

Problematika rozvrhovania vo výrobnom procese s rôznymi typmi výrobných liniek

Optimalizácia materiálových tokov a nájdenie optimálneho rozvrhu výroby je v súčasnosti pre každý výrobný podnik kľúčovou otázkou pri zvyšovaní konkurencieschopnosti. Článok prináša formuláciu problému dynamického rozvrhovania a prehľad používaných metód na jeho riešenie, predovšetkým metód s využitím heuristik, metaheuristik, umelej inteligencie a multiagentových systémov. V druhej časti článku je prípadová štúdia dynamického rozvrhovania realizovaná v rámci projektu APVV VMSP 0168/09 vo výrobnom podniku na recykláciu plastov. Výrobný podnik opísaný v tomto článku sa zaoberá recykláciou tzv. mäkkých plastov na báze polymerizácie a výrobou odpadových vriec z recyklovaných polyetylénových (LDPE) fólií.

Problém rozvrhovania vo výrobných podnikoch je charakterizovaný ako vytvorenie postupnosti úloh a ich alokácia na dostupné zdroje v časovom horizonte.

Matematická formulácia úlohy rozvrhovania

Pri riešení rozvrhovacej úlohy treba zaviesť matematickú formuláciu problému. Pre klasickú rozvrhovaciu úlohu definujeme tri množiny:

- množinu úloh $J = \{1, 2, \dots, n\}$;
- množinu strojov $M = \{1, 2, \dots, m\}$;
- množinu operácií $O = \{1, 2, \dots, N\}$.

Úloha predstavuje konečnú postupnosť operácií, ktoré treba vykonať v rámci jednej zákazky. Operácia je základnou jednotkou v rámci technologického procesu a je charakterizovaná svojím typom a vykonávacím časom. V prípade, že sa operácia môže vykonávať na viacerých strojoch, treba určiť procesný čas pre každé takéto zariadenie. Pri vytváraní korektných rozvrhov treba dodržiavať určité obmedzenia, ktoré delíme na tzv. tvrdé a mäkké obmedzenia. Tvrdé obmedzenia sa týkajú technologického postupu a predstavujú napríklad obmedzenia týkajúce sa časových závislostí jednotlivých operácií, kapacitné možnosti výrobných zariadení, charakteristiky výrobných zariadení a podobne. Mäkké obmedzenia pri vytváraní rozvrhu predstavujú preferencie, ktoré nie je nutné za každých okolností dodržať, ale ich dodržanie je vhodné z hľadiska optimalizácie rozvrhovania. Nedodržanie "mäkkých ohraničení" nespôsobí konflikt pri rozvrhovaní. Správnym definovaním mäkkých ohraničení môžeme redukovať prehľadávaný priestor a nájsť vhodnejšie riešenie rozvrhovacej úlohy pre konkrétny výrobný systém. Takýmito obmedzeniami sú napríklad určité definované postupnosti operácií, pri ktorých dodržaní sú minimalizované prestoje z dôvodu nastavenia nových parametrov výroby, minimalizuje sa odpad súvisiaci s prestavovaním výroby a podobne. Časovú nadväznosť jednotlivých operácií vyjadrujeme pomocou operácie precedencie: $O_i \prec O_j$, t. j. operácia O_j sa nesmie začať skôr, ako sa ukončí operácia O_i . Ďalšie technologické obmedzenia sa týkajú spracovania operácií na strojoch – jedna operácia sa môže vykonávať len na jednom stroji. Pri niektorých technologických procesoch je operácia atomická, t. j. jej vykonávanie nemôže byť prerušené príchodom inej operácie. V iných procesoch platí, že v jednom čase sa nemôžu vykonávať dve operácie tej istej úlohy na viacerých strojoch. Pre každú úlohu J_i môžu byť špecifikované nasledujúce vstupné dáta (Mičunek, 2002):

- operácie O_j spracúvané na strojoch;
- čas spracovania p_{ijk} je čas potrebný na spracovanie j -tej operácie, i -tej úlohy na stroji k ;
- r_i je najskôr možný začiatok spracovania úlohy J_i ;
- d_i je požadovaný čas skončenia úlohy J_i ;
- a_i je maximálny prípustný čas pobytu úlohy v systéme $a_i = d_i - r_i$;
- w_i je váha vyjadrujúca relatívnu dôležitosť úlohy J_i .

