0,9851}
 {M5; 50; 2592000; 0,9866; 0,998}
 {M6; 60; 2592000; 0,9449; 0,9814}
 {M7; 60; 2592000; 0,9986; 0,9892}
 {M8; 100; 2592000; 0,9882; 0,9976}
 {M9; 100; 2592000; 0,9827; 0,9941}
 {M10; 100; 2592000; 0,9986; 0,9956}
 {M11; 100; 2592000; 0,9842; 0,9944}
 {M12; 100; 2592000; 0,9728; 0,9781}
 {M13; 100; 2592000; 0,9462; 0,9873}
 {M14; 100; 2592000; 0,9985; 0,9912}
 {M15; 100; 2592000; 0,9417; 0,9561}
 {M16; 100; 2592000; 0,9859; 0,9763}
 {M17; 100; 2592000; 0,9972; 0,9667}
 {M18; 200; 2592000; 0,962; 0,9963}
 {M19; 200; 2592000; 0,9511; 0,9992}
 {M20; 200; 2592000; 0,9988; 0,9279}
 {M21; 200; 2592000; 0,8881; 0,979}

{M22; 200; 2592000; 0,9962; 0,9817}
 {M23; 400; 2592000; 0,9786; 0,968}
 {M24; 400; 2592000; 0,9959; 0,9453}
 {M25; 400; 2592000; 0,9993; 0,9934}

4.2 Súčasná výkonnosť procesu

V druhom kroku DMAIC cyklu sme uskutočnili meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby vo vybranom podniku, a to na základe dát získaných z procesu výroby, a výrobného rozvrhu navrhnutého spoločnosťou, podľa ktorého prebehla realizácia výroby v skúmanom období. Tab. 4 zobrazuje výrobný rozvrh skúmanej spoločnosti za január 2019, vytvorený spoločnosťou na základe empirického prístupu a intuície. Pre každý stroj zobrazuje jeho celkové vytťaženie (celkový čas spracovania všetkých príslušných úloh) a poradové čísla konkrétnych úloh postupne spracovaných na danom stroji (zľava-doprava) v mesiaci január 2019.

Tab. 4 Rozvrh na január 2019 - reálny stav

Por. č. stroja	Vytťaženie (s)	Por. č. úloh													
		17	32	31	72	35	17	30	33	34					
M1	578248	17	32	31	72	35	17	30	33	34					
M2	1071875	61	60	28	61	59	58								
M3	54424	49	54												
M4	1243965	67	52	67											
M5	610200	69	70	71	53										
M6	1188000	7	25												
M7	1663417	27	8	27											
M8	1504617	37	68	18	19	37	68	37	68						
M9	1139000	42													
M10	1448233	1	41	40	2	40	41								
M11	1502125	44	43	44	16	36									

Pokračovanie Tab. 4 Rozvrh na január 2019 - reálny stav

Por. č. stroja	Vyťaženie (s)	Por. č. úloh													
M12	1973625	56	55	63	55	63	62								
M13	1896960	6													
M14	1490880	51	64	50	48	47	50	48	47	46	45	22	21	20	51
M15	1482300	5													
M16	1520100	13	9	13	9										
M17	1347192	23													
M18	1206220	57	26	57											
M19	1087500	38	39	38	39	38									
M20	1676364	24	23												
M21	1739744	29	3	29	3	4	29	4	66						
M22	1795200	65	11												
M23	1592184	10													
M24	1881468	14													
M25	763185	12	15												

Zdroj: vlastné spracovanie

Pri niektorých úlohách je možné si všimnúť, že ich výroba prebiehala po častiach (napr. v prípade úloh s por. č. 17, 27, 67, atď.). Pri navrhovaní zlepšení sme však uvažovali s tzv. súhrnnou mesačnou výrobou, t. j. výrobou celej úlohy „naraz“.

Ako kritérium pre meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby sme si zvolili ukazovateľ OEE, v rámci ktorého sme sa zamerali predovšetkým na aspekt dostupnosti jednotlivých strojov. Tab. 5 zobrazuje výsledné hodnoty ukazovateľa OEE pre jednotlivé stroje pri realizácii rozvrhu navrhnutého spoločnosťou na základe uvedených dát pre mesiac január 2019. Zároveň sú zobrazené parciálne hodnoty ukazovateľa OEE (D = dostupnosť; V = výkonnosť; K = kvalita). Indexom 1 sú označené hodnoty dostupnosti (D₁) a ukazovateľa

OEE (OEE₁), pri vyčíslení ktorých sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 129 min. = 7740 s. V Tab. 6 je uvedený počet prestavieb, ktoré sa v procese realizovali, spolu s priemernou hodnotou ukazovateľov dostupnosti a OEE sledovaných strojov.

Tab. 5 OEE za január 2019 - reálny stav

Stroj	Počet prestavieb	Čas spracovania (s)	Neplán. prestoje (s)	D₁	V	K	OEE₁ (%)
M1	9	578248	313500	0,6015	0,9108	0,9797	53,67
M2	6	1071875	196370	0,8153	0,9977	0,9781	79,56
M3	2	54424	51110	0,4497	0,9802	0,9968	43,94
M4	3	1243965	249930	0,82	0,9815	0,9851	79,28
M5	4	610200	283440	0,66	0,9866	0,998	64,99
M6	2	1188000	169000	0,8656	0,9449	0,9814	80,27
M7	3	1663417	335660	0,8225	0,9986	0,9892	81,25
M8	8	1504617	262640	0,8226	0,9882	0,9976	81,09
M9	1	1139000	205820	0,8421	0,9827	0,9941	82,26
M10	6	1448233	257110	0,8267	0,9986	0,9956	82,19
M11	5	1502125	205250	0,8603	0,9842	0,9944	84,20
M12	6	1973625	339240	0,8365	0,9728	0,9781	79,59
M13	1	1896960	609450	0,7545	0,9462	0,9873	70,48
M14	14	1490880	260400	0,8017	0,9985	0,9912	79,35
M15	1	1482300	722280	0,67	0,9417	0,9561	60,32
M16	4	1520100	407210	0,7762	0,9859	0,9763	74,71
M17	1	1347192	255340	0,8366	0,9972	0,9667	80,65
M18	3	1206220	186170	0,8521	0,962	0,9963	81,67
M19	5	1087500	190760	0,8258	0,9511	0,9992	78,48
M20	2	1676364	135480	0,9174	0,9988	0,9279	85,02
M21	8	1739744	405210	0,7883	0,8881	0,979	68,54
M22	2	1795200	289860	0,8546	0,9962	0,9817	83,58
M23	1	1592184	390450	0,7999	0,9786	0,968	75,77
M24	1	1881468	449460	0,8045	0,9959	0,9453	75,74
M25	2	763185	205680	0,7753	0,9993	0,9934	76,96

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 6 Súhrn výsledkov - reálny stav

		%
Počet prestavieb	100	-
Priemerná hodnota dostupnosti D₁	-	80,41
Priemerná hodnota OEE₁	-	76,92

Zdroj: vlastné spracovanie

4.3 Analýza súčasnej výkonnosti

V treťom kroku DMAIC cyklu sme analyzovali výsledky zistené v procese merania a identifikovali priestor na zlepšenie súčasného stavu. Z pohľadu zamerania tejto dizertačnej práce bolo pre nás ďalej významné sledovať predovšetkým hodnotu ukazovateľa dostupnosti stroja, na ktorý významne vplýva počet a trvanie interných prestavieb. Po zohľadnení uvedených vstupných dát z januára 2019 došlo v skúmanej spoločnosti k realizácii spolu 100 interných prestavieb, pričom trvanie jednej prestavby sme vyčíslili na 129 min. (7740 s). **Priemerná hodnota dostupnosti** jednotlivých strojov spoločnosti dosiahla úroveň približne **80,41 %** (za výnimočne dobré hodnoty sa považuje dosiahnutie úrovne dostupnosti nad 90 %), a **priemerná hodnota ukazovateľa OEE** jednotlivých strojov spoločnosti dosiahla úroveň približne **76,92 %** (za výnimočne dobré hodnoty sa považuje dosiahnutie úrovne OEE nad 85 %). V tejto práci sme sa ďalej zamerali na zvýšenie dostupnosti jednotlivých strojov, resp. využitie ich dostupných kapacít čo najefektívnejšie. Za týmto účelom sme v ďalšom kroku prezentovali myšlienku implementácie metódy SMED a konštruktívnej heuristiky.

4.4 Navrhované zlepšenia

Štvrtým krokom prezentovaného DMAIC cyklu bolo navrhnuť spôsob zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby s využitím vhodných metód.

Po oboznámení sa s procesom plánovania a rozvrhovania výroby vo vybranej spoločnosti sme prioritne zabezpečili zoštíhlenie skúmaného procesu pomocou metódy SMED. V súlade s krokmi uplatňovanými pri metóde SMED sme spoločne so zodpovednými

zamestnancami definovali prestavbové aktivity, ktoré vznikajú vo výrobnom procese a ich trvanie. V predmetnej spoločnosti sa doposiaľ časy trvania konkrétnych prestavbových aktivít nesledovali a neboli považované za kľúčový indikátor výkonnosti. Keďže dĺžka prestavbových časov predtým v spoločnosti monitorovaná nebola, často dochádzalo k výkonu prestavbových aktivít až po odstavení aktuálnej výroby, t. j. väčšina prestavbových aktivít sa vykonávala interne, čo spôsobovalo v procese vysokú neefektívnosť v podobe neplánovaných prestojov, a to sa prejavilo aj vo faktore dostupnosti v rámci ukazovateľa OEE.

Spoločnosť pred našou analýzou odhadla priemernú dĺžku jednej prestavby na **približne 180 minút**. Po definovaní prestavbových aktivít sme v spolupráci s kompetentnými pracovníkmi spoločnosti definovali časy trvania pre každú individuálnu aktivitu, a dostali tak spresnený celkový prestavbový čas **174 minút**. Následne sme rozdelili prestavbové aktivity na interné (t. j. aktivity, ktoré možno vykonávať len počas nečinnosti stroja) a externé (t. j. aktivity, ktoré možno vykonávať aj počas toho, ako je stroj v činnosti), pričom cieľom bolo vykonávať čo najviac prestavbových aktivít externe, t. j. tak, aby nespôsobovali mudu vo výrobnom procese.

Tab. 7 zobrazuje odhad trvania jednotlivých aktivít prebiehajúcich v rámci prechodu od výroby posledného zhodného výrobku poslednej výrobnéj dávky k výrobe prvého zhodného výrobku novej výrobnéj dávky, a ich rozdelenie na interné a externé už po uplatnení zlepšení t. j. po konvertovaní vybraných interných prestavbových aktivít na externé, v súlade s metódou SMED. Aktivity s por. č. 5, 6, 7, 8 s celkovým trvaním 14 minút sa pôvodne vykonávali interne, t. j. počas nečinnosti stroja. Po analýze navrhujeme vykonávať tieto aktivity externe, t. j. počas výroby predchádzajúcej výrobnéj dávky, ako uvádzame v Tab. 7 Tab. 7, čím dôjde k redukcii mudy v procese výroby.

Tab. 7 Prestavbové aktivity po zlepšení

Por. č. aktivity	Typ aktivity (interná/externá)	Názov aktivity	Trvanie aktivity (min)
1	externá	Vydanie výrobného príkazu na nový výrobok	5
2	externá	Pripravenie vstupného materiálu k lisu	10
3	externá	Rezervovanie si okamžitej dostupnosti žeriavu pre zhodenie starej formy	1
4	externá	Skontrolovanie pripravenosti novej formy a jej umiestnenie k lisu	5

Pokračovanie Tab. 7 Prestavbové aktivity po zlepšení

Por. č. aktivity	Typ aktivity (interná/externá)	Názov aktivity	Trvanie aktivity (min)
5	externá	Zistiť v denníku formy, či je predpísané sušenie pre daný materiál	1
6	externá	Dať sušiť materiál do sušičky	10
7	externá	Zapnutie sušičky s materiálom a zaznamenanie času začiatku sušenia	1
8	externá	Skontrolovanie dostupnosti predpísaných parametrov lisovania pre daný výrobok	2
9	interná	Vypnutie horúceho rozvodu formy starého výrobku, ktorá dobieha na lise	1
10	interná	Vypnutie ohrevu valca	1
11	interná	Ochladenie formy na lise pred jej zhodením	15
12	interná	Vypnutie chladenia formy	1
13	interná	Vypnutie lisu	1
14	interná	Odpojenie hadíc chladiacej vody	1
15	interná	Odpojenie hadíc hydrauliky	1
16	interná	Odmontovanie formy a jej zhodenie z lisu použitím žeriava	20
17	interná	Nahodenie formy nového výrobku do lisovacieho stroja pomocou žeriava a jej upevnenie	30
18	interná	Zapojenie hadíc chladiacej vody podľa predpisanej schémy	5
19	interná	Zapojenie hadíc hydrauliky	2
20	interná	Overenie tesnosti spojenia medzi formou a tryskou otlačením na papier a vizuálnou kontrolou	10
21	interná	Zapnutie ohrevu valca, chladenie formy, po nahriatí valca zapnutie horúceho rozvodu formy	1
22	interná	Po nahriatí formy vynulovanie koncových pozícií (vyhadzovač, forma, tryska, robot)	5
23	interná	Napojenie lisu na správny a vysušený materiál, pripravenie červenej prepravky pod formu	1
24	interná	Spustenie lisovania nového produktu v cykle na prvé tri zdvihy	3
25	interná	Kontrola plnenia dutín bez dotlaku	5
26	interná	Zaznamenanie výsledku skúšky plnenia dutín bez dotlaku a uchovanie jedného kompletného zdvihu	5

Pokračovanie Tab. 7 Prestavbové aktivity po zlepšení

27	interná	Odmeranie teploty formy a zapísanie do VP	2
28	interná	Zaznamenanie novej výroby do trackera a vizuálna verifikácia nového výlisku	5
29	externá	Verifikácia rozbehu novej výroby vykonaním kontroly hmotnosti výlisku podľa špecifikácie	5
30	externá	Odloženie použitej formy z pracoviska do priestoru údržby použitím žeriava	5
31	externá	Upratanie pracoviska od pozostatkov predchádzajúceho lisovania	10
32	externá	Skontrolovanie usporiadania a kompletizácia nového pracoviska podľa princípov 5S	5

Zdroj: Vlastné spracovanie

S využitím metódy SMED sme navrhli redukciu interného prestavbového času jednej prestavby približne o 14 minút (o približne 11 %), t. j. zo 129 minút na 115 minút, čo sumarizuje Tab. 8.

Tab. 8 Porovnanie súhrnných prestavbových časov pred/po SMED

	Pred uplatnením SMED	Po uplatnení SMED
Celkový prestavbový čas (min.)	174 min.	174 min.
Externý prestavbový čas (min.)	46 min.	60 min.
Interný prestavbový čas (min.) = prestavbový čas predstavujúci mudu	129 min.	115 min.

Zdroj: Vlastné spracovanie

V priebehu roka 2019 bolo v spoločnosti realizovaných spolu 1523 výrobných príkazov, resp. úloh, čo si vyžadovalo realizáciu minimálne 1523 prestavieb. Pomocou metódy SMED sme poukázali na priestor redukcie dĺžky jednej internej prestavby zo 129 min. na 115 min. Pri zohľadnení navrhovaného zlepšenia možno vyčíslit' potenciálnu ročnú úsporu nákladov. Potenciálnu redukciu prestavbových časov (v min.) pre konkrétne stroje po zohľadnení metódy SMED v priebehu roka 2019 zobrazuje Tab. 9.

Tab. 9 Porovnanie prestavbových časov jednotlivých strojov pred/ po SMED

Stroj	Počet prestavieb	Výsledný prestavbový čas spolu pre všetky stroje (min.)		Rozdiel (min.)
		Pred uplatnením SMED	Po uplatnení SMED	
M1	127	16383	14605	1778
M2	75	9675	8625	1050
M3	72	9288	8280	1008
M4	49	6321	5635	686
M5	69	8901	7935	966
M6	25	3225	2875	350
M7	50	6450	5750	700
M8	81	10449	9315	1134
M9	39	5031	4485	546
M10	62	7998	7130	868
M11	56	7224	6440	784
M12	82	10578	9430	1148
M13	47	6063	5405	658
M14	148	19092	17020	2072
M15	62	7998	7130	868
M16	50	6450	5750	700
M17	23	2967	2645	322
M18	43	5547	4945	602
M19	40	5160	4600	560
M20	31	3999	3565	434
M21	82	10578	9430	1148
M22	60	7740	6900	840
M23	56	7224	6440	784
M24	53	6837	6095	742
M25	41	5289	4715	574

Zdroj: Vlastné spracovanie

Navrhovanú metódu SMED sme uplatnili na príklade jednej výrobnéj linky, resp. jedného výrobného zariadenia, keďže v spoločnosti sa realizuje jednostupňová výroba na paralelných strojoch a neevidujeme významné odlišnosti v rámci prestavbových aktivít pre jednotlivé stroje. Po zovšeobecnení prínosov SMED pre každý z 25 strojov spoločnosti možno odhadnúť výšku potenciálnej ročnej úspory. Pomocou metódy SMED sme dosiahli

úsporu 14 minút pri každej realizovanej internej prestavbe. Za rok 2019 bolo potrebné spolu zrealizovať 1523 interných prestavieb, čo predstavuje **ročnú úsporu vo výške $14 \cdot 1523 = 21\,322$ minút (355 hodín).** Ak by bolo nami navrhované zlepšenie implementované v skúmanej spoločnosti v roku 2019, spoločnosť by dosiahla úsporu vo výške 355 hodín na čase venovanom prestavbám, a tento čas by tak mohla venovať činnosti, ktorá by priniesla podniku hodnotu. Potenciálnu ročnú úsporu výrobných nákladov na výrobu rovnakého množstva výliskov je možné vyčíslť po zohľadnení priemernej hodinovej sadzby stroja, ktorá predstavuje hodnotu približne 17 eur/h. **Potenciálna ročná úspora výrobných nákladov** zodpovedá sume $355 \cdot 17 = 6035$ **eur ročne.** Na základe výsledkov nášho výskumu by bolo možné redukciou interných prestavbových časov pomocou metódy SMED zvýšiť dostupnosť jednotlivých strojov, čo by sa prejavilo zvýšením hodnoty ukazovateľa OEE. Pre podnik by redukcia prestavbových časov predstavovala aj ďalšie potenciálne benefity v podobe efektívnejšieho využitia strojových kapacít, redukcie času dodania, zlepšenia morálky zamestnancov vo výrobe, či rastu produktivity.

