

POROVNANIE METÓD VYHODNOCOVANIA ÚZKYCH MIEST VO VÝROBNOM SYSTÉME

Zdenka Králová, Michal Leporis

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky FEI STU v Bratislave

Vo svetovej literatúre sa venuje identifikácii úzkych miest vo výrobných systémoch veľká pozornosť zo strany teórie aj praxe. Ide o kľúčový pojem Goldrattovej teórie obmedzení [Goldratt 1984], ktorá predstavuje významný krok k systémovému chápaniu a riešeniu problémov riadenia výroby a stala sa východiskom pre koncepciu štihlej výroby. Úzke miesta ovplyvňujú úroveň zásob rozpracovanej výroby, priebežný čas výrobkov a prevádzkové náklady. Korektná a efektívna identifikácia a redukcia úzkych miest umožňuje optimalizovať využitie výrobných zdrojov, minimalizovať výrobné náklady a zvýšiť prietok systému.

Pojem úzke miesto je intuitívne chápaný ako prvok systému, ktorý najviac obmedzuje prietok, t.j. množstvo peňazí („cieľových jednotiek“), ktoré generuje systém za časovú jednotku. Ak je zabezpečený plynulý odbyt všetkej vyrobenej produkcie a funguje efektívne plánovanie zadávania výrobných úloh, možno problém maximalizácie prietoku previesť na problém maximalizácie vyrobenej produkcie za časovú jednotku. Riešenie tohto problému si vyžaduje synchronizáciu všetkých prvkov procesu tak, aby sa dosiahol plynulý tok materiálu výrobou, bez nadbytočných zásob rozpracovanej výroby, čo možno efektívne riešiť práve identifikáciou a redukciou úzkych miest.

Exaktných definícií pojmu úzke miesto nájdeme v literatúre celý rad. Niektoré z nich berú do úvahy len prvky typu stroj, iné zahŕňajú aj ďalšie technické zariadenia, ako sú dopravníky, automaticky navádzané vozíky, zásobníky a pod., niektoré z nich zohľadňujú aj pracovníkov. Existujú aj definície zamerané priamo na ekonomický efekt, kde ekonomické úzke miesto je chápané ako zdroj, ktorý zásadne obmedzuje ziskovosť systému a nárast kapacity ktorého prináša najväčšie zvýšenie výnosov systému [Lawrence-Buss 1995].

Aktuálne koncepcie identifikácie úzkych miest možno rozdeliť do dvoch kategórií, na analytické a simulačné. Existuje tiež koncepcia vyhodnocovania úzkych miest v reálnom čase na základe dát získavaných priamo z výrobného procesu [Li a kol. 2007]. Významné firmy najmä z oblasti automobilovej výroby si vyvíjajú vlastné nástroje na analýzu prietoku zahrnujúce identifikáciu úzkych miest s využitím simulačných modelov (napr. General Motors - softvérový produkt C-MORE, Toyota - Analyzer ako súčasť systému TOPQ, alebo systém GAROPS Analyzer v simulačnom softvéri GAROPS).

Dynamika reálnych výrobných procesov je natoľko zložitá, že analytické prístupy sú prakticky nepoužiteľné a simulačné modely sa vo väčšine prípadov stávajú základným nástrojom analýzy. Ak je k dispozícii adekvátny model výrobného systému, výsledok simulácie poskytuje celý rad informácií, na základe ktorých možno identifikovať jedno alebo viac najvýznamnejších úzkych miest.

Ak chceme vyhľadávanie a redukcii úzkych miest automatizovať, musíme mať k dispozícii jednoznačné kritérium úzkeho miesta a vhodnú metódu jeho identifikácie, ktorá umožní transformovať získanú množinu informácií do jedného ukazovateľa, ktorý pre každé pracovisko, resp. pre každý prvok výrobného procesu kvantitatívne vyjadrí jeho „úzkoprofilovosť“ v porovnaní s ostatnými, prípadne aj nedostatočne využité kapacity. Prehľadné tabuľkové alebo grafické zobrazenie hodnôt týchto ukazovateľov poskytne analytikovi celkový obraz o úzkych miestach v systéme a ich reláciách.

Metódy identifikácie úzkych miest založené na simulácii sa líšia používaným kritériom identifikácie a spôsobom transformácie údajov získaných simuláciou do hodnôt tohto kritéria.