Výstupné dáta rozvrhovacieho problému sú dáta, ktoré možno vypočítať pre každú úlohu J_i daného rozvrhu, a sú to tieto dáta:

- C_i je čas ukončenia úlohy J_i ;
- F_i je čas pobytu úlohy J_i v systéme;
- W_i je celkový čas čakania úlohy J_i v systéme;
- L_i je časová odchýlka od plánovaného času ukončenia úlohy, platí $L_i = C_i - d_i$;
- $T_i = \max\{0, L_i\}$ oneskorenie úlohy J_i ;
- $E_i = \max\{0, -L_i\}$ predstih úlohy J_i ;
- $U_i = 0$, ak $C_i \leq d_i$, inak $U_i = 1$, je penalizačná jednotka úlohy J_i .

Takto formulovaná úloha patrí do oblasti optimalizácie, pričom sa hľadá optimálne (suboptimálne) riešenie podľa jedného alebo viacerých kritérií a za splnenia viacerých obmedzení. Riešenie takejto úlohy predstavuje NP hard problém. Tradičný prístup k statickému rozvrhovaniu predpokladá statické prostredie a väčšinou neuvažuje so žiadnymi poruchami. Reálne výrobné systémy však musia počítať s viacerými typmi nepredvídateľných udalostí, ktoré vedú k vytvoreniu nového rozvrhu. Takéto udalosti nazývame udalosti reálneho času. Podľa Vieira et al. (2003) sa vo výrobných systémoch vyskytujú dva typy udalostí reálneho času:

- udalosti týkajúce sa zdrojov (porucha stroja, starnutie materiálu, operátor a pod.);
- udalosti týkajúce sa úloh (príchod novej úlohy, zmena priorit úloh, zmena termínov a pod.).

Dynamické rozvrhovanie je (podľa Mehta and Uzsoy, 1999; Vieira et al., 2000a, 2003; Aytug et al., 2005; Leus and Herroelen, 2005) rozdelené do štyroch základných typov:

- plne reaktívne rozvrhovanie;
- prediktívno-reaktívne rozvrhovanie;
- prediktívno-reaktívne rozvrhovanie citlivé na zmeny;
- pro-aktívne rozvrhovanie citlivé na zmeny.

Dynamické rozvrhovanie je vždy spojené s vytvorením nového rozvrhu ako reakcia na udalosť, ktorá nastala. Riešenie problému dynamického rozvrhovania je možné dekompozíciou na sériu statických problémov, ktoré sa riešia metódami statického rozvrhovania. Podľa toho, kedy je potrebné vytvorenie nového rozvrhu, používame buď rozvrhovanie v pravidelných intervaloch (periodické prerozvrhovanie - rescheduling), prerozvrhovanie v čase príchodu novej udalosti (udalosťami riadené prerozvrhovanie), alebo hybridný spôsob, ktorý vytvára nové rozvrhy periodicky, ale v prípade urgentnej udalosti reaguje okamžitým vytvorením nového rozvrhu. Dynamické rozvrhovanie používa päť základných prístupov k riešeniu:

- vybavovacie pravidlá (dispatching rules);
- heuristiky;
- metaheuristiky (Tabu search, simulované žihanie, genetické algoritmy);

- umelú inteligenciu (neural networks, case-based reasoning, fuzzy logic, Petri nets);
- multiagentové systémy.