Za účelom zvýšenia dostupnosti jednotlivých strojov, resp. využitia ich dostupných kapacít čo najefektívnejšie, sme ďalej využili **konštruktívne heuristické algoritmy**, čím sme nadviazali na zlepšenia navrhnuté pomocou metódy SMED. Dáta predstavujúce vstupy do navrhovaných algoritmov reprezentovali úlohy, ktoré sa mali vykonať, spolu s ich časovým trvaním a uvedením strojov, na ktorých mohla ich realizácia potenciálne prebehnúť, z hľadiska stanovenej priority. V skúmanej spoločnosti možno pozorovať, že v rámci analyzovaného mesiaca dochádzalo k realizácii niektorých úloh po častiach, t. j. nevyrobilo sa celé objednané množstvo prislúchajúce danej úlohe naraz.

V tejto oblasti sme preto identifikovali ďalšie potenciálne zlepšenie v podobe realizácie tzv. **súhrnnej výroby** (naraz sa vyrobí celé objednané množstvo prislúchajúce danej úlohe v rámci skúmaného obdobia), čo malo za následok **redukciu počtu prestavieb.** Za účelom poukázania na potenciálny priestor pre zlepšenie v súlade s myšlienkou súhrnnej výroby sme využili opätovne pohľad na reálne dáta spoločnosti za rok 2019. Tab. 10 a Graf 1 zobrazujú ideálne výrobné časy na jednotlivých strojoch, t. j. ako dlho by trvala výroba na jednotlivých strojoch v prípade, že by došlo k nepretržitej výrobe postupne všetkých úloh, ktoré sa na daných strojoch počas sledovaného roka realizovali, a to bez akýchkoľvek prestavieb či prestojov. Je však potrebné poznamenať, že takto vytvorené ideálne výrobné časy však v reálnom výrobnom procese nikdy nemohli nastať. Predstavujú tak akýsi benchmark resp. etalón, na základe ktorého je možné porovnávať efektívnosť alternatívnych rozvrhov. Ideálne výrobné časy sme

zaznamenali ex-post, na základe údajov spoločnosti za rok 2019, pričom sme uvažovali s výrobou v režime 24/7, a s kalendárnym počtom dní v jednotlivých mesiacoch. Tab. 10 zobrazuje ideálny celkový výrobný čas pre každý z 25 strojov, s rozdelením na kalendárne mesiace. Podľa tohto teoretického benchmarku, ak by výroba na všetkých 25 paralelných strojoch začala 1. januára a pokračovala by nepretržite bez akýkoľvek prestavieb a prestojov (spúšťanie výroby, prestávky, údržba, poruchy, sviatky, čakania, odstavenie výroby, chýbajúci materiál, technické príčiny a i.), výroba na stroji M1 by trvala do 24.marca, výroba na stroji M2 by trvala do 10. júla, atď.).

Pri komplexnom pohľade na „ideálne“ rozvrhy za skúmaný rok možno pozorovať významnejšie rozdiely v miere vyťaženia jednotlivých strojov. Rozdiely môžu byť spôsobené špecifickými technickými obmedzeniami jednotlivých strojov, predovšetkým veľkosťou ich uzatváracej sily, čo môže do určitej miery limitovať vhodnosť ich použitia na výrobu jednotlivých typov objednávaných výrobkov. V kapitole „Výsledky“ tejto práce v rámci definovania vstupných dát uvádzame, aké typy výrobkov je možné vyrobiť na uvažovaných strojoch. Veľkosť uzatváracej sily daných strojov v skúmanej spoločnosti je rôzna, dosahuje hodnoty 30, 50, 100, 200, 400, alebo 600 ton. Najviac využívanými strojmi v danej spoločnosti v sledovanom období boli stroje s uzatváracou silou 200 ton. Na strojoch s takouto uzatváracou silou sa vyrábali výrobky, po ktorých bol v sledovanom období relatívne vysoký dopyt. Potenciálnym priestorom na zlepšenie by bolo obstaranie ďalších strojov s touto uzatváracou silou.

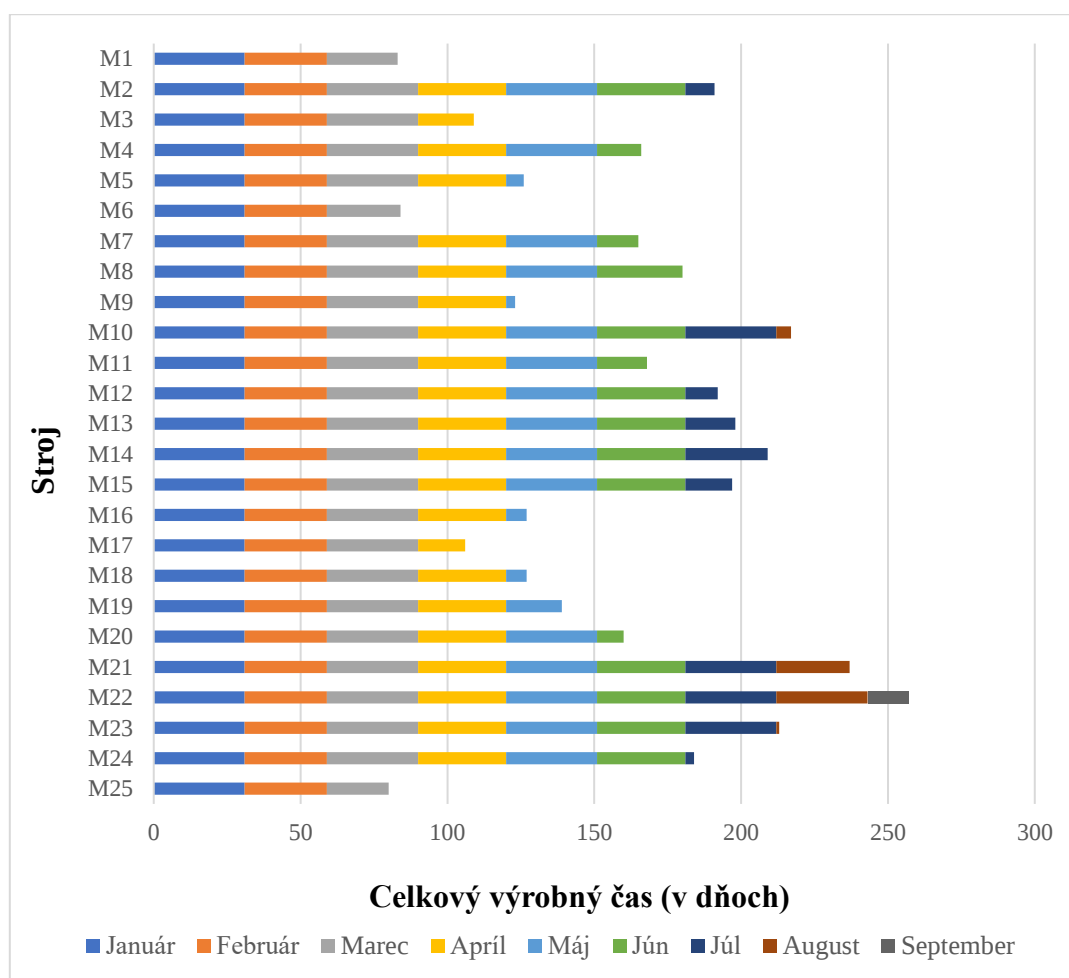
Na Graf 1 je možné pozorovať relatívne nižšie využitie strojov s označením „M1“, „M3“, „M6“, „M17“, „M25“ v priebehu roka 2019. Stroj M1 má uzatváraciu silu 600 ton, stroje M3 a M6 - 50 ton, stroj M17 – 100 ton, stroj M25 – 400 ton. Relatívne nízke vyťaženie strojov M1, M3, M6, a M25 možno teda odôvodniť ich uvedenými špecifickými technickými parametrami vhodnými len pre časť výrobného portfólia, ktoré bolo v sledovanom období dopytované od zákazníkov.

Tab. 10 Dĺžka ideálneho výrobného času pre jednotlivé stroje

Stroj	Začiatok výroby	Koniec výroby	Ideálny celkový výrobný čas (v dňoch)
M1	1.1.2019	24.3.2019	83
M2	1.1.2019	10.7.2019	191
M3	1.1.2019	19.4.2019	109
M4	1.1.2019	15.6.2019	166
M5	1.1.2019	6.5.2019	126
M6	1.1.2019	25.3.2019	84
M7	1.1.2019	14.6.2019	165
M8	1.1.2019	29.6.2019	180
M9	1.1.2019	3.5.2019	123
M10	1.1.2019	5.8.2019	217
M11	1.1.2019	17.6.2019	168
M12	1.1.2019	11.7.2019	192
M13	1.1.2019	17.7.2019	198
M14	1.1.2019	28.7.2019	209
M15	1.1.2019	16.7.2019	197
M16	1.1.2019	7.5.2019	127
M17	1.1.2019	16.4.2019	106
M18	1.1.2019	7.5.2019	127
M19	1.1.2019	19.5.2019	139
M20	1.1.2019	9.6.2019	160
M21	1.1.2019	25.8.2019	237
M22	1.1.2019	14.9.2019	257
M23	1.1.2019	1.8.2019	213
M24	1.1.2019	3.7.2019	184
M25	1.1.2019	21.3.2019	80

Zdroj: vlastné spracovanie

Graf 1 zobrazuje ideálny celkový výrobný čas jednotlivých strojov.



Graf 1 Ideálny celkový výrobný čas pre jednotlivé stroje

Zdroj: vlastné spracovanie

V rámci reálnych rozvrhov je možné identifikovať faktory, ktoré do procesu neprinášajú úžitok. Jedná sa o plánované prestoje a nevyhnutné prestavby, ale aj neplánované prestoje a nadbytočné prestavby. Myšlienku súhrnnej výroby sme adresovali za účelom redukcie počtu prestavieb prostredníctvom eliminácie nadbytočných prestavieb. Súhrnné dáta týkajúce sa výroby celkového mesačného objednaného množstva vstupovali aj do heuristických algoritmov navrhovaných v ďalšej časti tejto kapitoly. V prípade, že by sme však myšlienku súhrnnej výroby chceli zohľadniť pre dlhšie časové obdobie, bolo by nevyhnutné zvážiť aj ekonomický aspekt daného riešenia. Súhrnná výroba v dlhšom časovom horizonte je síce potenciálne prínosnou z hľadiska redukcie počtu prestavieb, avšak môže mať potenciálny negatívny vplyv na zvýšenie potreby financovania skladových zásob. Preto je vhodným riešením pri aplikácii

myšlienky súhrnnej výroby pre dlhší časový horizont realizovať výpočet optimálnej dávky pre jednotlivé stroje. V súlade s týmto riešením by boli jednotlivé úlohy spracovávané súhrnne, avšak len do takého rozsahu z hľadiska množstva, ako stanovuje optimálna dávka. V skúmanej spoločnosti optimálna dávka pre jednotlivé stroje závisí od charakteru konkrétnych úloh produkovaných na daných strojoch. Pri zmene výrobného rozvrhu je tak potrebné úroveň optimálnej dávky opätovne kalkulovať. Výpočet optimálnej dávky sme aplikovali na príklade zvolených troch strojov spoločnosti. Tieto stroje sme považovali za reprezentatívne pre účely demonštrovania kalkulácie, keďže patria do rôznych kategórií strojov z hľadiska ich uzatváraciej sily (stroj M25 – uzatváracia sila: 400 ton; stroj M14 – uzatváracia sila: 100 ton; stroj M18 – uzatváracia sila: 200 ton).

Tab. 11 zobrazuje hodnoty optimálnej veľkosti výrobnej dávky pre výrobky (resp. úlohy) realizované na uvedenej množine strojov, kde:

C_s = prestavbové náklady pre danú dávku (eur)

D = ročný dopyt (ks)

Ch = ročné náklady na skladovanie hotového výrobku (eur)

P = ročná výrobná kapacita (ks)

EBQ = optimálna dávka pre daný typ výrobku (ks)

P_{EBQ} = počet prestavieb po zohľadnení optimálnej dávky

P_R = počet prestavieb dosiahnutých spoločnosťou v rámci vybraných strojov pri výrobe podľa reálneho rozvrhu v roku 2019

Tab. 11 Optimálna dávka výrobkov pre vybrané stroje

Stroj	Por. č. výrobku	C_s (eur)	D (ks)	Ch (eur)	P (ks)	EBQ (ks)	P_{EBQ}	P_{EBQ} spolu	P_R spolu
M25	15	130	32784	0,8871	133000	3571	10	28	33
	12	130	52290	1,107	60000	9776	6		
	73	130	3152	1,107	45000	892	4		
	74	130	3444	1,107	45000	936	4		
	75	130	3756	1,107	45000	981	4		

Pokračovanie Tab. 11 Optimálna dávka výrobkov pre vybrané stroje

Stroj	Por. č. výrobku	Cs (eur)	D (ks)	Ch (eur)	P (ks)	EBQ (ks)	P_{EBQ}	P_{EBQ} Spolu	P_R Spolu
M14	83	130	6332	0,129	98000	3694	2	37	130
	20	130	70367	0,134	79963	33731	3		
	84	130	24420	0,126	27750	20492	2		
	83	130	6332	0,129	98000	3694	2		
	20	130	70367	0,134	79963	33731	3		
	84	130	24420	0,126	27750	20492	2		
	85	130	18060	0,102	20523	19586	1		
	21	130	10782	0,125	12252	13671	1		
	22	130	15660	0,125	17795	16475	1		
	76	130	35200	0,117	40000	25531	2		
	38	130	607070	0,119	689852	105134	6		
	86	130	8375	0,015	9517	34781	1		
	45	130	8799	0,127	9999	12252	1		
	78	130	4932	0,128	5605	9137	1		
	46	130	22319	0,123	25363	19828	2		
	47	130	13356	0,126	15177	15155	1		
	48	130	20515	0,12	23313	19246	2		
	79	130	510	0,127	580	2950	1		
	80	130	4872	0,121	5536	9340	1		
	81	130	3180	0,124	3614	7454	1		
	82	130	16515	0,126	18767	16852	1		
	51	130	16398	0,1886	18634	13725	2		
	64	130	268728	0,1462	305373	63107	5		
M18	26	130	112245	0,1054	205000	24738	5	14	32
	57	130	764400	0,0601	1100000	104111	8		
	77	130	1290	0,152	1400	5299	1		

Zdroj: Vlastné spracovanie

Uvažovanie s veľkosťou optimálnej dávky v procese plánovania a rozvrhovania výroby sa preukázalo ako jeden z vhodných spôsobov redukcie prestavbových časov, resp. ich

početnosti, a to aj pri zohľadnení potenciálnych nákladov. Ak by spoločnosť zohľadnila pri tvorbe výrobného rozvrhu optimálnu výrobnú dávku pre jednotlivé typy úloh, na stroji M25 by početnosť prestavieb klesla z 33 na 28; v prípade stroja M14 by došlo k poklesu zo 130 na 37 prestavieb a v prípade stroja M18 by nastala redukcia z 32 na 14 prestavieb.

V ďalšej časti tejto práce sme formulovali problém optimalizácie rozvrhovania výroby v prostredí paralelných strojov, na ktorého riešenie sme využili prioritne dva varianty konštruktívneho heuristického algoritmu. Následne sme uviedli dosiahnuté výsledky a diskutovali o potenciálnych prínosoch a navrhovaných zlepšeniach.