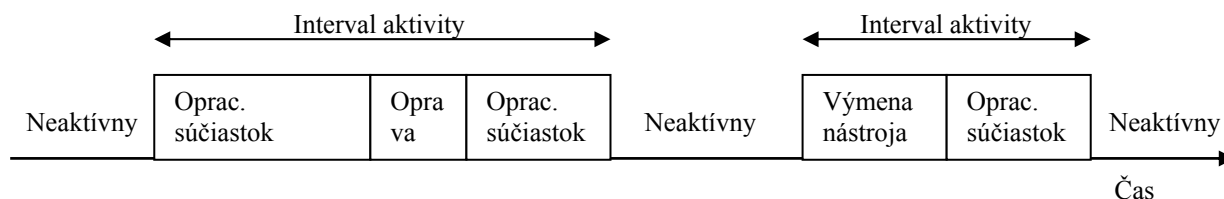
V tomto príspevku sa zaoberáme niekoľkými metódami identifikácie úzkych miest, vyvinutými v poslednom desaťročí:

- metóda intervalov aktivity [Roser a kol. 2001]
- metóda bodu zvratu [Li a kol. 2007]
- metóda šípiek [Biller a kol. 2008]
- metóda využívajúca koeficient synchronizácie [Králová-Bielak 2004]

Najprv si priblížime podstatu jednotlivých metód. Keďže autori v literatúre spravidla neuvádzajú jednoznačný názov svojej metódy, v tomto príspevku sme kvôli jednoznačnosti zvolili názvy podľa príznaku, ktorý výstižne charakterizuje danú metódu.

Metóda intervalov aktivity

Metóda intervalov aktivity [Roser a kol. 2001] vznikla vo výskumných laboratóriách japonskej firmy Toyota a využíva ako kritérium priemerné trvanie intervalu aktivity jednotlivých prvkov výrobného systému (activity period). Všetky prvky výrobného systému, vykonávajúce činnosť ľubovoľného druhu, sa súhrnne nazývajú zariadeniami, či je to stroj, dopravník, vozík, pracovník a pod. Každé zariadenie sa v ľubovoľnom časovom okamihu nachádza buď v aktívnom, alebo v neaktívnom stave, pričom za aktívny sa považuje každý stav, ktorý prispieva ku zvýšeniu prietoku, t.j. aj čas nastavovania alebo čas opravy. V činnosti každého prvku sa teda striedajú intervaly aktivity a pasivity (obr. 1).



Obr. 1. Intervaly aktivity zariadení

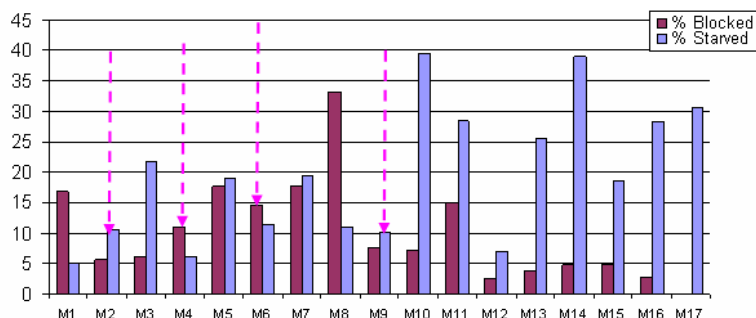
Za úzke miesto sa považuje zariadenie, u ktorého je najmenšia pravdepodobnosť prerušenia v činnosti ostatnými zariadeniami, a pritom najviac ovplyvňuje celkový prietok systému. Kritériom je teda aritmetický priemer dĺžky intervalov aktivity pre každý aktívny prvok v systéme a úzkym miestom je element s najdlhším priemerným intervalom aktivity. Takýto ukazovateľ zvyčajne veľmi zreteľne odliší zariadenia, ktoré sú úzkymi miestami, od ostatných.

Táto metóda je zaujímavá tým, že na rozdiel od ostatných nevychádza zo súhrnných štatistík, ktoré sa získavajú ako výsledok simulačných experimentov, ale z časových okamihov, kedy v systéme dochádza k určitým udalostiam (začiatok a ukončenie opracovania, opravy, výmeny nástroja a pod.). Ako informačný zdroj možno využiť log file, čo je sekvenčný súbor, do ktorého sa v priebehu simulácie zaznamenávajú všetky udalosti v systéme, alebo zaznamenávanie udalostí do súboru pomocou riadiacich pravidiel na jednotlivých zariadeniach.