Vybavovacie pravidlá

V literatúre sa opisuje viacero typov pravidiel, od jednoduchých až po veľmi komplexné. Žiadny súbor pravidiel však nedokáže zachytiť komplexnosť požiadaviek na rozvrhovanie v dynamickom prostredí. Preto sa na overenie účinnosti a efektívnosti pravidiel používajú simulačné techniky. Experimentálne výsledky ukazujú, že správny výber pravidiel závisí nielen od charakteristiky výrobných zariadení, ale aj od ďalších faktorov, napríklad materiálových tokov a pod.

Heuristiky

Sú veľmi často používaným prístupom pri riešení rozvrhovacích úloh. Spolu s výberom správnych vybavovacích pravidiel môžu veľmi významne prispieť k nájdeniu vhodného riešenia rozvrhovacej úlohy.

Metaheuristiky

K týmto metódam zaraďujeme známe metódy, ako je Tabu search, simulované žihanie a genetické algoritmy. Všetky sa úspešne využívajú na riešenie rôznych typov rozvrhovacích úloh.

Umelá inteligencia

Metódy z oblasti umelej inteligencie, medzi ktoré patria najmä znalostné systémy, neuronové siete, prípadové usudzovanie, fuzzy logika, Petriho siete a podobne. Veľmi úspešne možno využívať aj techniky z oblasti strojového a adaptívneho učenia.

Multiagentové systémy

Technológie MAS patrili medzi najprogressívnejšie sa vyvíjajúce technológie, od ktorých sa očakávali veľké prínosy aj v oblasti riešenia problematiky rozvrhovacích úloh. Prvotné očakávania však priniesli sklamanie a istú skepsu pri aplikácii tejto teórie do praxe. Napriek tomu tento prístup patrí k stále aktuálnym témam, hlavne v oblasti výskumu smerom k vývoju komplexných, odolných a cenovo efektívnych riešení pre podniky novej generácie.

V ďalšej časti článku je opísaný jeden prístup k riešeniu rozvrhovacej úlohy založený na reálnom probléme výrobného podniku.

Opis reálneho výrobného systému

Výrobný podnik, ktorý je nositeľom projektu APVV 0168/09, s výrazným podielom na slovenskom trhu sa zaoberá výrobou recyklovanej polyetylénovej (LDPE) fólie s kapacitou recyklácie 180 t mesačne. V rámci spôsobu recyklácie odpadovej fólie patrí výrobný podnik medzi tri najväčšie spoločnosti na Slovensku. Výrobná linka na recykláciu mäkkých plastov slúži ako pilotná aplikácia na výstupy výskumu realizovaného v kooperácii s ÚI SAV v rámci spoločného projektu aplikovaného výskumu. Tento projekt vyplynul z dlhoročného výskumu v oblasti modelovania a simulácie výrobných liniek v ÚI SAV.

Výrobný systém tvorí niekoľko výrobných liniek, ktoré procesom polymerizácie recyklujú a vyfukujú LDPE fóliu. Z vyrobenej fólie sa neskôr vyrábajú odpadové vrecia. Blokovaná schéma výrobného systému je znázornená na obr. 1. Výrobný systém sa skladá z troch hlavných častí:

- regranulačná linka: procesom polymerizácie odpadového materiálu dochádza k výrobe regranulátu rôznej farby; výroba regranulátu sa uskutočňuje tzv. mokrou cestou;
- vyfukovacia linka (extrúder): procesom polymerizácie regranulátu a ďalších vstupných aditív dochádza k výrobe LDPE fólie požadovaného tvaru, hrúbky, šírky a farby (k dispozícii sú štyri vyfukovacie linky rozdielnych typov v prevádzke 24 hodín 7 dní v týždni);
- rolovacia linka: vyrobená LDPE fólia sa zvära, perforuje a roluje na požadovanú veľkosť (k dispozícii sú dve rolovacie linky rozdielnych typov v prevádzke 24 hodín 5 dní v týždni).