Matematickým zápisom sme **formulovali problém optimalizácie** rozvrhovania výroby v prostredí paralelných strojov. Problém rozvrhovania výroby v prostredí nesúvzťažných paralelných strojov s cieľom **minimalizácie makespanu** (C_{max}), sme definovali ako optimalizačný problém zmiešaného celočíselného programovania (ďalej: MIP) podľa vzoru Rabadi a kol. (2006) nasledovne:

Je dané:

- množina n výrobných príkazov, ktoré sa majú spracovať; $P = (p_1, \dots, p_n)$; s indexami i, j
- množina m strojov, na ktorých sa majú výrobné príkazy spracovať; $M = (m_1, \dots, m_r)$; s indexom k
- čas P_{jk} , za aký je výrobný príkaz p spracovaný na stroji m ; $P_{jk} \geq 0$
- veľké kladné číslo M
- $X_{ijk} = 1$ ak výrobný príkaz p_j je spracovaný hneď po výrobnom príkaze p_i na stroji m_k ; inak $X_{ijk} = 0$
- $Y_{ik} = 1$ ak výrobný príkaz p_j je spracovaný na stroji m_k ; inak $Y_{ik} = 0$

Za predpokladu, že:

- uvažujeme s jednostupňovou výrobou, kde jeden výrobný príkaz zodpovedá jednej úlohe, ktorá pozostáva z jednej operácie (lisovanie)
- všetky výrobné príkazy sú známe v dostatočnom predstihu a preto neuvažujeme s ich požadovaným termínom dodania pri tvorbe výrobného rozvrhu v rámci stanoveného obdobia, t. j. 1 mesiac

- každý výrobný príkaz možno z hľadiska technologických možností spracovať len na určitej podmnožine strojov z množiny všetkých strojov, resp. množina strojov M obsahuje pre každý výrobný príkaz iné prvky

Definovanie problému optimalizácie:

Pri definovaní problému optimalizácie vychádzame z publikácie autorov Rabadi a kol. (2006).

Cieľ:

minimalizácia $C_{\max}$

Cieľom účelovej funkcie je minimalizácia makespanu (maximálneho času spracovania).

Obmedzenia:

Každý výrobný príkaz je rozvrhnutý práve raz a je spracovaný na práve jednom stroji.

$$\sum_{i=0; i \neq j}^n \sum_{k=1}^m x_{i,j,k} = 1 \quad (4.1)$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, n$$

Každému výrobnému príkazu predchádza a po každom výrobnom príkaze nasleduje práve jeden výrobný príkaz.

$$\sum_{i=0; i \neq h}^n x_{i,h,k} - \sum_{j=0; j \neq h}^n x_{h,j,k} = 0 \quad (4.2)$$

$$\forall h = 1, 2, \dots, n$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, m$$

Žiaden výrobný príkaz nemôže predchádzať a nasledovať po tom istom výrobnom príkaze.

$$C_j \geq C_i + \sum_{k=1}^m x_{i,j,k}(P_{j,k}) + M \left(\sum_{k=1}^m x_{i,j,k} - 1 \right) \quad (4.3)$$

$$\forall i = 0, \dots, n$$

$$\forall j = 1, \dots, n$$

Práve jeden výrobný príkaz môže byť rozvrhnutý ako prvý na každom stroji. Zároveň, práve jeden výrobný príkaz môže byť rozvrhnutý ako posledný na každom stroji.

$$\sum_{j=0}^n x_{0,j,k} = 1 \quad (4.4)$$

$$\forall k = 1, \dots, m$$

Rozhodovacie premenné sú binárne v rámci všetkých definičných oborov.

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (4.5)$$

$$\forall i = 0, \dots, n$$

$$\forall j = 0, \dots, n$$

$$\forall k = 1, \dots, m$$

Je definovaný fiktívny výrobný príkaz P_0 s časom spracovania 0, od ktorého sa začína proces rozvrhovania.

$$P_0 = 0 \quad (4.6)$$

Časy spracovania sú nezáporné.

$$C_j \geq 0 \quad (4.7)$$

Uvedený problém optimalizácie patrí do kategórie NP-ťažkých problémov. Na jeho riešenie sme preto využili prioritne dva varianty konštruktívneho heuristického algoritmu bližšie opísaného v metodologickej časti tejto práce. Ich implementáciou bolo možné

v skúmanej spoločnosti dosiahnuť potenciálnu signifikantnú úsporu z hľadiska času a nákladov. Pri definovaní vstupných dát pre realizáciu algoritmov sme vzali do úvahy myšlienku súhrnných dát. V rámci rozsahu tejto práce sme neuvažovali ďalej s optimálnou dávkou, keďže pri rozvrhovaní sme vzali do úvahy relatívne krátke časové obdobie, ktorým bol jeden mesiac. **Súhrnnou výrobou** pre objednávky skúmanej spoločnosti realizované **v mesiaci január 2019** by bolo možné dosiahnuť **redukciu počtu realizovaných prestavbových aktivít zo 100 na 72**, čo sa prejaví pri následnej kalkulácii hodnoty dostupnosti jednotlivých strojov a celkového ukazovateľa OEE v zmysle piateho kroku DMAIC cyklu, ktorým je opätovné meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby po implementácii navrhovaných metód a vyhodnotenie miery zlepšenia.

4.5 Výkonnosť procesu po navrhovaných zlepšeniach

Prvým variantom navrhovaného **konštruktívneho heuristického algoritmu** je **variant „SL=> ST“**, založený na myšlienke alokovať na najmenej vyťažený stroj v danom čase úlohu s najkratším časom spracovania, z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Tab. 12 zobrazuje potenciálny výrobný rozvrh na január 2019 vytvorený na základe algoritmu „SL=>ST“. Pre každý stroj zobrazuje jeho celkové vyťaženie (celkový čas spracovania všetkých príslušných úloh) a poradové čísla konkrétnych úloh postupne spracovaných na danom stroji (zľava-doprava) v mesiaci január 2019.

Tab. 12 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => ST

Por. č. stroja	Vyťaženie (s)	Por. č. úloh									
M1	578248	35	32	33	31	72	30	17	34		
M2	1060625	60	58	59	52						
M3	1408316	49	61	8							
M4	765237	54	71	67							
M5	357828	70	69								
M6	980000	7									
M7	1928764	25	28	68	27						
M8	1391478	18	19	38	37						
M9	2157750	16	41	42							

Pokračovanie Tab. 12 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => ST

Por. č. stroja	Vyt'aženie (s)	Por. č. úloh								
M10	1186200	36	63	56						
M11	963583	40	43							
M12	914175	53	55	62						
M13	1896960	6								
M14	927870	47	50	48	45	21	22	46	20	64
M15	1568550	2	5							
M16	1209000	1	13							
M17	563010	51								
M18	1549259	66	44	57						
M19	3170325	39	23							
M20	530951	26	24							
M21	1507400	3	29							
M22	1916160	4	65	11						
M23	2280684	9	10							
M24	1881468	14								
M25	763185	15	12							

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 13 zobrazuje výsledné hodnoty ukazovateľ'a OEE pre jednotlivé stroje, pri potenciálnej realizácii rozvrhu navrhnutého na základe algoritmu SL => ST, vychádzajúceho z uvedených dát pre mesiac január 2019. Zároveň sú zobrazené parciálne hodnoty ukazovateľ'a OEE (D = dostupnosť; V = výkonnosť; K = kvalita). Indexom 1 označujeme hodnoty dostupnosti (D_1) a ukazovateľ'a OEE (OEE_1), pri vyčíslení ktorých sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 129 min. = 7740 s. Táto hodnota zodpovedá časovému

ohodnoteniu interných prestavbových aktivít pred návrhom zlepšenia pomocou metódy SMED. Indexom 2 označujeme hodnoty dostupnosti (D_2) a ukazovateľ a OEE (OEE_2), pri vyčíslení ktorých sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 115 min. = 6400 s. Táto hodnota zodpovedá časovému ohodnoteniu interných prestavbových aktivít po návrhu zlepšenia pomocou metódy SMED, t. j. po konvertovaní vybraných interných prestavbových aktivít na externé. Keďže realizácia navrhovaného algoritmu prebehla vo virtuálnom prostredí, pri hodnotení jeho efektívnosti pomocou ukazovateľ a OEE sme abstrahovali od parciálnych ukazovateľov výkonnosti a kvality jednotlivých strojov, resp. ich hodnoty sme považovali za rovnaké ako v prípade hodnotenia reálneho stavu v mesiaci január 2019 na základe výroby realizovanej podľa rozvrhu navrhnutého spoločnosťou.

Tab. 14 je uvedený počet prestavieb, ktoré sa v procese realizovali, spolu s priemernou hodnotou ukazovateľov dostupnosti a OEE sledovaných strojov.

Tab. 13 OEE za január 2019 - po algoritme SL => ST

Stroj	Počet prestavieb	Čas spracovania (s)	D_1	D_2	V	K	OEE_1 (%)	OEE_2 (%)
M1	8	578248	0,9033	0,9129	0,9108	0,9797	80,60	81,46
M2	4	1060625	0,9716	0,9746	0,9977	0,9781	94,81	95,11
M3	3	1408316	0,9838	0,9855	0,9802	0,9968	96,12	96,29
M4	3	765237	0,9706	0,9737	0,9815	0,9851	93,84	94,14
M5	2	357828	0,9585	0,9629	0,9866	0,998	94,38	94,81
M6	1	980000	0,9922	0,993	0,9449	0,9814	92,01	92,08
M7	4	1928764	0,9842	0,9859	0,9986	0,9892	97,22	97,39
M8	4	1391478	0,9782	0,9806	0,9882	0,9976	96,43	96,67
M9	3	2157750	0,9894	0,9905	0,9827	0,9941	96,65	96,76
M10	3	1186200	0,9808	0,9828	0,9986	0,9956	97,51	97,71
M11	2	963583	0,9842	0,9859	0,9842	0,9944	96,32	96,49
M12	3	914175	0,9752	0,9779	0,9728	0,9781	92,79	93,05
M13	1	1896960	0,9959	0,9964	0,9462	0,9873	93,04	93,08
M14	9	927870	0,9302	0,9373	0,9985	0,9912	92,06	92,77
M15	2	1568550	0,9902	0,9913	0,9417	0,9561	89,15	89,25
M16	2	1209000	0,9874	0,9887	0,9859	0,9763	95,04	95,17
M17	1	563010	0,9864	0,9879	0,9972	0,9667	95,09	95,23
M18	3	1549259	0,9852	0,9868	0,962	0,9963	94,43	94,58

Pokračovanie Tab. 13 OEE za január 2019 - po algoritme SL => ST

Stroj	Počet prestavieb	Čas spracovania (s)	D ₁	D ₂	V	K	OEE ₁ (%)	OEE ₂ (%)
M19	2	3170325	0,9951	0,9957	0,9511	0,9992	94,57	94,63
M20	2	530951	0,9717	0,9747	0,9988	0,9279	90,06	90,33
M21	2	1507400	0,9898	0,9909	0,8881	0,979	86,06	86,15
M22	3	1916160	0,988	0,9893	0,9962	0,9817	96,62	96,75
M23	2	2280684	0,9933	0,994	0,9786	0,968	94,09	94,16
M24	1	1881468	0,9959	0,9963	0,9959	0,9453	93,76	93,79
M25	2	763185	0,9801	0,9822	0,9993	0,9934	97,29	97,50

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 14 Súhrn výsledkov SL=>ST

		%
Počet prestavieb	72	-
Priemerná hodnota dostupnosti D ₁	-	98,36
Priemerná hodnota dostupnosti D ₂	-	98,54
Priemerná hodnota OEE ₁	-	94,09
Priemerná hodnota OEE ₂	-	94,26

Zdroj: vlastné spracovanie

Druhým variantom navrhovaného **konštruktívneho heuristického algoritmu** je **variant „SL=> LT“**, ktorý nasledoval myšlienku alokovať na najmenej vyťažený stroj v danom čase úlohu s najdlhším časom spracovania, z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Tab. 15 zobrazuje potenciálny výrobný rozvrh na január 2019 vytvorený na základe algoritmu „SL=> LT“. Pre každý stroj zobrazuje jeho celkové vyťaženie (celkový čas spracovania všetkých príslušných úloh) a poradové čísla konkrétnych úloh postupne spracovaných na danom stroji (zľava-doprava) v mesiaci január 2019.

Tab. 15 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => LT

Por. č. stroja	Vytáženie (s)	Por. č. úloh											
		34	17	30	72	31	33	32	35				
M1	578248	34	17	30	72	31	33	32	35				
M2	1247000	52	28	59	60								
M3	537424	61	49	54									
M4	980000	7											
M5	685200	69	71	58	70	53							
M6	208000	25											
M7	1414590	27	67	36									
M8	1504617	37	68	19	18								
M9	1520250	42	16										
M10	1517167	8	41										
M11	1526083	43	38	40									
M12	1973625	56	62	63	55								
M13	1896960	6											
M14	2015880	64	51	39	20	46	22	21	45	48	50	47	
M15	1482300	5											
M16	1065900	9	1										
M17	831600	13											
M18	1437875	57	44										
M19	2645325	23											
M20	1398401	65	24	26	2								
M21	1404784	29	66										
M22	1348960	11	3	4									

Pokračovanie Tab. 15 Rozvrh na január 2019 - po algoritme SL => LT

Por. č. stroja	Vyt'aženie (s)	Por. č. úloh										
M19	2645325	23										
M20	1398401	65	24	26	2							
M21	1404784	29	66									
M22	1348960	11	3	4								
M23	1592184	10										
M24	1881468	14										
M25	763185	12	15									

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 16 zobrazuje výsledné hodnoty ukazovateľa OEE pre jednotlivé stroje, pri potenciálnej realizácii rozvrhu navrhnutého na základe algoritmu „SL => LT“, vychádzajúceho z uvedených dát pre mesiac január 2019.

Zároveň sú zobrazené parciálne hodnoty ukazovateľa OEE (D = dostupnosť; V = výkonnosť; K = kvalita). Indexom 1 označujeme hodnoty dostupnosti (D₁) a ukazovateľa OEE (OEE₁), pri vyčíslení ktorých sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 129 min. = 7740 s. Táto hodnota zodpovedá časovému ohodnoteniu interných prestavbových aktivít pred návrhom zlepšenia pomocou metódy SMED. Indexom 2 označujeme hodnoty dostupnosti (D₂) a ukazovateľa OEE (OEE₂), pri vyčíslení ktorých sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 115 min. = 6400 s. Táto hodnota zodpovedá časovému ohodnoteniu interných prestavbových aktivít po návrhom zlepšenia pomocou metódy SMED, t. j. po konvertovaní vybraných interných prestavbových aktivít na externé. Podobne ako v prípade algoritmu SL => ST, pri realizácii algoritmu SL => LT taktiež považujeme hodnoty výkonnosti a kvality jednotlivých strojov za nemenné oproti stavu nameranému na základe reálnej výroby, ktorá v spoločnosti prebehla v mesiaci január 2019.

V Tab. 17 je uvedený počet prestavieb, ktoré sa v procese realizovali, spolu s priemernou hodnotou ukazovateľov dostupnosti a OEE sledovaných strojov.

Tab. 16 OEE za január 2019 - po algoritme SL => LT

Stroj	Počet presta-Vieb	Čas spracovania (s)	D₁	D₂	V	K	OEE₁ (%)	OEE₂ (%)
M1	8	578248	0,9033	0,9129	0,9108	0,9797	80,60	81,46
M2	4	1247000	0,9758	0,9783	0,9977	0,9781	95,22	95,47
M3	3	537424	0,9586	0,9629	0,9802	0,9968	93,66	94,08
M4	1	980000	0,9922	0,993	0,9815	0,9851	95,93	96,01
M5	5	685200	0,9465	0,9521	0,9866	0,998	93,19	93,75
M6	1	208000	0,9641	0,9679	0,9449	0,9814	89,40	89,76
M7	3	1414590	0,9839	0,9856	0,9986	0,9892	97,19	97,36
M8	4	1504617	0,9798	0,982	0,9882	0,9976	96,59	96,81
M9	2	1520250	0,9899	0,991	0,9827	0,9941	96,70	96,81
M10	2	1517167	0,9899	0,991	0,9986	0,9956	98,42	98,53
M11	3	1526083	0,985	0,9866	0,9842	0,9944	96,40	96,56
M12	4	1973625	0,9846	0,9862	0,9728	0,9781	93,68	93,84
M13	1	1896960	0,9959	0,9964	0,9462	0,9873	93,04	93,08
M14	11	2015880	0,9595	0,9637	0,9985	0,9912	94,96	95,38
M15	1	1482300	0,9948	0,9954	0,9417	0,9561	89,57	89,62
M16	2	1065900	0,9857	0,9872	0,9859	0,9763	94,88	95,02
M17	1	831600	0,9908	0,9918	0,9972	0,9667	95,51	95,61
M18	2	1437875	0,9893	0,9905	0,962	0,9963	94,82	94,93
M19	1	2645325	0,9971	0,9974	0,9511	0,9992	94,76	94,79
M20	4	1398401	0,9783	0,9806	0,9988	0,9279	90,67	90,88
M21	2	1404784	0,9891	0,9903	0,8881	0,979	86,00	86,10
M22	3	1348960	0,9831	0,9849	0,9962	0,9817	96,14	96,32
M23	1	1592184	0,9952	0,9957	0,9786	0,968	94,27	94,32
M24	1	1881468	0,9959	0,9963	0,9959	0,9453	93,76	93,79
M25	2	763185	0,9801	0,9822	0,9993	0,9934	97,29	97,50

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 17 Súhrn výsledkov $SL \Rightarrow LT$

		%
Počet prestavieb	72	-
Priemerná hodnota dostupnosti D_1	-	98,36
Priemerná hodnota dostupnosti D_2	-	98,54
Priemerná hodnota OEE_1	-	94,09
Priemerná hodnota OEE_2	-	94,26

Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 18 obsahuje súhrnné porovnanie hodnôt parciálneho ukazovateľa dostupnosti a celkového ukazovateľa OEE pre reálny stav (t. j. stav pri plánovaní rozvrhu spoločnosťou), pre stav po uplatnení algoritmu $SL \Rightarrow ST$ a stav po uplatnení algoritmu $ST \Rightarrow LT$.

Tab. 18 Súhrnné porovnanie dostupnosti a OEE

Stroj	Reálny Stav		Po algoritme $SL \Rightarrow ST$ (1.variant algoritmu)				Po algoritme $ST \Rightarrow LT$ (2.variant algoritmu)			
	D1	OEE1	D1	OEE1	D2	OEE2	D1	OEE1	D2	OEE2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
M1	60,15	53,67	90,33	91,29	80,60	81,46	90,33	91,29	80,60	81,46
M2	81,53	79,56	97,16	97,46	94,81	95,11	97,58	97,83	95,22	95,47
M3	44,97	43,94	98,38	98,55	96,12	96,29	95,86	96,29	93,66	94,08
M4	82,00	79,28	97,06	97,37	93,84	94,14	99,22	99,30	95,93	96,01
M5	66,00	64,99	95,85	96,29	94,38	94,81	94,65	95,21	93,19	93,75

Pokračovanie Tab. 18 Súhrnné porovnanie dostupnosti a OEE

Stroj	Reálny Stav		Po algoritme SL => ST (1.variant algoritmu)				Po algoritme ST => LT (2.variant algoritmu)			
	D1 (%)	OEE1 (%)	D1 (%)	OEE1 (%)	D2 (%)	OEE2 (%)	D1 (%)	OEE1 (%)	D2 (%)	OEE2 (%)
M6	86,56	80,27	99,22	99,30	92,01	92,08	96,41	96,79	89,40	89,76
M7	82,25	81,25	98,42	98,59	97,22	97,39	98,39	98,56	97,19	97,36
M8	82,26	81,09	97,82	98,06	96,43	96,67	97,98	98,20	96,59	96,81
M9	84,21	82,26	98,94	99,05	96,65	96,76	98,99	99,10	96,70	96,81
M10	82,67	82,19	98,08	98,28	97,51	97,71	98,99	99,10	98,42	98,53
M11	86,03	84,20	98,42	98,59	96,32	96,49	98,50	98,66	96,40	96,56
M12	83,65	79,59	97,52	97,79	92,79	93,05	98,46	98,62	93,68	93,84
M13	75,45	70,48	99,59	99,64	93,04	93,08	99,59	99,64	93,04	93,08
M14	80,17	79,35	93,02	93,73	92,06	92,77	95,95	96,37	94,96	95,38
M15	67,00	60,32	99,02	99,13	89,15	89,25	99,48	99,54	89,57	89,62
M16	77,62	74,71	98,74	98,87	95,04	95,17	98,57	98,72	94,88	95,02
M17	83,66	80,65	98,64	98,79	95,09	95,23	99,08	99,18	95,51	95,61
M18	85,21	81,67	98,52	98,68	94,43	94,58	98,93	99,05	94,82	94,93
M19	82,58	78,48	99,51	99,57	94,57	94,63	99,71	99,74	94,76	94,79
M20	91,74	85,02	97,17	97,47	90,06	90,33	97,83	98,06	90,67	90,88
M21	78,83	68,54	98,98	99,09	86,06	86,15	98,91	99,03	86,00	86,10

Pokračovanie Tab. 18 Súhrnné porovnanie dostupnosti a OEE

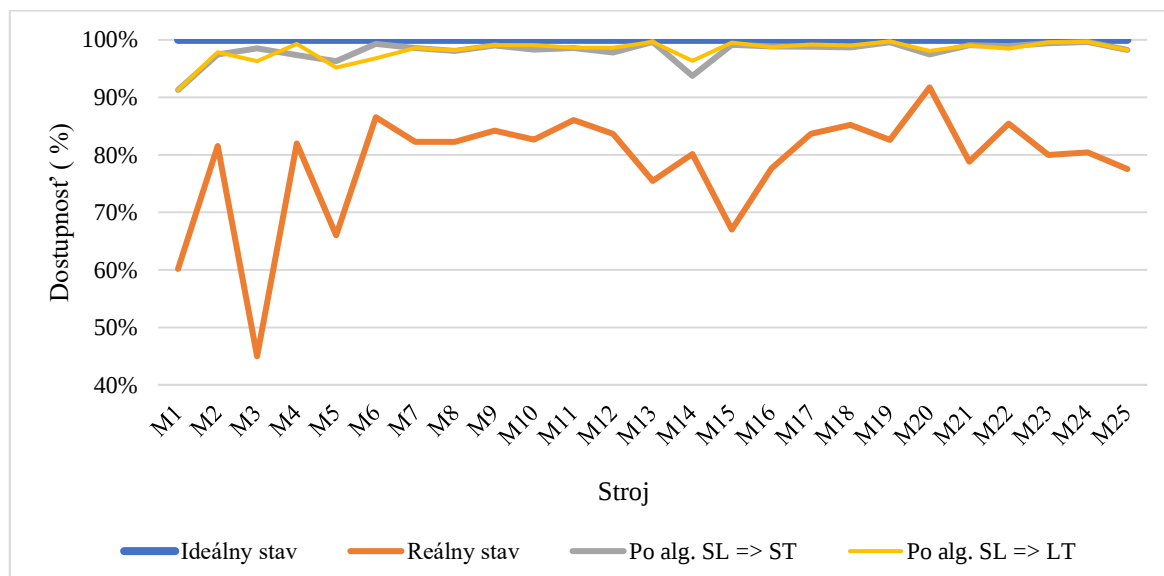
Stroj	Reálny Stav		Po algoritme SL => ST (1.variant algoritmu)				Po algoritme ST => LT (2.variant algoritmu)			
	D1 (%)	OEE1 (%)	D1 (%)	OEE1 (%)	D2 (%)	OEE2 (%)	D1 (%)	OEE1 (%)	D2 (%)	OEE2 (%)
M22	85,46	83,58	98,80	98,93	96,62	96,75	98,31	98,49	96,14	96,32
M23	79,99	75,77	99,33	99,40	94,09	94,16	99,52	99,57	94,27	94,32
M24	80,45	75,74	99,59	99,63	93,76	93,79	99,59	99,63	93,76	93,79
M25	77,53	76,96	98,01	98,22	97,29	97,50	98,01	98,22	97,29	97,50

Zdroj: vlastné spracovanie

Po uplatnení navrhovaných algoritmov na konkrétne dáta, s ktorými sme pracovali, bolo možné pozorovať nárast hodnoty ukazovateľa dostupnosti, a následne ukazovateľa OEE pre všetky stroje, s ktorými sme v rámci našej analýzy uvažovali, oproti stavu pred realizáciou algoritmov. Zároveň bolo možné pozorovať významnejší nárast hodnoty ukazovateľa dostupnosti a ukazovateľa OEE v prípade, že sme uvažovali s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 115 min. (hodnota D₂ je väčšia ako hodnota D₁ a hodnota OEE₂ je väčšia ako hodnota OEE₁ pre každý stroj), ktorej redukciu zo 129 min. na 115 min. sme dosiahli s využitím metódy SMED.

Graf 2 poskytuje vizuálne zobrazenie hodnôt dostupnosti pre jednotlivé stroje, pričom porovnáva ideálnu dostupnosť (D = 100 %) s dostupnosťou pri reálnom stave (pri plánovaní rozvrhu spoločnosťou), a pri stave po uplatnení navrhovaných algoritmov. Výpočet hodnoty dostupnosti, ktorá vychádza z reálneho stavu, sme realizovali na základe podielu času spracovania pridelených úloh jednotlivým strojom, na celkovom čase, t. j. čase, v ktorom prebiehalo spracovanie úloh, prestavby, či neplánované prestoje, pričom sme zohľadnili počet prestavieb, ktoré v spoločnosti nastali pri realizácii konkrétneho rozvrhu (100 prestavieb), a uvažovali sme s dĺžkou jednej prestavby v rozsahu 129 min.

Pri výpočte hodnoty dostupnosti vychádzajúcej zo stavu po využití algoritmov sme abstrahovali od prestojov, keďže tie boli len dôsledkom neefektívnosti reálneho procesu výroby. Čas spracovania úloh pridelených daným strojom sme vydelili celkovým časom, t. j. časom venovanom spracovaniu úloh a prestavbám. Zohľadnili sme pritom minimálny potrebný počet prestavieb zodpovedajúci súhrnnej výrobe pre dáta z daného mesiaca (72 prestavieb), a uvažovali sme s dĺžkou jednej prestavby v rozsahu 115 min. (po zlepšení navrhnutom pomocou metódy SMED).



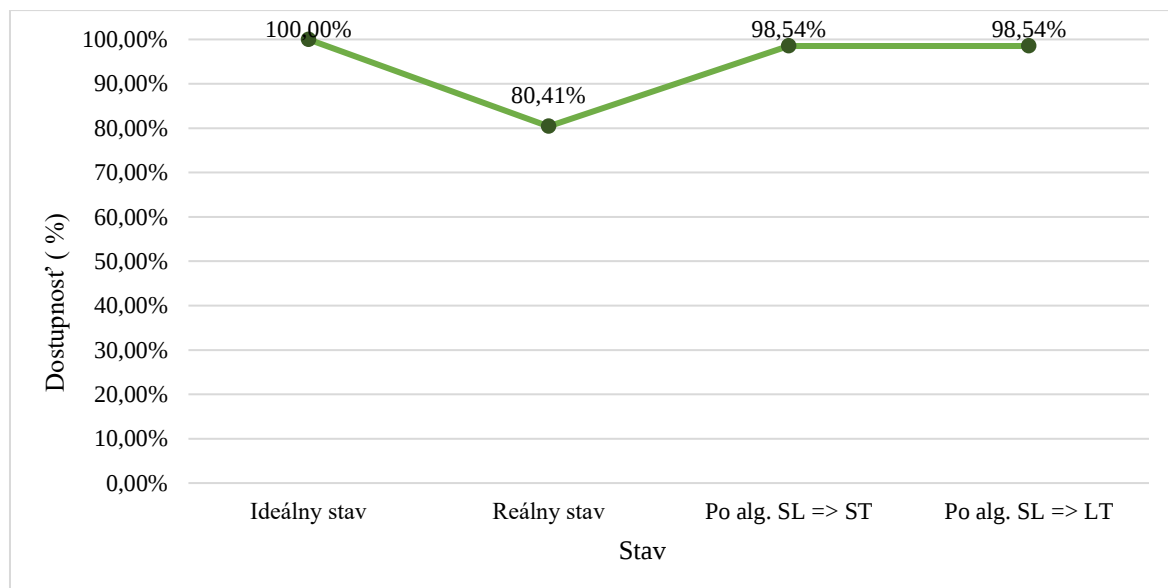
Graf 2 Dostupnosť strojov

Zdroj: vlastné spracovanie

Na základe Graf 2 možno konštatovať, že v skúmanej spoločnosti bol identifikovaný priestor pre zlepšenie v zmysle hodnôt dostupnosti jednotlivých strojov (čo znázorňuje priestor medzi červenou krivkou zobrazujúcou reálny stav a modrou krivkou zobrazujúcou stav dostupnosti, ktorý sa všeobecne v literatúre považuje za ideálny, t. j. 100 % - ná dostupnosť). Zelenou a fialovou krivkou sú znázornené hodnoty dostupnosti po uplatnení algoritmov, pričom tieto krivky vykazujú navzájom veľmi podobné hodnoty, čo poukazuje na porovnateľnú efektívnosť oboch použitých algoritmov. Zároveň možno pozorovať, že hodnoty po uplatnení algoritmov sú veľmi blízke hodnote všeobecne považovanej za ideálnu (čo znázorňuje blízkosť zelenej / fialovej krivky a modrej krivky) po zohľadnení uvedených predpokladov, ktoré predstavovali východisko pri realizácii výpočtu hodnôt dostupnosti. Krivky zobrazujúce dostupnosť pri navrhovaných algoritmoch tak možno považovať za ideálny stav pri týchto konkrétnych dátach. Ten sa od všeobecného ideálneho stavu odlišuje tým, že zahŕňa minimálny nevyhnutný počet prestavieb, ktoré je v procese nutné realizovať (pred spracovaním každej

z úloh), a ktorých trvanie je dôvodom toho, že riešenie po realizácii algoritmov možno z hľadiska celkového počtu prestavieb považovať za ideálne riešenie pri daných dátach, nie za všeobecne ideálne riešenie (vzniká priestor medzi zelenou/fialovou a modrou krivkou).

Súhrnné porovnanie priemerných hodnôt dostupnosti pre štyri porovnávané stavy (ideálny, reálny, po algoritme SL => ST, po algoritme SL => LT) zobrazuje Graf 3.

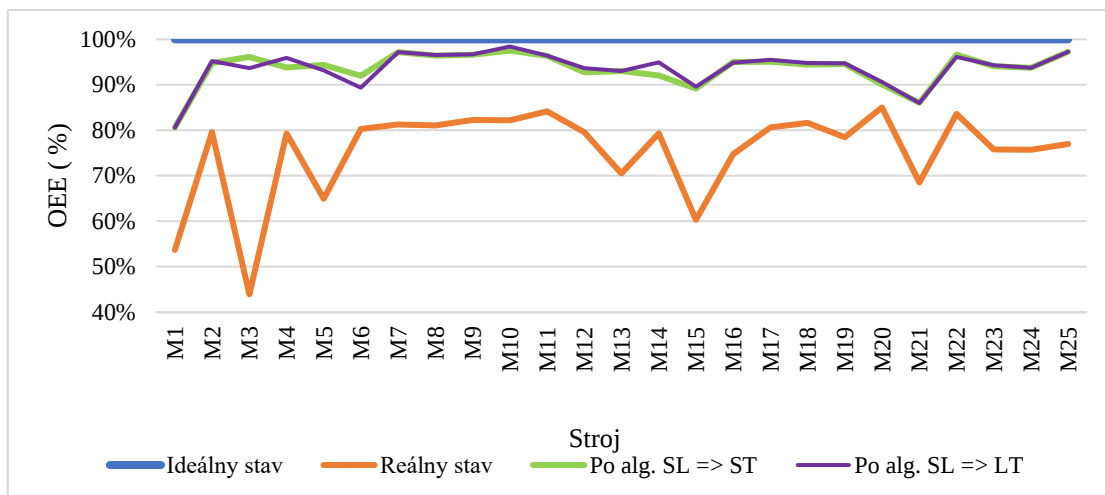


Graf 3 Priemerná dostupnosť strojov

Zdroj: vlastné spracovanie

Uplatnením myšlienky súhrnnej mesačnej výroby a navrhovaných algoritmov sme nadviazali na výsledky metódy SMED, a dosiahli synergický efekt v podobe ďalšieho zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby prostredníctvom zvýšenia dostupnosti jednotlivých strojov. Zvýšením dostupnosti strojov sme dosiahli potenciálne zvýšenie výrobnnej kapacity pre prichádzajúce objednávky v blízkom časovom horizonte, ako aj vytvorili priestor pre prijatie objednávok väčšieho objemu či variability v prípade, že by bol niektorý z uvedených algoritmov využitý v procese plánovania a rozvrhovania výroby na mesiac január 2019 v skúmanej spoločnosti.

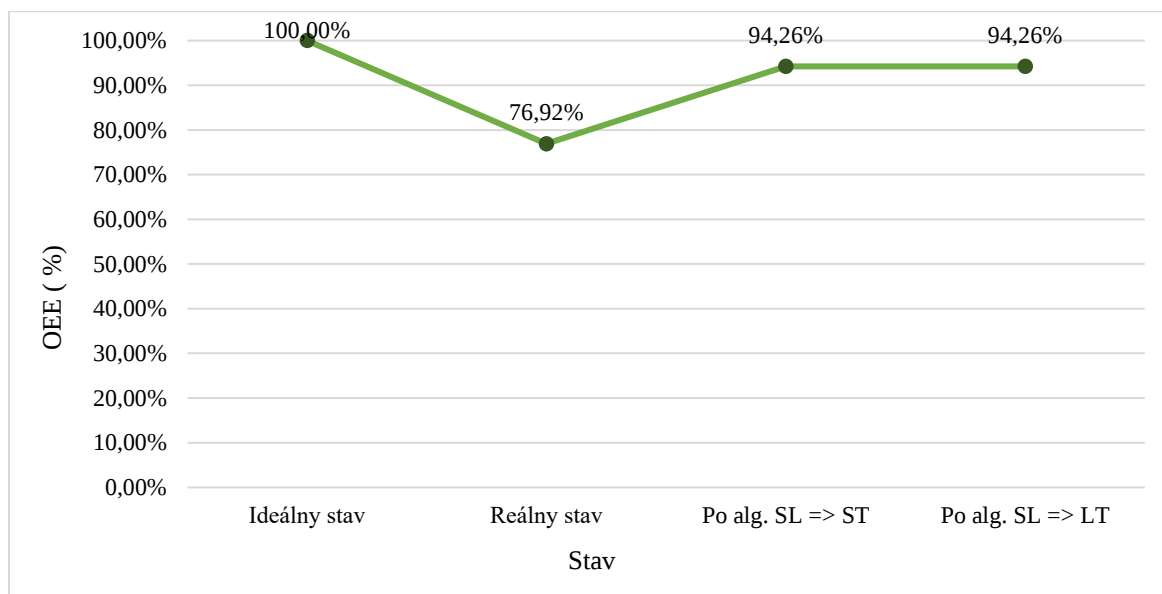
Graf 4 zobrazuje porovnanie hodnôt ukazovateľa OEE pre jednotlivé stroje v rámci štyroch skúmaných stavov. Podobne ako v prípade parciálneho ukazovateľa dostupnosti, je možné po uplatnení navrhovaných algoritmov identifikovať zlepšenie reálneho stavu a priblíženie sa k ideálnym hodnotám.