Pre tento výrobný systém je definovaná nasledujúca množina úloh:

$$J = \{J_{gran}, J_{fol}, J_{vrec}\};$$

kde J_{gran} reprezentuje výrobu regranulátu, J_{fol} výrobu LDPE fólie a J_{vrec} výrobu odpadových vriec. Pre každú úlohu sú definované nasledujúce operácie:

$$\begin{aligned} J_{gran} &\rightarrow \{O_{gran}\}; \\ J_{fol} &\rightarrow \{O_{gran}, O_{vyf}\}; \\ J_{vrec} &\rightarrow \{O_{gran}, O_{vyf}, O_{rol}, O_{bal}\}; \end{aligned}$$

ktoré sa môžu vykonávať na nasledujúcej množine strojov:

$$\begin{aligned} O_{gran} &\rightarrow \{M_{gran}\}; \\ O_{vyf} &\rightarrow \{M_{ex1}, M_{ex2}, M_{ex3}, M_{ex4}\}; \\ O_{rol} &\rightarrow \{M_{rol1}, M_{rol2}\}; \\ O_{bal} &\rightarrow \{M_{bal}\}. \end{aligned}$$

Úloha optimalizácie

Úlohou optimalizácie je v tomto prípade vytvorenie optimálneho rozvrhu pre jednotlivé výrobné linky tak, aby boli všetky zákazky vyrobené načas, aby sa minimalizoval prestoj na jednotlivých linkách, redukoval vznikajúci odpad pri vyfukovaní, resp. rolovaní a aby sa redukovala spotreba elektrickej energie. Výsledkom by malo byť zvýšenie flexibility a zníženie produkčných nákladov.

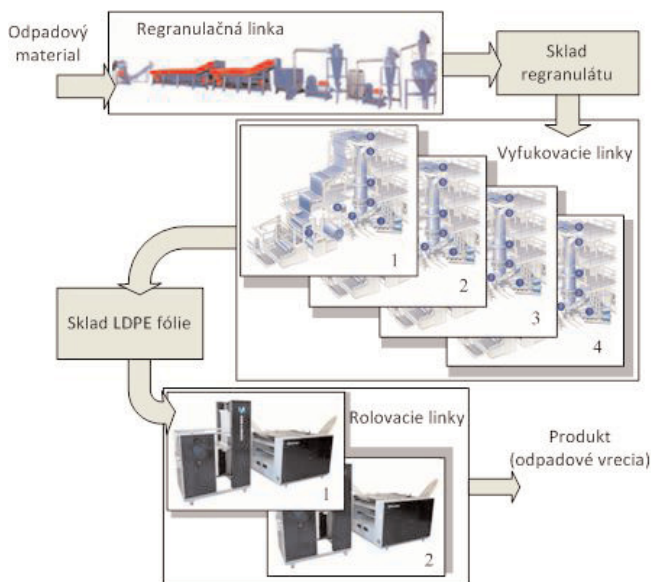
V súčasnosti je plánovanie výroby založené na intuitívnom rozhodovaní človeka, pričom možno vytvoriť len krátkodobé plánovanie cca 5 – 7 dní (nemožno mať rozpláňovanú výrobu v celom rozsahu prijatých objednávok), ktoré je veľmi náročné.

Jedna z možností nájdenia optimálneho rozvrhu je prehľadanie celého priestoru možných kombinácií operácií načítaných úloh. V prípade n úloh pre výrobu regranulátu ide o prehľadanie priestoru s veľkosťou $n!$

kombinácií, avšak pri n úloh pre výrobu odpadových vriec J_{vrec} , sa tento priestor zväčší na $n! \cdot 8^n$ kombinácií. A to za predpokladu, že každá operácia sa môže vykonávať na každom stroji definovanom pre danú operáciu. Ako možno vidieť, prehľadávaný priestor je príliš veľký. Napríklad pre $n = 2$ by išlo o prehľadanie 256 kombinácií, čo má negatívny vplyv na výpočtovú náročnosť. Aplikovaním množiny precedencií na prehľadávaný priestor sa redukuje prehľadávaný priestor. V našom prípade ide o nasledujúcu množinu precedencií:

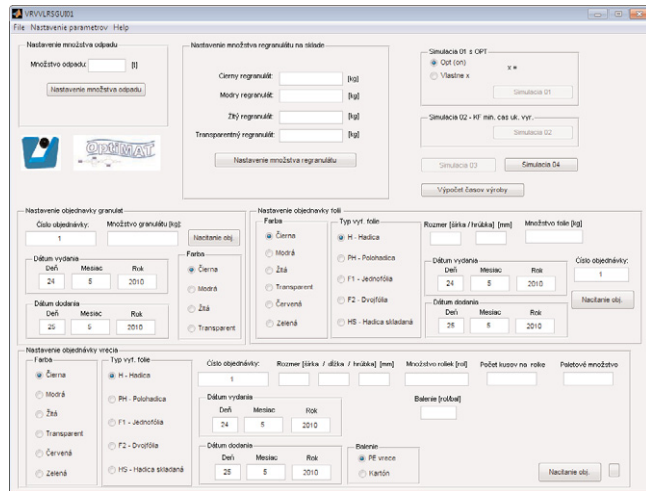
$$\begin{cases} O_{gran_i} < O_{vyf_i}; O_{vyf_i} < O_{rol_i}; O_{rol_i} < O_{bal_i}; \\ O_{gran_i} < O_{bal_i}; O_{vyf_i} < O_{bal_i}; O_{gran_i} < O_{rol_i} \end{cases}$$

Pre riešenie problému rozvrhovania v reálnom výrobnom systéme je dôležitý čas výpočtu nového rozvrhu. Určitým zjednodušením optima-



Obr.1 Blokovaná schéma výrobného systému

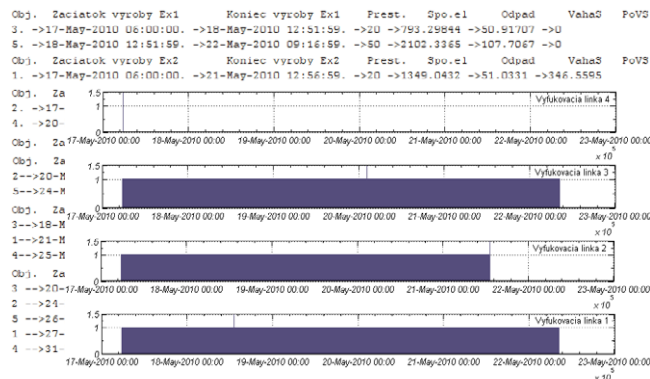
lizácie by mohlo byť rozvrhovanie na úrovni množiny úloh. V takom prípade by sa prehľadávány priestor redukoval na $n!$ kombinácií, čím sa redukuje požiadavky na výpočtový čas, ale za cenu nájdenia suboptimálneho rozvrhu. Z tohto dôvodu sa budeme pohybovať iba v oblasti suboptimálnych riešení. Na trhu existuje viacero softvérových nástrojov umožňujúcich simuláciu výrobných systémov, ako aj optimalizáciu materiálových tokov. Keďže v týchto nástrojoch nie je možnosť aplikovania nových nekonvenčných metód rozhodovania, bola vytvorená softvérová aplikácia v prostredí Matlab (obr. 2), ktorá umožní simulovať výrobu pre daný výrobný systém a nájsť optimálne alebo suboptimálne riešenie rozvrhu.