Graf 4 OEE strojov

Zdroj: vlastné spracovanie

Súhrnné porovnanie priemerných hodnôt ukazovateľa OEE pre štyri porovnávané stavy zobrazuje Graf 5.



Graf 5 Priemerné OEE strojov

Zdroj: vlastné spracovanie

Cieľom definovaného problému optimalizácie, ktorý sme následne riešili s využitím heuristických algoritmov, bola minimalizácia makespanu t. j. maximálneho času spracovania, ktorý predstavuje dĺžku výrobného rozvrhu, resp. čas od začiatku spracovania prvej úlohy pridelenej danému stroju až po koniec spracovania poslednej úlohy pridelenej danému stroju.

Ukazovateľ makespan sa zvykne používať aj ako kritérium pri meraní vyťaženia stroja, čo využívame aj v rámci tejto práce. Mieru vyťaženia jednotlivých strojov (ktorá predstavuje makespan) pri zohľadnení reálneho rozvrhu navrhnutého spoločnosťou uvádzame v Tab. 4, pri zohľadnení rozvrhu po uplatnení algoritmu „SL => ST“ uvádzame v Tab. 12, a pri zohľadnení rozvrhu po uplatnení algoritmu „SL => LT“ uvádzame v Tab. 15.

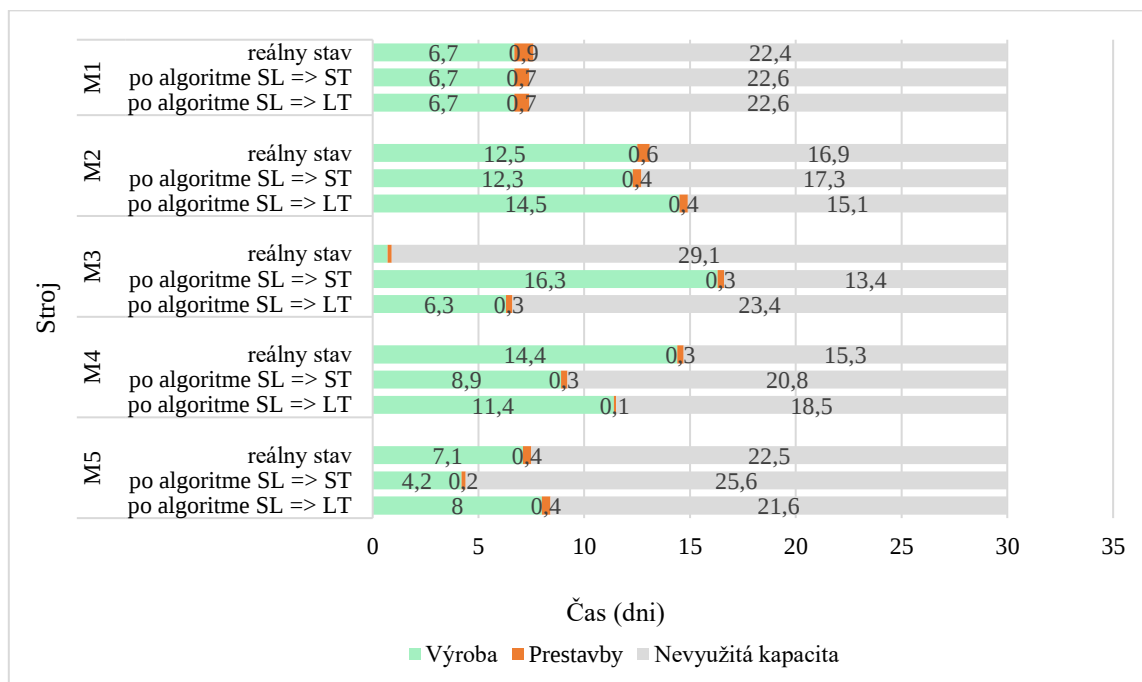
Súhrnné vizuálne zobrazenie uvedených skutočností poskytujú aj Graf 6 - Graf 10. Pri ich tvorbe sme abstrahovali od neplánovaných prestojov, ktoré v spoločnosti nastali v mesiaci január 2019, čo nám umožňuje porovnávať dĺžku výrobného času (zelenou farbou v grafe) a prestavieb (oranžovou farbou v grafe) pri reálnom stave a pri uplatnení jednotlivých variant algoritmu. Zvyšný čas v mesiaci január (spolu k dispozícii 30 potenciálnych výrobných dní v období: 2.1. – 31.1.) predstavuje nevyužitú kapacitu (sivou farbou v grafe). Za účelom efektnejšieho vizuálneho zobrazenia sme pre každý stroj uviedli celkovú dĺžku výrobného času, na ktorú nadväzuje celková dĺžka prestavieb. Pri realizácii tohto rozvrhu samozrejme predpokladáme s rozdelením prestavieb, t. j. pred začiatkom výroby predpokladáme realizáciu jednej prestavby v súvislosti s vykonaním potrebných nastavení procesu, a podobne, po každej z ďalších vykonaných úloh predpokladáme realizáciu jednej prestavbovej činnosti v súvislosti s prestavbou procesu, t. j. jeho prípravou na spracovanie nasledujúcej úlohy.

V prípade niektorých strojov je možné pozorovať relatívne vysoký počet nevyužitých dní v priebehu mesiaca január 2019. Dôvodom môžu byť uvedené špecifické vlastnosti jednotlivých strojov, predovšetkým veľkosť ich uzatváracej sily, na základe ktorej sa určuje, aké typy výrobkov je možné na daných strojoch produkovať. Nižší počet nevyužitých dní pri daných strojoch je možné pripísať relatívne nízkemu dopytu po výrobkoch, ktoré dané stroje boli schopné produkovať, v mesiaci január 2019. Ďalším dôvodom je relatívne vysoký počet prestojových časov, ktoré v spoločnosti nie sú presne sledované a špecifikované. Proces sa tak stáva neefektívnym. Riešením by bolo zoštíhlenie daného procesu, v rámci ktorého by bolo potrebné štandardizovať časy jednotlivých nevyhnutných prestojových činností.

Ako uvádzame v metodologickej časti práce, využitie ukazovateľa makespan na porovnanie efektívnosti algoritmov voči reálnemu stavu (ktorý v spoločnosti nastal), nie je v tomto prípade vhodným riešením, keďže sme pri navrhovaní algoritmov uvažovali so súhrnnou výrobou, t. j. algoritmy s cieľom minimalizovať počet potrebných prestavieb nebrali do úvahy možnosť vyrábať nejakú úlohu po častiach, ale rozvrhli každú úlohu tak, aby sa vyrábala naraz. Z tohto dôvodu možno v Graf 9 pri rozvrhoch vytvorených pomocou algoritmov pozorovať potrebu časovej kapacity nad 30 dní pre spracovanie pridelených úloh

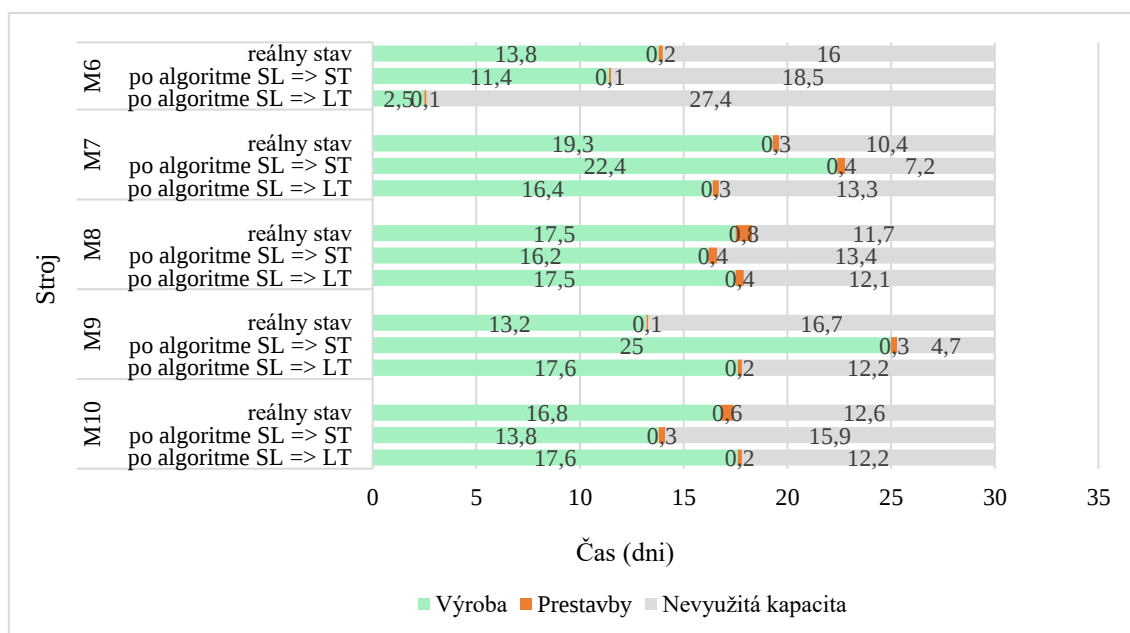
strojom „M19“. Ak by bolo naším cieľom realizovať všetky prijaté úlohy v mesiaci január, bolo by možné v tomto prípade časť úlohy s por. č. 23 vyrábať na stroji „M19“ a zvyšnú časť na stroji „M20“, príp. „M17“. Efektívnosť riešenia navrhnutého algoritmi pre stroj „M19“ by sa však prejavila v dlhšom časovom období (ak by sme brali do úvahy minimálne ďalší výrobný týždeň). Perspektívne by bolo zároveň účinné sledovať potenciálne efekty súhrnnej výroby na náklady podniku, pri realizácii ktorej z tohto dôvodu zároveň navrhujeme zohľadnenie veľkosti optimálnej dávky.

Graf 6 - Graf 10 zobrazujú porovnanie makespanu (vyťaženia) jednotlivých strojov pri vytvorení rozvrhov pomocou algoritmov, voči reálnemu stavu.



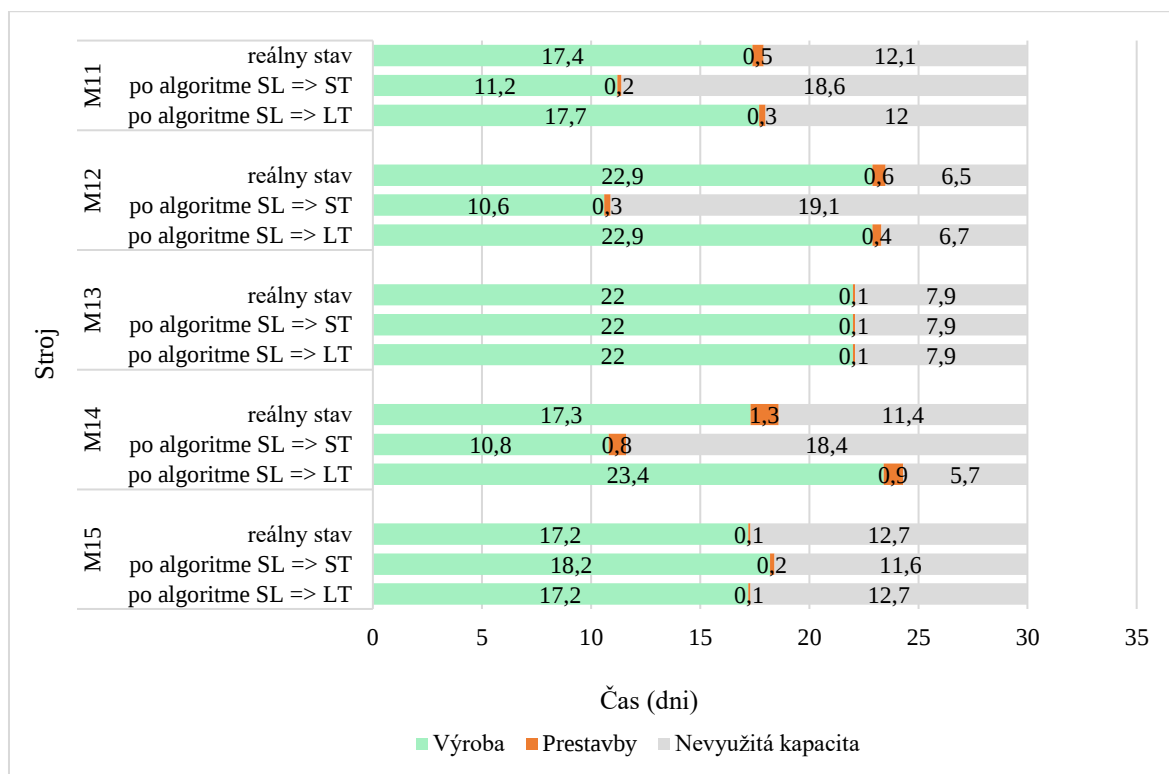
Graf 6 Makespan strojov M1 - M5

Zdroj: vlastné spracovanie



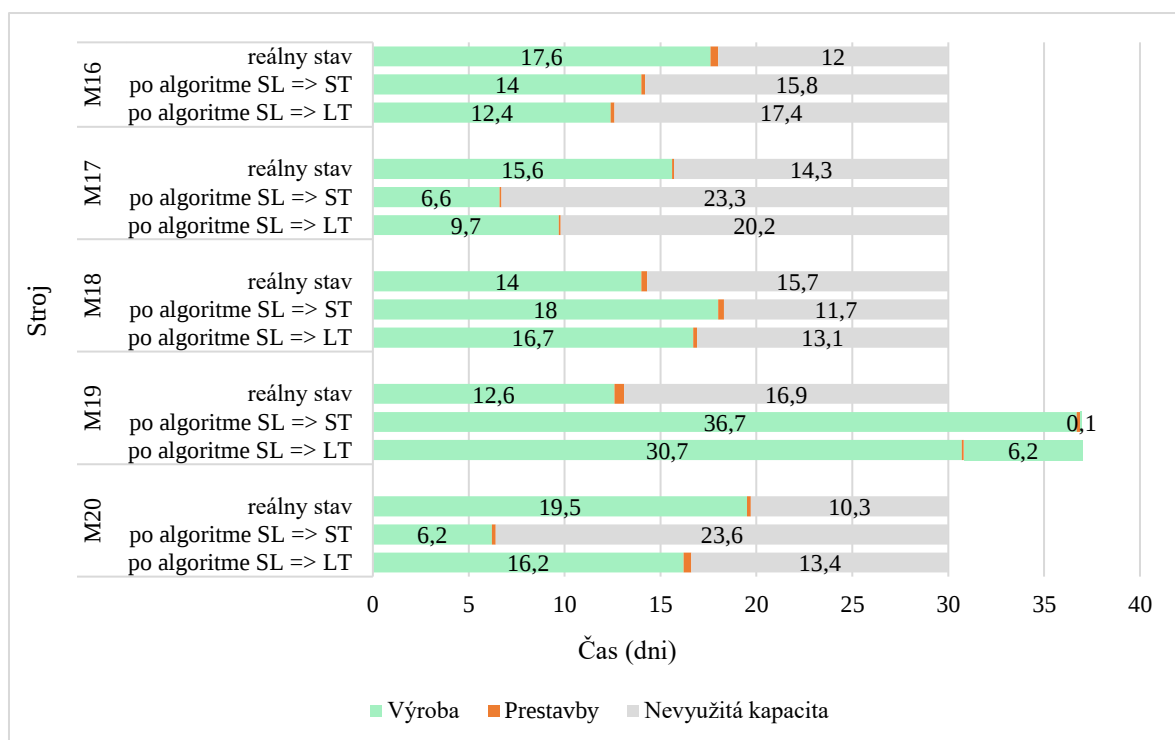
Graf 7 Makespan strojov M6 - M10

Zdroj: vlastné spracovanie



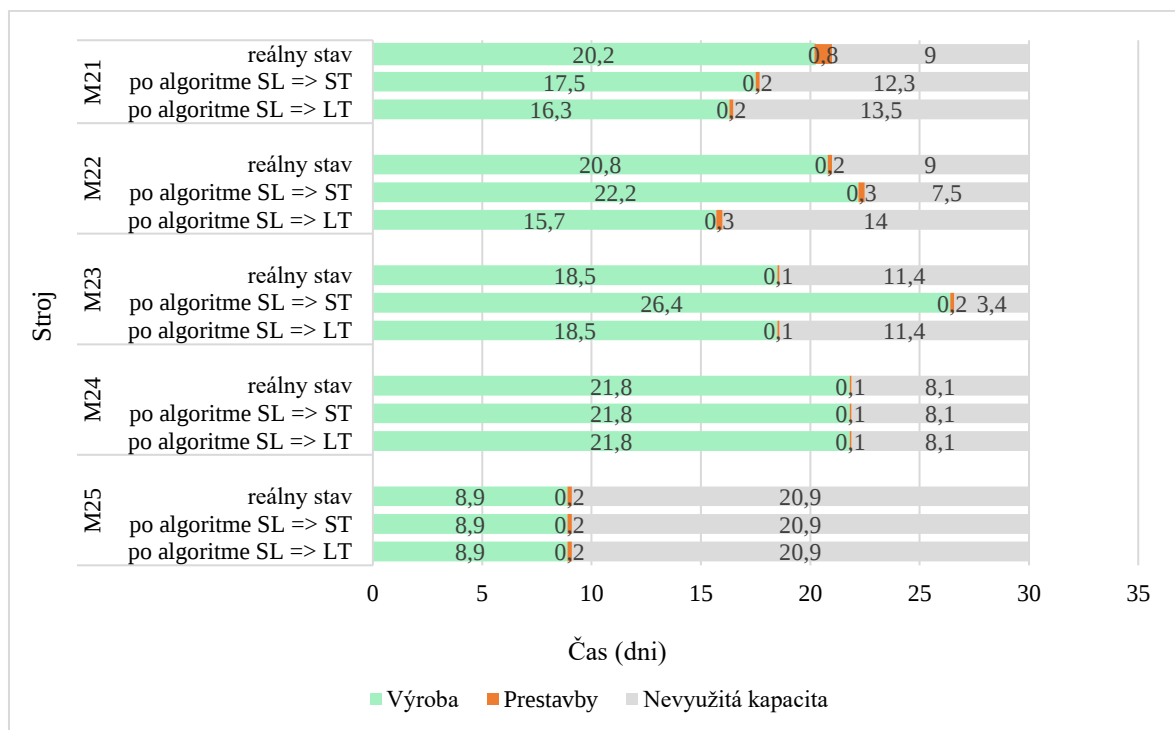
Graf 8 Makespan strojov M11 - M15

Zdroj: vlastné spracovanie



Graf 9 Makespan strojov M16 - M20

Zdroj: vlastné spracovanie



Graf 10 Makespan strojov M21 - M25

Zdroj: vlastné spracovanie

V tejto práci riešime uvádzaný problém rozvrhovania výroby prioritne pomocou dvoch variant konštruktívneho heuristického algoritmu, všeobecne používaných pri problémoch rozvrhovania.

Prvý variant algoritmu „SL=>ST“ využíval SPT dispečerské prioritné pravidlo, na základe ktorého na najmenej vytiažený stroj v danom čase alokoval úlohu s najkratším časom spracovania z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

Druhý variant algoritmu „SL=>LT“ využíval LPT dispečerské prioritné pravidlo, na základe ktorého na najmenej vytiažený stroj v danom čase alokoval úlohu s najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

V tejto časti navrhujeme ďalšie štyri obmeny konštruktívneho heuristického algoritmu, ktoré možno považovať za alternatívny prístup k riešeniu uvedeného problému rozvrhovania.

Tretí variant algoritmu, ktorého možno nazvať „SL=> ST-LT“, využíva striedavo SPT aj LPT prioritné pravidlá. Najprv priradí na najmenej vytiažený stroj v danom čase úlohu s najkratším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Následne na práve najmenej vytiažený stroj v novom (aktuálnom) čase priradí úlohu s najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať, atď.

Štvrtý variant algoritmu možno nazvať „5 SL“ => „1 SL (2019)“ => ST“ využíva SPT dispečerské prioritné pravidlo. Tento algoritmus vyhľadá päť najmenej vytiažených strojov v danom čase, následne z nich vyberie ten stroj, ktorý bol v skúmanej spoločnosti v roku 2019 vytiažený najmenej, a k nemu priradí úlohu s najkratším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

Piaty variant algoritmu možno nazvať „5 SL“ => „1 SL (2019)“ => LT“ využíva LPT dispečerské prioritné pravidlo. Tento algoritmus vyhľadá päť najmenej vytiažených strojov v danom čase, následne z nich vyberie ten stroj, ktorý bol v skúmanej spoločnosti v roku 2019 vytiažený najmenej, a k nemu priradí úlohu s najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať.

Šiesty variant algoritmu možno nazvať „5 SL“ => „1 SL (2019)“ => ST-LT“ využíva striedavo SPT aj LPT prioritné pravidlá. Tento algoritmus vyhľadá päť najmenej vytiažených strojov v danom čase, následne z nich vyberie ten stroj, ktorý bol v skúmanej spoločnosti v roku

2019 vytážený najmenej a k nemu priradí úlohu s najkratším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Následne vyhľadá päť najmenej vytážených strojov v novom (aktuálnom) čase, následne z nich vyberie ten stroj, ktorý bol v skúmanej spoločnosti v roku 2019 vytážený najmenej, a k nemu priradí úlohu s najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré je možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať, atď.

Tab. 19 a Tab. 20 obsahuje súhrnné informácie o hodnotách celkového makespanu, počtu prestavieb, dostupnosti a ukazovateľa OEE pre jednotlivé stroje pri uplatnení ďalších štyroch uvedených variant algoritmu. Tab. 19 zobrazuje výsledky pri použití 3. a 4. variantu algoritmu. Výsledky po použití 5. a 6. variantu algoritmu sú uvedené v Tab. 20.

Pri každom z navrhovaných algoritmov došlo k zvýšeniu hodnôt dostupnosti a hodnoty celkového ukazovateľa OEE pre každý stroj oproti reálnemu stavu, tj. skutočnému stavu pred realizáciou algoritmov, o čom svedčí Graf 11 a Graf 12.

Tab. 19 Výsledky po uplatnení 3. & 4. variantu algoritmu

Stroj	Po algoritme SL=> ST-LT (3. variant algoritmu)				Po algoritme 5 SL => 1 SL(2019)=> ST (4. variant algoritmu)			
	Makespan	Počet prestavieb	D (%)	OEE (%)	Makespan	Počet prestavieb	D (%)	OEE (%)
M1	1035088	9	0,9434	84,18 %	578248	8	0,9129	81,46 %
M2	588875	4	0,9552	93,21 %	1040149	3	0,9805	95,68 %
M3	528649	2	0,9746	95,22 %	1371442	3	0,9851	96,25 %
M4	1252740	3	0,9837	95,11 %	965529	3	0,979	94,66 %
M5	603450	3	0,9668	95,19 %	395310	3	0,9502	93,56 %
M6	980000	1	0,993	92,08 %	1188000	2	0,9885	91,67 %
M7	1111750	3	0,9817	96,97 %	1547090	4	0,9825	97,05 %
M8	1657337	5	0,9796	96,57 %	1544198	5	0,9781	96,42 %
M9	1520250	2	0,991	96,81 %	2443670	4	0,9888	96,60 %
M10	1603417	3	0,9873	98,16 %	954550	2	0,9857	98,00 %
M11	1340983	3	0,9848	96,38 %	963583	2	0,9859	96,49 %
M12	1980375	5	0,9829	93,52 %	1400325	3	0,9854	93,76 %
M13	1896960	1	0,9964	93,08 %	1896960	1	0,9964	93,08 %
M14	1434450	10	0,9541	94,43 %	346950	8	0,8627	85,38 %
M15	1482300	1	0,9954	89,62 %	-	-	-	-
M16	1520100	2	0,991	95,39 %	2691300	3	0,9924	95,52 %
M17	1143930	2	0,9881	95,25 %	3208335	2	0,9957	95,98 %
M18	1437875	2	0,9905	94,93 %	1276959	3	0,984	94,31 %
M19	2645325	1	0,9974	94,79 %	645960	2	0,9791	93,05 %
M20	1391775	4	0,9806	90,88 %	1551731	3	0,9868	91,46 %
M21	1293400	1	0,9947	86,48 %	1293400	1	0,9947	86,48 %
M22	1228000	2	0,9889	96,71 %	1228000	2	0,9889	96,71 %
M23	1592184	1	0,9957	94,32 %	2280684	2	0,994	94,16 %
M24	1881468	1	0,9963	93,79 %	1881468	1	0,9963	93,79 %
M25	306345	1	0,978	97,09 %	763185	2	0,9822	97,50 %

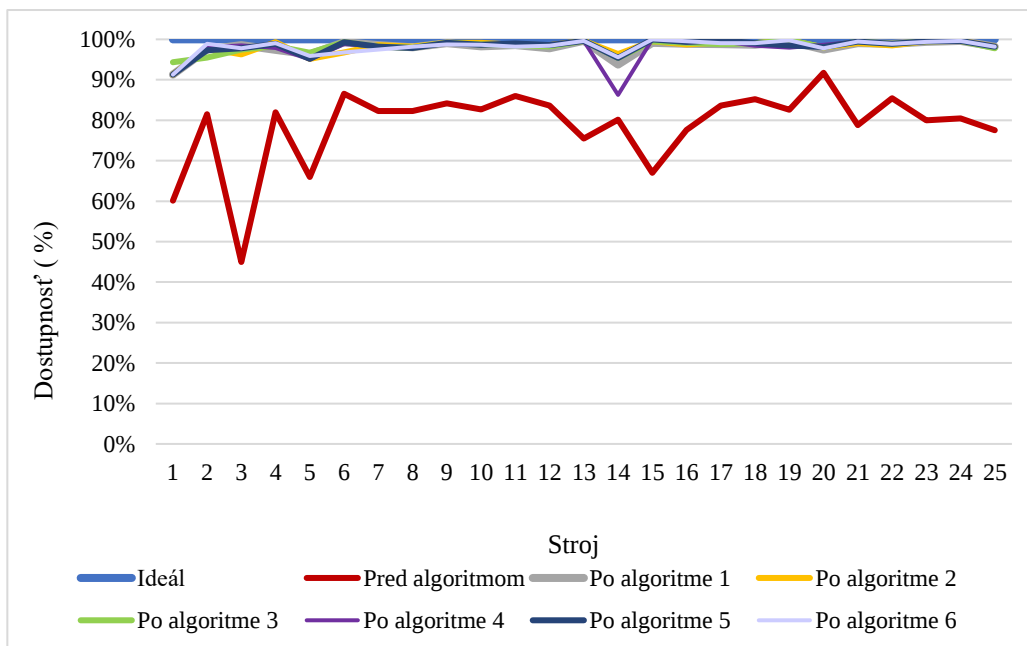
Zdroj: vlastné spracovanie

Tab. 20 Výsledky po uplatnení 5. & 6. variantu algoritmu

Stroj	Po algoritme 5 SL => 1 SL(2019)=> LT (5. variant algoritmu)				Po algoritme 5 SL => 1 SL (2019) => ST-LT (6. variant algoritmu)			
	Makespan	Počet presta- vieb	D (%)	OEE (%)	Makespan	Počet presta- vieb	D (%)	OEE (%)
M1	578248	8	0,9129	81,46 %	578248	8	0,9129	81,46 %
M2	996875	4	0,9731	94,96 %	1216125	2	0,9888	96,49 %
M3	934091	3	0,9783	95,59 %	934091	3	0,9783	95,59 %
M4	1243965	2	0,989	95,62 %	1490840	2	0,9908	95,80 %
M5	685200	5	0,9521	93,75 %	640932	4	0,9587	94,40 %
M6	980000	1	0,993	92,08 %	208000	1	0,9679	89,76 %
M7	1111750	3	0,9817	96,97 %	1341893	5	0,9749	96,30 %
M8	1269567	4	0,9787	96,48 %	1504617	4	0,982	96,81 %
M9	1520250	2	0,991	96,81 %	2244000	4	0,9878	96,50 %
M10	1557883	3	0,9869	98,12 %	1565383	3	0,9869	98,12 %
M11	1376550	2	0,9901	96,90 %	1113900	3	0,9818	96,09 %
M12	1962825	4	0,9861	93,83 %	1280325	3	0,9841	93,64 %
M13	1896960	1	0,9964	93,08 %	1896960	1	0,9964	93,08 %
M14	1577130	11	0,9541	94,43 %	1490370	10	0,9558	94,60 %
M15	-	-	-	-	-	-	-	-
M16	2170800	2	0,9937	95,65 %	1482300	1	0,9954	95,81 %
M17	2645325	1	0,9974	96,15 %	1394610	2	0,9902	95,45 %
M18	1437875	2	0,9905	94,93 %	1437875	2	0,9905	94,93 %
M19	1329960	3	0,9847	93,58 %	2645325	1	0,9974	94,79 %
M20	1423535	4	0,981	90,92 %	1544495	5	0,9782	90,66 %
M21	1293400	1	0,9947	86,48 %	1293400	1	0,9947	86,48 %
M22	1228000	2	0,9889	96,71 %	1228000	2	0,9889	96,71 %
M23	1592184	1	0,9957	94,32 %	2280684	2	0,994	94,16 %
M24	1881468	1	0,9963	93,79 %	1881468	1	0,9963	93,79 %
M25	763185	2	0,9822	97,50 %	763185	2	0,9822	97,50 %

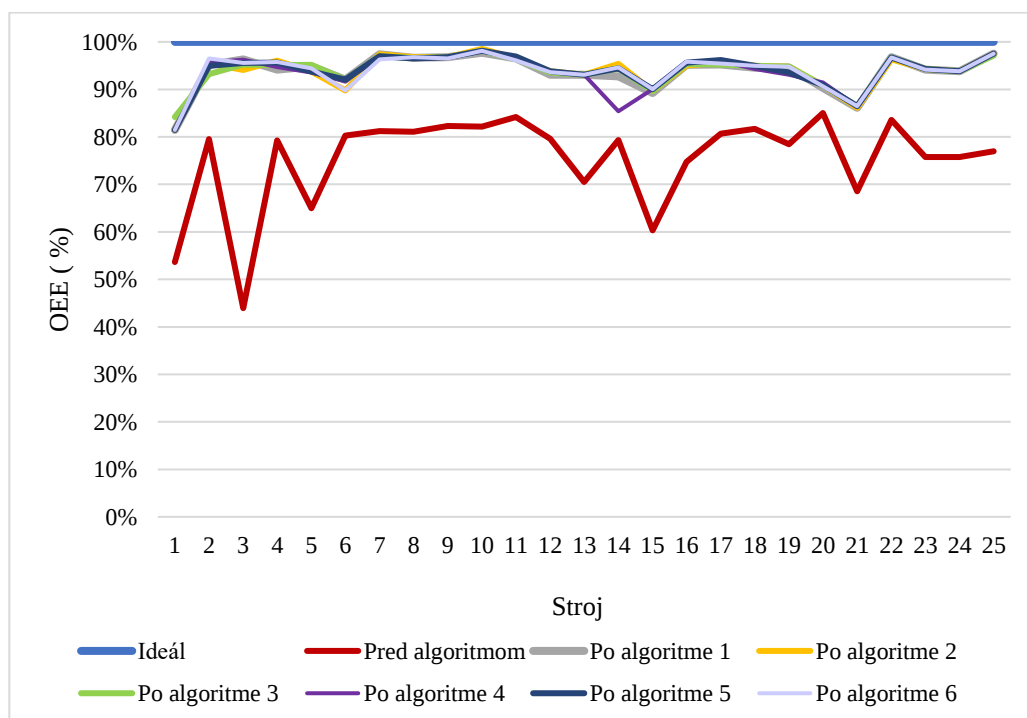
Zdroj: vlastné spracovanie

Porovnanie hodnôt dostupnosti pre jednotlivé stroje pri rozličných stavoch (ideál, pred algoritmom, po algoritme 1-6) zobrazuje Graf 11. Graf 12 zobrazuje porovnanie hodnôt OEE pre jednotlivé stroje pri rozličných stavoch (ideál, pred algoritmom, po algoritme 1-6).



Graf 11 Porovnanie dostupnosti

Zdroj: vlastné spracovanie



Graf 12 Porovnanie OEE

Zdroj: vlastné spracovanie

5 Diskusia

V tejto práci sme navrhli model optimalizácie v oblasti plánovania a rozvrhovania výroby, založený na kolobehu neustáleho zlepšovania procesov v súlade s DMAIC cyklom, pozostávajúci z piatich opakujúcich sa fáz:

1. *fáza*: definovanie cieľov a predmetov zlepšovania procesu a definovanie dát vstupujúcich do procesu plánovania výroby
2. *fáza*: meranie výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby vo vybranom podniku
3. *fáza*: analýza výsledkov zistených v procese merania a identifikácia priestoru na zlepšenie súčasného stavu
4. *fáza*: návrh spôsobu zvýšenia výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby s využitím vhodných metód
5. *fáza*: realizácia opätovného merania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby po implementácii navrhovaných metód a vyhodnotenie miery zlepšenia

Zároveň sme preukázali spôsob využitia tohto modelu v procese plánovania a rozvrhovania výroby na príklade konkrétnych dát skúmanej spoločnosti. Všeobecná formulácia jednotlivých fáz v rámci **uvedeného modelu** umožňuje jeho **využitie pre akúkoľvek výrobnú spoločnosť**. Podobne, využitie metódy SMED za účelom redukcie interného prestavbového času, a ukazovateľa OEE na meranie výkonnosti procesu, je vhodné pre akýkoľvek výrobný podnik, za predpokladu, že dokáže zaznamenávať údaje potrebné pre ich implementáciu. Využitie navrhovaných variant konštruktívneho heuristického algoritmu je vhodné pre výrobné spoločnosti s paralelným usporiadaním strojov, ktoré zároveň spĺňajú ďalšie predpoklady, ktoré sme si stanovili pred realizáciou navrhovaných algoritmov v metodologickej časti. V prípade potreby a ak to situácia umožňuje, je možné navrhované algoritmy modifikovať a prispôbiť ich požiadavkám a prioritám konkrétného podniku.