Obr.2 GUI aplikácie na výpočet optimálneho/suboptimálneho rozvrhu

Táto aplikácia umožňuje simulovať výrobu odpadových vriec, LDPE fólie alebo regranulátu, pričom možno nastaviť jednotlivé parametre vyfukovacích, resp. rolovacích liniek, dni, počas ktorých sa nevyrába (resp. dni pracovného pokoja) a rôzne závislosti (napr. závislosť rýchlosti vyfukovania fólie od hrúbky vyfukovanej fólie pre každú vyfukovaciu linku zvlášť, závislosť rýchlosti vyfukovania fólie od množstva vyfukovanej fólie a pod.). Na základe nastavených parametrov a načítaných zákaziek (aplikácia momentálne umožňuje načítanie zákazky pre výrobu regranulátu, LDPE fólie a odpadových vriec) simuláciou dostaneme optimálne, resp. suboptimálne rozvrhnutie jednotlivých objednávok, pričom sa berie ohľad na to, aby všetky objednávky boli vyrobené do dátumu dodania. Napríklad pri simulácii troch úloh ($1x_{fol.}$, $2x_{vrec}$) sa optimálne riešenie dosiahlo za cca 3,6 hod. a suboptimálne riešenie rozvrhu za 23 sekúnd. Výpočtový čas nájdenia suboptimálneho rozvrhu piatich (siedmich) úloh J_{vrec} trval približne 16 minút (19,4 hod.). Výsledkom simulácie (obr. 3) je rozvrh jednotlivých operácií v písomnej alebo grafickej podobe (Ganttov diagram).

V prípade rozvrhovania úloh pre výrobu odpadových vriec J_{vrec} možno uvažovať aj o nasledujúcej optimalizácii. Zadávaná úloha J_{vrec} obsahuje informáciu o hmotnosti LDPE fólie, ktorú treba vyrobiť. Vyfukovaná fólia je navíjaná na rolku s určitou hmotnosťou (záleží na type vyfukovacej linky), ktorá je neskôr spracovaná na rolovacej linke. Keďže



Obr.3 Výsledok simulácie v textovej a grafickej podobe

proces vyfukovania je spojený, pri výmene navíjacích bubnov dochádza k čiastočným materiálovým stratám, s ktorými treba pri rozvrhovaní rátať. Len čo je kotúč LDPE fólie vyrobený, možno ho spracovať na rolovacej linke. Ak sa spracovanie LDPE kotúča na rolovacej linke začne hneď po jeho vyrobení a čas spracovania LDPE kotúča na rolovacej linke je väčší alebo nanajvýš rovný času výroby LDPE kotúča, možno začať spracovať LDPE kotúč na rolovacej linke bez vzniku nežiaducich prestojov. V opačnom prípade keď je čas spracovania menší ako čas výroby, vzniká nežiaduci prestoj, ktorý treba redukovat. Takéto rozvrhovanie by bolo možné vykonať len za predpokladu čiastočného obmedzenia precedencie

$$O_{vyf_i} < O_{rol_i}$$

a pri súčasnej podmienke, že operácia

$$O_{rol_i}$$

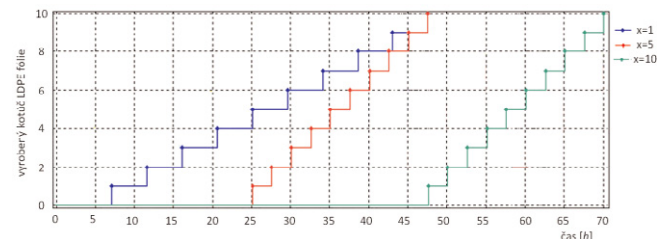
musí nasledovať bezprostredne za operáciou

$$O_{vyf_i},$$

čím sa čiastočne redukuje prehľadávány priestor.

Simulačné experimenty na modeli výrobnéj linky

S cieľom redukovat nežiaduce prestoje na rolovacej linke sa pomocou knižnice SimEvents softvérového nástroja MATLAB vytvoril model umožňujúci nájsť optimálnu hodnotu x , teda hodnotu určujúcu to, po kolkom vyrobenom LDPE kotúči sa môže začať spracovanie kotúča rolovacou linkou tak, aby prestoj a čas ukončenia spracovania na rolovacej linke boli minimálne. Na obr. 4 je znázornený výsledok simulácie spracovania desiatich kotúčov LDPE fólie, kde modrou farbou je znázornené spracovanie kotúča hneď po jeho vyrobení, červenou (zelenou) farbou je znázornené spracovanie kotúčov až po vyrobení piateho (desiateho) kotúča LDPE fólie.