Model, ktorý navrhujeme v tejto práci, považujeme za potenciálne prínosný obzvlášť pre malé a stredné podniky, u ktorých je implementácia sofistikovaných komplexných riadiacich systémov (ako napr. SAP) a iných softvérových riešení za účelom

plánovania a rozvrhovania výroby často neefektívna z hľadiska potreby relatívne vysokých investičných nákladov. Navrhovaný model adresujeme predovšetkým tým **podnikom, ktoré doteraz využívali intuíciu a empirický prístup v procese plánovania a rozvrhovania výroby. Ponúkame riešenie v podobe systematického prístupu, s využitím efektívnych a v praxi validovaných metód štíhleho manažmentu a konštruktívnej heuristiky.**

Ako sme už spomenuli v úvode tejto práce, súčasným trendom je customizácia a výroba v malých až stredných dávkach, čo môže v procese spôsobovať neefektívnosť z hľadiska času a nákladov. Navrhovaný model považujeme za prínosný **predovšetkým v súčasnosti z dôvodu pretrvávajúcej pandemickej situácie.** Táto situácia prispela k ešte intenzívnejšiemu hľadaniu úzkych miest a mudy podnikmi za účelom ich redukcie a zníženia nákladov, pričom momentálna atmosféra v podnikoch nesvedčí o ich motivácii investovať do sofistikovaných riešení. Okrem zvýšenej snahy o úsporu nákladov došlo v mnohých podnikoch v posledných mesiacoch k poklesu zákaziek, čím boli nútené prejsť k redukcii počtu dní výroby. Už len redukcia 7-dňového výrobného týždňa na 5-dňový výrobný týždeň predstavuje redukcii výrobnnej kapacity o viac ako 25 %. Hľadanie spôsobov efektívneho využitia dostupných kapacít je v tejto situácii obzvlášť aktuálne a dôležité. Riešenia, ktoré uvádzame v tejto práci, považujeme preto za prínosné aj v tomto období ovplyvnenom pandémiou. Pre niektoré spoločnosti môže byť však redukcia pracovného týždňa želaným stavom, bez ohľadu na pandemickú krízu. Jedným z dôvodov môže byť vysoká cena práce, a to predovšetkým počas víkendov. Je teda v ekonomickom záujme týchto spoločností vyrobiť potrebný objem výrobkov, pri zachovaní ich kvalitatívnych a výkonnostných parametrov za kratšie časové obdobie, a to je možné dosiahnuť práve zvýšením dostupnosti strojov, s využitím vhodných metód a riešení.

V tejto práci bolo našou snahou poskytnúť transparentný postup realizácie navrhovaných riešení, z ktorého možno získať predstavu aj o ich časovej efektívnosti a to aj v prípade, že spoločnosť nedisponuje akýmkoľvek softvérom alebo programom. Pri dodržaní a osvojení si uvedených krokov si realizácia navrhovaných variant konštruktívneho heuristického algoritmu manuálne, s pomocou Ms Excel, vyžaduje odhadom nanajvýš niekoľko desiatok minút (pri realizácii zjednodušeného variantu bez matíc je potrebný čas ešte kratší) pri zohľadnení rozsahu dát, s ktorým sme uvažovali. Implementáciu navrhovaných riešení v inej výrobnej spoločnosti preto považujeme za potenciálne efektívnu z hľadiska nákladov a času. Maticový zápis algoritmu je vhodnou alternatívou v prípade, že spoločnosť bude sledovať konkrétne dĺžky prestavbových časov a vplyv poradia spracovania jednotlivých úloh

na dĺžku ich spracovania. Hodnoty prestavbových časov môžu následne po ich pripočítaní k výrobným časom predstavovať vstupy pre maticový zápis algoritmu.

Hlavným a nevyhnutným predpokladom pre implementáciu navrhovaných riešení je zavedenie systému evidencie všetkých činností, aktivít a procesov, ktoré súvisia s procesom plánovania a rozvrhovania výroby, vrátane presnej dĺžky ich trvania, v danom podniku. Časy trvania všetkých aktivít v procese je nutné normovať, merať a optimalizovať. Za účelom ďalšej analýzy je potrebné exaktne definovať trvanie plánovaných a neplánovaných prestojov, prestavieb, či iných zdrojov neefektívnosti v procese. Všetky neplánované prestoje je potrebné priebežne analyzovať a následne realizovať aktivity s cieľom zamedziť ich opakovanému výskytu. Odporúčame tiež vypracovať a štandardizovať systém detekcie a eliminácie neplánovaných prestojov, keďže prítomnosť neplánovaných prestojov v procese môže mať výrazný vplyv na pokles dostupnosti jednotlivých strojov. Realizácia prestavbových aktivít je však vo výrobnom procese, kde dochádza k spracovaniu viac ako jedného typu úlohy na konkrétnom stroji, nevyhnutná. Aj v tomto prípade je možné a potrebné zamerať sa na redukcii počtu prestavieb (pomocou myšlienky súhrnnej výroby a optimálnej dávky), resp. na redukcii dĺžky interných prestavieb (pomocou metódy SMED), ktoré v procese predstavujú zdroj neefektívnosti.

Pri implementácii navrhovaných riešení je dôležité poznať charakter konkrétnej spoločnosti a procesov v nej prebiehajúcich a tomu prispôbiť využitie vhodných nástrojov a metód, ako aj prístupov pri ich realizácii. V rámci navrhovaného algoritmu je možné zvážiť zmenu prístupu, ak si to potreby a preferencie danej spoločnosti vyžadujú. Ako jeden z návrhov pre ďalší výskum a realizáciu v podnikovej sfére, odporúčame napríklad založiť myšlienku konštruktívneho heuristického algoritmu na hľadaní viacerých najmenej vyťažených strojov v danom čase a vyťažiť ten stroj, ktorý daná spoločnosť považuje za prioritný. Zvolenou prioritou môže byť miera vyťaženia daného stroja počas uplynulých mesiacov, frekvencia prestavieb realizovaných na danom stroji, variabilita úloh, ktoré daný stroj dokáže spracovať, veľkosť objednávky či dôležitosť zákazníka vzťahujúca sa k úlohám, ktoré je možné spracovať na danom stroji, a i.

Pre porovnanie efektívnosti pre jednotlivé stroje po uplatnení rôznych typov algoritmov využívame priemernú hodnotu ukazovateľa OEE. Alternatívou by mohlo byť realizovanie porovnania na základe toho, ktorý z algoritmov má schopnosť zvýšiť dostupnosť resp. OEE u väčšieho počtu strojov, ktoré spoločnosť považuje za strategické. Ďalším návrhom pre budúci výskum by mohlo byť uplatnenie navrhovaných algoritmov (prípadne ich modifikácií), spolu

s myšlienkou súhrnnej výroby a optimálnej dávky, pre dlhšie plánovacie obdobie. Za týmto účelom je možné využiť nástroje programovania, či simulácie. Následne je potrebné vyhodnotiť efektívnosť takto získaných riešení.

Základným predpokladom pre zvýšenie efektívnosti akéhokoľvek procesu je meranie jeho súčasnej efektívnosti. Schopnosť zaznamenávať, analyzovať, interpretovať, a optimalizovať veľký objem dát sa stáva kľúčovým zdrojom konkurenčnej výhody podnikov, predovšetkým v kontexte nastupujúcej štvrtej priemyselnej revolúcie.

Záver

V tejto práci sme navrhli **model optimalizácie procesu plánovania a rozvrhovania výroby, v súlade s DMAIC cyklom**. Súčasťou tohto modelu je návrh spôsobu merania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby, ako aj návrh metód na zvýšenie výkonnosti tohto procesu. Na meranie výkonnosti procesu sme využili komplexný ukazovateľ OEE pozostávajúci z troch parciálnych ukazovateľov - dostupnosti, výkonnosti a kvality. Následne sme sa zamerali na návrh metód a spôsobov na zvýšenie hodnoty ukazovateľa dostupnosti. Za týmto účelom sme využili metódu SMED, myšlienku súhrnnej výroby, a viaceré varianty konštruktívneho heuristického algoritmu.

Metóda SMED patrí medzi metódy štíhleho manažmentu. Pomocou metódy SMED sme navrhli redukciu počtu vybraných interných prestavbových aktivít predstavujúcich v procese zdroj neefektívnosti (mudu), čím sme dosiahli skrátenie interného prestavbového času v rámci jednej prestavby zo 129 minút na 115 minút. Po zohľadnení počtu všetkých realizovaných prestavieb v skúmanej spoločnosti v roku 2019 sme vyčíslili potenciálnu úsporu času venovaného prestavbovým aktivitám, vo výške 355 hodín, čo po zohľadnení priemernej hodinovej sadzby stroja vo výške približne 17 eur/h, predstavuje **potenciálnu ročnú úsporu výrobných nákladov** vo výške **6035 eur**. Redukciou interných prestavbových časov pomocou metódy SMED sme preukázali zvýšenie hodnoty ukazovateľa dostupnosti pre jednotlivé stroje, a tým zvýšenie hodnoty ukazovateľa OEE.

V ďalšej časti sme uplatnili **myšlienku súhrnnej výroby** (výroba celého objednaného množstva prislúchajúceho danej úlohe naraz, v rámci skúmaného mesiaca), pomocou ktorej sme dosiahli **redukciu počtu prestavieb zo 100 na 72**. Túto myšlienku sme vzali do úvahy pri zadávaní vstupných dát do ďalej navrhovaného algoritmu. Zároveň sme poukázali na vhodnosť doplnenia myšlienky súhrnnej výroby o aspekt optimálnej dávky pri uvažovaní s dlhším časovým obdobím, za účelom zohľadnenia ekonomickej stránky súhrnnej výroby.

Následne sme formulovali problém optimalizácie rozvrhovania výroby v prostredí paralelných strojov. Keďže tento druh problému patrí do kategórie NP- ťažkých problémov, na jeho riešenie sme využili **konštruktívny heuristický algoritmus**.

Prvý variant navrhovaného algoritmu, ktorý sme nazvali „SL => ST“, na najmenej vyťažený stroj v danom čase alokoval úlohu s najkratším časom spracovania z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Druhý variant

navrhovaného algoritmu, ktorý sme nazvali „SL => LT“, na najmenej vytiažený stroj v danom čase alokoval úlohu s najdlhším časom spracovania z množiny úloh, ktoré bolo možné z technologického hľadiska na danom stroji spracovať. Vstupné dáta pre všetky varianty algoritmu pritom zohľadňovali myšlienku súhrnnej výroby. Ich výsledkom bol výrobný rozvrh, na základe ktorého sme kalkulovali hodnotu ukazovateľa dostupnosti pre každý z uvažovaných strojov, a porovnávali ju s hodnotou dostupnosti dosiahnutou v spoločnosti pred uplatnením algoritmov, ako aj s ideálnou hodnotou. Podobným spôsobom sme porovnávali hodnoty ukazovateľa OEE, pričom sme abstrahovali od potenciálnych zmien vo výkonnosti a kvalite jednotlivých strojov pri zmene výrobného rozvrhu. Pre každý stroj sme zároveň kalkulovali hodnotu ukazovateľa dostupnosti a OEE v oboch prípadoch – samostatne, bez zohľadnenia prínosov navrhnutých pomocou SMED (uvažovali sme s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 129 min.), a po zohľadnení prínosov navrhnutých pomocou SMED (uvažovali sme s dĺžkou jednej internej prestavby v rozsahu 115 min.) za účelom vyčíslenia dosiahnutého synergického efektu navrhovaných riešení. Zároveň sme graficky zobrazili mieru vytiaženia resp. makespan pre jednotlivé stroje, pred a po realizácii navrhovaných riešení. Pre porovnanie efektívnosti daných riešení sme však uprednostnili využitie ukazovateľa OEE, čo odôvodňujeme vo výsledkovej časti tejto práce.

V diskusnej časti sme navrhli štyri ďalšie obmeny konštruktívneho heuristického algoritmu a uviedli dosiahnuté hodnoty makespanu, počtu prestavieb, ukazovateľov dostupnosti a OEE pri ich implementácii. Výsledkom bolo zníženie celkového počtu prestavieb, a zároveň zvýšenie dostupnosti a ukazovateľa OEE pre každý stroj, v porovnaní s reálnym stavom, tj. stavom pred realizáciou navrhovaných algoritmov, ktorý bol výsledkom intuície a empirického prístupu uplatneného v skúmanej spoločnosti.

Preukázali sme **dosiahnutie synergického efektu** nami **navrhovaných riešení** (metóda SMED, myšlienka súhrnnej výroby, konštruktívny heuristický algoritmus). V našom prípade došlo pri každom z uvažovaných strojov k zvýšeniu hodnoty dostupnosti (a následne ukazovateľa OEE). Po zohľadnení nami navrhovaných riešení došlo k zvýšeniu **priemernej hodnoty dostupnosti** jednotlivých strojov **o 18,13 %** (z 80,41 % na 98,54 %), a **priemernej hodnoty OEE** jednotlivých strojov sa následne zvýšila **o 17,34 %** (zo 76,92 % na 94,26 %).

V tejto práci sme navrhli **systémový model na optimalizáciu procesu plánovania a rozvrhovania výroby v súlade s DMAIC cyklom**, ktorého súčasťou je **návrh spôsobu merania výkonnosti procesu plánovania a rozvrhovania výroby a návrh metód na zvýšenie výkonnosti tohto procesu**, ktoré sa preukázali ako efektívne pri ich implementácii

na konkrétne dáta vybranej spoločnosti. Ich implementáciou v procese plánovania a rozvrhovania výroby by bolo možné dosiahnuť **zoštíhlenie procesu v zmysle redukcie mudy, zvýšenie efektívnosti využitia dostupných kapacít** jednotlivých strojov, **zvýšenie dostupných kapacít** jednotlivých strojov pre prichádzajúce objednávky v blízkom časovom horizonte, ako aj vytvorenie priestoru pre prijatie objednávok väčšieho objemu či variability, **bez potreby dodatočných investícií.**

Bibliografické zdroje

ABDEL-AAL, Mohammad A.M. a kol., 2008. Supply Chain Management Simulation Types: A Literature Review. *Journal of Engineering Sciences*. Vol.36, no.3, p. 675 – 687. ISSN 2312-2498.

AFZALIRAD, Mojtaba a Javad REZAEIAN, 2017. A realistic variant of bi-objective unrelated parallel machine scheduling problem: NSGA-II and MOACO approaches. *Applied Soft Computing*. Vol. 50, p. 109-123. ISSN 1568-4946.

AKHTAR, Muhammad Umair, Muhammad Huzaifa RAZA a Muhammad SHAFIQ, 2018. Role of batch size in scheduling optimization of flexible manufacturing system using genetic algorithm. *Journal of Industrial Engineering International*. Vol. 15, p. 135-146. ISSN 2251-712X.

ALHARKAN, Ibrahim A. a Ammar A. QAMHAN, 2017. Optimize Unrelated Parallel Machines Scheduling Problems with Multiple Limited Additional Resources, Sequence-Dependent Setup Times and Release Date Constraints. *IEEE*. Vol. 7, p. 171533-171547. ISSN 2169-3536.

ALI, Ammar, 2020. Economic Batch Quantity (EBQ) [online] [cit. 26.3.2020]. Dostupné z: <[https://accounting-simplified.com/management/inventory/economic-order-quantity/batch/#:~:text=Economic %20Batch %20Quantity %20\(EBQ\) %2C,that %20minimizes %20the %20total %20cost](https://accounting-simplified.com/management/inventory/economic-order-quantity/batch/#:~:text=Economic%20Batch%20Quantity%20(EBQ)%2C,that%20minimizes%20the%20total%20cost)>.

ALLAHVERDI, Ali, 2015. Third Comprehensive Survey on Scheduling Problems with Setup Times/Costs. *European Journal of Operational Research*. Vol. 246, no. 2, p. 345-378. ISSN 0377-2217.

ALMOMANI, Mohammed Ali a kol., 2013. A proposed approach for setup time reduction through integrating conventional SMED method with multiple criteria decision-making techniques. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 66, p. 461– 469. ISSN 0360-8352.

AMBE, Intaher Marcus, 2014. Key Indicators For Optimising Supply Chain Performance: The Case Of Light Vehicle Manufacturers In South Africa. *Journal of Applied Business research*. Vol. 30, no. 1, p. 277 – 290. ISSN 2157-8834.

AOUAM, Tarik a Kunal KUMAR, 2019. On the effect of overtime and subcontracting on supply chain safety stocks. *Omega*. Vol. 89, p. 1 – 20. ISSN 0305-0483.