Obr.4 Výsledok simulácie spracovania LDPE fólie na rolovacej linke

Ako z výsledku simulácie vyplýva, pre danú úlohu je optimálne začať spracovať kotúče LDPE fólie až po vyrobení piateho (červená krivka na obr. 4) kotúča. V tomto prípade nevzniká žiadny prestoj a ukončenie spracovania kotúčov na rolovacej linke sa skončí v rovnakom čase, ako keby sa kotúče spracovali hneď po ich vyrobení. Dochádza k redukcii času potrebného na obsadenie danej linky pre danú úlohu na 58 %. V súčasnosti sa kotúče začínú spracovať až po vyrobení posledného plánovaného kotúča pre danú úlohu. V takomto prípade nevzniká prestoj (spôsobený čakaním obsluhy rolovacej linky na výrobu ďalšieho kotúča), ale predĺži sa čas ukončenia spracovania kotúčov na rolovacej linke, čo má negatívny dôsledok na čas ukončenia danej úlohy. V porovnaní s optimálnym riešením by išlo o 48 % nárast času potrebného na vykonanie danej úlohy.

Záver

Článok poskytuje pohľad na problematiku rozvrhovania vo výrobných systémoch a predstavuje návrh riešenia problému v reálnom výrobnom systéme s použitím nástroja MATLAB. Predstavené riešenie má však určité obmedzenia súvisiace s použitím zabudovaných funkcií (maximálne možno prehľadávať priestor s veľkosťou 12 zákaziek na úrovni úloh alebo na úrovni operácií s veľkosťou x zákaziek, ktorých súčet operácií nie je väčší ako 12).

Referencie:

Aytug, H. – Lawley, M. A. – McKay, K. – Mohan, S. – Uszoy, R.: Executing production schedules in the face of uncertainties, *European Journal of Operational Research*, 161 (1), 86-110, 2005. (Prebraté z Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems)

Leus, R. – Herroelen, W.: The complexity of machine scheduling for stability with a single disrupted job, *Operations and research letters*, 33 (2), 151-156, 2005. (Prebraté z Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems)

Mehta, S. V. – Uzsoy, R.: Predictable scheduling of a single machine subject to breakdown, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 12(1), 15-39, 1999. (Prebraté z Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems)

Mičunek, P.: Metastratégie pri riešení problému JOB-Shop. [online] November, 2002. Dostupné z <<http://frcatel.fri.utc.sk/~pesko/Studenti/micunekP2.ps.gz>>, 2002

Vieira, G. E. – Herrmann, J. W. – Lin, E.: Analytical models to predict the performance of a single machine systems under periodic and event-driven rescheduling strategies., *International Journal of Production Research*, 38(8), 1899-1915, 2000. (Prebraté z Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems)

Vieira, G. E. – Herrmann, J. W. – Lin, E.: Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods, *Journal of Scheduling*, 2003. (Prebraté z Ouelhadj D., Petrovic S. Survey of dynamic scheduling in manufacturing systems)

Ing. Ján Zelenka, PhD.

Ing. Ivana Budinská, PhD.

Slovenská akadémia vied, Ústav informatiky
Oddelenie modelovania a riadenia diskretných procesov
Dúbravská cesta 9, 845 09 Bratislava
e-mail: jan.zelenka@savba.sk
e-mail: ivana.budinska@savba.sk
<http://ui.sav.sk>

Ing. Zoltán Balogh, PhD.

Slovenská akadémia vied, Ústav informatiky
Oddelenie paralelného a distribuovaného spracovania informácií
Dúbravská cesta 9, 845 09 Bratislava
e-mail: zoltan.balogh@savba.sk
<http://ui.sav.sk>

Ing. Tomáš Matejka

MAT-obaly, s.r.o.
e-mail: tomas.matejka@mat-obaly.sk