ARISHA, Amr, Paul YOUNG a Mohie El BARADIE, 2003. Evaluation of Scheduling Strategies on the Performance of a Flexible Manufacturing Cell: a Simulation Study. *32nd International Conference on Computers and Industrial Engineering (ICC&IE)*, Limerick, Ireland, Ref. 280, p. 700– 706.

ARISHA, Amr a Waleed ABO-HAMAD, 2010. Simulation Optimisation Methods in Supply Chain Applications: A Review. *Irish Journal of Management*. p. 95-124. ISSN 2451-2834.

BAKER, Kenneth R. a Dan TRIETSCH, 2009. *Principles of Sequencing and Scheduling*. Hoboken, New Jersey: Wiley Publishing. ISBN 978-0-47045-179-3.

BARONI, Adriano Leonardo a kol., 2013. Production Scheduling Process Assessment According to an Enterprise Engineering Perspective. *IFAC – Proceedings Volumes*. Vol. 46, no.24, p. 408– 413. ISSN 2589-3653.

BELVÁRDI, Gábor a kol., 2012. Monte Carlo Simulation Based Performance Analysis of Supply Chains. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*. Vol. 3, no. 2, p. 1-15. ISSN 0976 – 979X.

BISWAS, Shantanu a Yadati NARAHARI, 2003. Object Oriented Modelling and Decision Support for Supply Chains. *European Journal of Operational Research*. Vol. 153, no. 3, p. 704 – 726. ISSN 0377-2217.

BLUM, Christian a Andrea ROLI, 2003. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*. Vol. 35. p. 268-308. ISSN 0360-0300.

BOTTANI, Eleonora a Roberto MONTANARI, 2010. Supply Chain Design and Cost Analysis through Simulation. *International Journal of Production Research*. Vol. 48, no. 10, p. 2859 – 2886. ISSN 2212-5671.

BRINZA, Georgiana, 2012. Simulation and Optimization in Supply Chain. *Procedia Economics and Finance*. Vol. 3, p. 635 – 641. ISSN 2312-2498.

CAMPUZANO, Francisco a Josefa MULA, 2011. *Supply Chain Simulation: A System Dynamics Approach for Improving Performance*. London: Springer-Verlag. ISBN 978-0-85729-719-8.

DAL, Bulent, Phil TUGWELL a Richard GREATBANKS, 2000. Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement - A practical analysis. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 20, no. 12, p. 1488-1502. ISSN 0144-3577.

DAROM, Noraida Azura a kol., 2018. An inventory model of supply chain disruption recovery with safety stock and carbon emission consideration. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 197, no.1, p. 1011– 1021. ISSN 0959-6526.

DESAI, Mukesh Shyamkant a R.M. Warkhedkar, 2011. Productivity enhancement by reducing adjustment time and setup change. *International Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. Vol. 1, no.1, p.37-42. ISSN 2231-6477.

ELTANTAWY, Reham a kol., 2014. Towards Supply Coordination and Productivity in a Three Echelon Supply Chain. In International Journal of Operations & Production Management. Vol. 6, p. 895 – 924. ISSN 0144-3577.

ERDEN, Demir, Caner KÖKÇAM, Halil Ibrahim DEMİR a Abdullah Hulusi KÖKÇAM, 2019. Solving Integrated Process Planning, Dynamic Scheduling, and Due Date Assignment Using Metaheuristic Algorithms. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2019, p.1-19. ISSN 1563-5147.

ERUGUZ, Ayse Sena a kol., 2016. A comprehensive survey of guaranteed-service models for multi-echelon inventory optimization. International Journal of Production Economics. Vol. 172, p. 110 – 125. ISSN 0925-5273.

EZUGWU, Absalom a Francis AKUTSAH, 2018. An Improved Firefly Algorithm for the Unrelated Parallel Machines Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times. IEEE. Vol. 6 p. 54459-54478. ISSN 2169-3536.

EZUGWU, Absalom E., 2019. Enhanced symbiotic organisms search algorithm for unrelated parallel machines manufacturing scheduling with setup times. *Knowledge-Based Systems*. Vol. 172. p.15-32. ISSN 1872-7409.

FARAHANI, Reza Zanjirani, Shabnam REZAPOUR a Laleh KARDAR, 2011. *Logistics Operations and Management: A Concepts and Models*. 1st edition. London/USA: Elsevier Inc. ISBN 978-01238-5-203-8.

FERRADÁS, Pablo Guzmán a Konstantinos SALONITIS, 2013. Improving changeover time: a tailored SMED approach for welding cells. *Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013*. p. 598-603. ISBN 978-1-62993-594-2.

GAO, Chutong, Wang, WEIHAO a Shi, LEYUAN, 2020. Robust Optimization on Unrelated Parallel Machine Scheduling with Setup Times. [preprint]. [cit. 26.3.2020]. Dostupné z: <<https://arxiv.org/abs/2010.11839>>.

GE, Houtian a kol., 2016. Supply Chain Complexity and Risk Mitigation – A Hybrid Optimization-Simulation Model. *International Journal of Production Economics*. Vol. 179, p. 228– 238. ISSN 0925-5273.

GEETHA, G. a HEMAMALINI, T. 2020. Ant Colonized and Taguchi Parallel Scheduling with Sequence Independent Setup Time. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. Vol. 9, no.3, 9 p. ISSN 2249-8958.

GEORGIADIS, Georgios, Apostolos P. ELEKIDIS a Michael C. GEORGIADIS, 2019. Optimization-Based Scheduling for the Process Industries: From Theory to Real-Life Industrial Applications. *Processes*. Vol. 7, no. 438, 35 p. ISSN 2227-9717.

GOLROUDBARY, Saeed Rahimpour a kol. 2019. Sustainable Operations Management in Logistics Using Simulations and Modelling: A Framework for Decision Making in Delivery Management. *Procedia Manufacturing*. Vol. 30, p. 627 – 634. ISSN 2351-9789.

GRAVES, Stephen C. a Tor SCHOENMEYER, 2016. Strategic Safety-Stock Placement in Supply Chains with Capacity Constraints. *Manufacturing & Service Operations Management*. Vol. 18, no. 3, p. 445 – 460. ISSN 1526-5498.

GRIGORYEV, Ilya, 2018. *AnyLogic in three days*. 5th edition, AnyLogic. ISBN 150893374X.

GUDEHUS, Timm a Herbert KOTZAB, 2009. Planning and scheduling production systems from a logistics perspective. *Logistics Research*. Vol. 1, no. 3, p. 163– 172. ISSN 1865-0368.

HELAL, Magdy, Ghaith RABADI a Ameer AL-SALEM, 2006. A tabu search algorithm to minimize the makespan for the unrelated parallel machines scheduling problem with setup times. *International Journal of Operations Research*. Vol.3, p.182-192. ISSN 1745-7653.

HU, Qingwen 2019. Bullwhip Effect in a Supply Chain Model with Multiple Delivery Delays. *Operations Research Letters*. Vol. 47, p. 36 – 40. ISSN 0167-6377.

CHENG, Bayi a kol., 2012. Minimizing makespan and total completion time for parallel batch processing machines with non-identical job sizes. *Applied Mathematical Modelling*. Vol.36, no.7, p. 3161-3167. ISSN 0307-904X.

INGALLS, Ricki G. 2014. Introduction to Supply Chain Simulation. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. p. 15. ISSN 978-1-4799-7486-3.

JADHAV, Ajinkya, N.R. RAJHANS, a Vinayak ANGANE, 2015. Reduction in Overall Changeover Time in General Motors, India. *National Conference on, Modeling, Optimization and Control, 4th -6th March 2015, NCMOC – 2015*. ISSN 2231-5381.

JOSHI, Rahul R. a Girish NAIK, 2012. Reduction in Setup Time by SMED: A Literature Review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. Vol. 2, no.1, p. 442–444. ISSN 2249-6645.

KÁDÁROVÁ, Jaroslava, 2012. Plytvanie v priemyselnom podniku. *The15h International Scientific Conference Trends and Innovative Approaches in Business Processes “2012”*. 5s. ISBN 978-80-553-1126-5.

KEMPF, Karol a kol., 2000. Evaluation and Comparison of Production Schedules. *Computers in Industry*. Vol. 42, p. 203– 220. ISSN 0166-3615.

KERSTEN, Wolfgang a Muhammad Amad SAEED, 2014. A Scor Based Analysis of Simulation in Supply Chain Management. *Proceedings - 28th European Conference on Modelling and Simulation*, ECMS, p. 461 – 469. 10.7148/2014-0461. ISBN 978-0-9553018-8-9.

KIM, Dong-Won a kol., 2002. Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Vol.18, p. 223-231. ISSN 0736-5845.

KOCAOĞLU, Yasemin, Alev TAŞKIN GÜMÜŞ a Batuhan KOCAOĞLU, 2018. Supply Chain Optimization Studies: A Literature Review and Classification. *Doğuş Üniversitesi Dergisi.*, vol. 19, no. 1, p. 79 – 98. ISSN 1308-6979.

KREIPL Stephan a Michael PINEDO, 2004. Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. *Production and Operations Management Society*. Vol. 13, no.1, p. 77-92. ISSN 1059-1478.

LADOVSKÝ, Tomáš, 2011. Aplikácia fuzzy dispečerských prioritných pravidiel. *Posterus -portál pre odborné publikovanie*. 9 s. ISSN 1338-0087.

LAW, Averill M, 2013. *Simulation Modelling and Analysis*. 5th edition, Arizona, USA: Averill M. Law & Associates, Inc.Tucson. ISBN 978-0-07-340132-4.

LEOŃCZUK, Dorota, 2016. Categories of Supply Chain Performance Indicators: An Overview of Approaches. *Business, Management and Education*. Vol. 14, no.1, p. 103– 115. ISSN 2029-6169.

LI, Xiang 2014. Operations Management of Logistics and Supply Chain: Issues and Directions. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Vol.2, 7 p. ISSN 1026-0226.

MALI, Yashwant R. a K.H. INAMDAR, 2012. Changeover Time Reduction Using SMED Technique of Lean Manufacturing. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. Vol. 2, no.3, p. 2441– 2445. ISSN 2248-9622.

MENDHE, Shashikant a Prof. M.G. RATHI, 2017. Implementation of SMED Technique to Reduce Setup Time of Bandsaw Cutting Machine. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. Vol. 6, no.1, 4 p. ISSN 0974-3154.

MITAL, Monika, Manlio DEL GUIDICE a Armando PAPA, 2018. Comparing supply chain risks for multiple product categories with cognitive mapping and Analytic Hierarchy Process. *Technological Forecasting & Social Change*. Vol. 131, p. 159 – 170. ISSN 0040-1625.

MUCHIRI, P. a L. PINTELON, 2008. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*. Vol. 46, no.13, p. 3517-3535. ISSN 0020-7543.

MUHAMMAD, NurAmalina a Chin JENGFENG, 2014. A Methodology to Optimize Value in Discrete Event Simulation for Production Planning and Control Studies. *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia, January 7 – 9, 2014*. 9 p. ISBN 978-1-63266-846-2.

NAIK, Girish R., V.A. RAIKAR a Poornima G. NAIK, 2015. A Simulation Model for Overall Equipment Effectiveness of a Generic Production Line. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. Vol. 12, no. 5, p. 52-63. ISSN 2278-1684.

NOWAKOWSKA – GRUNT, Joanna a Ewa MOROZ, 2013. Theory of Constraints an Effective Tool for Supply Chain Management. *Advanced Logistics Systems*. Vol. 7, no.1, p. 71– 78. ISSN 1789-2198.

OTHMAN, Siti Norsyahida, Noorfa Haszlinna MUSTAFFA and Roselina SALLEHUDDI, 2012. *Supply Chain Spreadsheet Simulation Optimization. Proceedings of International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*. IEEE. p. 188 – 193. ISSN 2166-8531.

OWEN, Chris a kol., 2010. Simulation in the Supply Chain Context: Matching the Simulation Tool to the Problem. *Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop 2010 (SW10)*. 14 p. ISSN 0000-2016.

OYETUNJI, Elkanah, 2009. Some Common Performance Measures in Scheduling Problems: Review Article. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. Vol.1, no.2, p. 6-9. ISSN 2040-7467.

PALÚCH, Stanislav a Štefan PEŠKO, 2006. *Kvantitatívne metódy v logistike*. Žilina: EDIS. 186 s. ISBN 80-8070-636-0.

PANKAJKUMAR, J.Mistry a Desai MUKESH, 2015. Set Up Change Time Optimization Using Single Minute Exchange of Die (SMED) Methodology. *International Journal of Research in Electronics and Communication Technology (IJRECT 2015)*. Vol. 2, no.1, 6 p. ISSN 2348-9065.

PARALIČ, Ján, 2010. *Rozvrhovanie a logistika*. Košice: TUKE. 103 p. ISBN 978-80-89284-63-4.

PASANDIDEH, Seyed Hamid Reza, Seyed Taghi Akhavan NIAKI a Kobra ASADI, 2015. Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information sciences*. Vol. 292, p. 57 – 74. ISSN 0020-0255.

PLINERE, Darya a Ludmila ALEKSEJEVA, 2018. Production Scheduling in Agent-Based Supply Chain for Manufacturing Efficiency Improvement. *Procedia Computer Science*. Vol. 149, p. 36– 43. ISSN 1877-0509.

PORTER, Michael, 1985. *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press. ISBN 978-0-0292-5090-7.

RABADI, Ghaith, Reinaldo J. MORAGA a Ameer AL-SALEM, 2006. Heuristics for the unrelated parallel scheduling problem with setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 17, p. 85-97. ISSN 1572-8145.

RAMÍREZ, Sánchez a kol. 2016. Simulation Software as a Tool for Supply Chain Analysis and Improvement. *Computer Science and Information Systems*. Vol. 13, no. 3, p. 983 – 998. ISSN 2406-1018.

ROSER, Christoph, 2017. *Flow Shop Job Shop Comparison*. image. AllAboutLean.com. [online]. [cit. 27.3.2020]. Dostupné z: <<https://www.allaboutlean.com/visual-management/flow-shop-job-shop/>>.

ROSSINI, Matteo a Alberto Portioli STAUDACHER, 2016. Lean Supply Chain Planning: A Performance Evaluation through Simulation. *MATEC Web of Conferences, ICTTE (2016)*. Vol. 81, 06002 (2016) 5 p. ISSN 2261-236X.

STAMATIS, D.H., 2010. *The OEE Primer: Understanding Overall Equipment Effectiveness, Reliability, and Maintainability*. New York: Productivity Press. ISBN 978-1-4398-1406-2.

STROHHECKER, Jürgen, Michael HAMANN a Jörn-Henrik THUN, 2016. Loading and sequencing heuristics for job scheduling on two unrelated parallel machines with long, sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*. Vol.54, no.22, p. 6747- 6767. ISSN 1366-588X.

TAMÁS, Péter, 2017. Application of a Simulation Investigational Method for Efficiency Improvement of SMED Method. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. Vol. 15, no.2, 9 p. ISSN 2601-3045.

The AnyLogic Company, 2010. *Supply Chain Optimization and Simulation: Technology Overview*. [online] [cit. 10.10.2019]. Dostupné z: <<https://www.anylogistix.com/resources/white-papers/supply-chain-optimization-and-simulation/>>.

THIERS, George a Leon McGINNIS, 2011. Logistics Systems Modelling and Simulation. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. IEEE, 9 p. ISSN 978-1-4577-2109-0/11.

URBAN, Wiesław a Patrycja ROGOWSKA, 2018. The Case Study of Bottlenecks Identification for Practical Implementation to the Theory of Constraints. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. Vol. 1, no.1, p. 399– 405. ISSN 2545-2827.

VAVRÍK, Vladimír, Milan GREGOR a Patrik GRZNÁR, 2017. Computer simulation as a tool for the optimization of logistics using automated guided vehicles. *Procedia Engineering*. Vol. 192, p. 923 – 928. ISSN 1877-7058.

VIEIRA, Antonio A.C. a kol., 2019. Supply chain hybrid simulation: From Big Data to distributions and approaches comparison. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Vol. 97, 13 p. ISSN 1569-190X.

VILLAMIZAR, Andres Muñoz, 2019. Improving effectiveness of parallel machine scheduling with earliness and tardiness costs: A case study. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. Vol. 10, p. 375-392. ISSN 1923-2934.

YANG-KUEI, L. a L. CHI-WEI, 2013. Dispatching rules for unrelated parallel machine scheduling with release dates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 67, p. 269-279. ISSN 1433-3015.

ZAIED, Abdel Nasser H., 2008. Quantitative Models for Planning and Scheduling of Flexible Manufacturing System. *Emirates Journal for Engineering Research*. Vol. 13, no.2, p. 11– 19. ISSN 1022-9892.

ZELENKA, Ján a kol., 2010. Problematika rozvrhovania vo výrobnom procese s rôznymi typmi výrobných liniek. *AT&P journal* Vol. 8(2010). ISSN 1336-233X.

ZOBOLAS, G.I., C.D. TARANTILIS a G. IOANNOU, 2008. Exact, Heuristic and Meta-heuristic Algorithms for Solving Shop Scheduling Problems. Berlin: Springer, Vol. 128, p. 1-40. ISBN 978-3-540-78985-7.