Metóda bodu zvratu

Metóda [Li a kol. 2007] je založená na určení kritických pracovísk pomocou tzv. bodu zvratu (turning point), ktorým sú v sériovom výrobnom procese pracoviská, kde dochádza ku zmene vzťahu medzi priemerným blokováním a priemerným prestojom od $\bar{B} > \bar{P}$ k $\bar{B} < \bar{P}$. Súčet ukazovateľov priemerného blokovania a priemerného prestoja je na kritickom pracovisku nižší než na susedných. Kritické pracoviská sa ďalej skúmajú – postupne sa

v každom z nich separátne zvyšuje kapacita a vyhodnocuje sa dosiahnuté zvýšenie prietoku, aby sa odhalilo najužšie miesto.

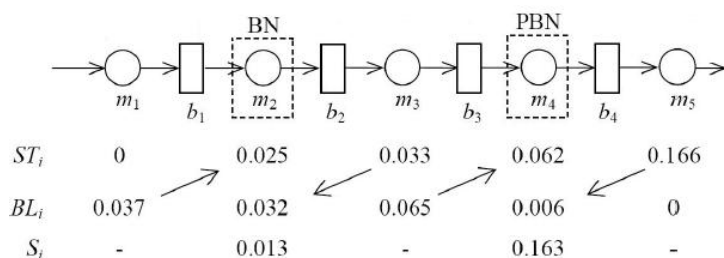


Obr. 2. Ukážka určenia kritických pracovísk (označené šipkami). Na zvislej osi sa uvádza priemerné percento času, po ktorý je zariadenie blokované, resp. v prestoji

Metóda šipiek [Biller a kol. 2008]

Metóda opísaná v práci [Biller a kol. 2008] vychádza zo staršej práce autorov Kuo, Lim a Meerkov [Kuo a kol. 1996], ktorí navrhli nepriamu metódu identifikácie úzkych miest pre otvorené sériové linky, založenú na zistení pravdepodobností blokovania (BL_i) a prestojov (starvations) ST_i pre všetky zariadenia v systéme a vyhodnotení vzťahov medzi BL_i a ST_{i+1} pre po sebe idúce zariadenia. Metóda je založená na porovnaní ukazovateľov dvoch susedných strojov: ak priemerný čas blokovania predchádzajúceho stroja je vyšší než priemerný čas prestoja nasledujúceho stroja, úzke miesto je niektorý z nasledovníkov, inak je úzkym miestom niektorý predchodca.

Podľa relácie hodnôt BL_i a ST_{i+1} pre každú dvojicu po sebe idúcich pracovísk $i, i+1$ sa do schémy výrobnéj linky medzi uvedené pracoviská priradia šipky smerujúce od väčšej hodnoty k menšej (emanation arrows - obr. 3).



Obr. 3 Identifikácia úzkych miest v otvorenej sériovej linke

Ak existuje len jedno pracovisko, z ktorého nevychádzajú žiadne šipky, je to úzke miesto. Ak existuje viacero takých pracovísk, potom pracovisko s maximálnou váhou S_i je *primárne úzke miesto (primary bottleneck)*. Váha (významnosť) úzkeho miesta je ukazovateľ, ktorý sa definuje ako:

$$S_i = |ST_{i+1} - BL_i| + |ST_i - BL_{i-1}| \quad \text{pre } i = 2, \dots, M - 1$$

$$S_1 = |ST_2 - BL_1|, S_M = |ST_M - BL_{M-1}|$$

Táto metóda bola v práci [Biller a kol. 2008] upravená pre linky so spätnou väzbou do dvojetapovej procedúry, kde v prvej etape sa linka rozčlení na n virtuálnych sériových liniek, a určia sa úzke miesta pre každú z nich (*lokálne úzke miesta*). V druhej etape sa hľadá *globálne úzke miesto* pre celú linku. Biller dokazuje, že globálne úzke miesto je prakticky

vždy jedno z primárnych úzkych miest. Tento postup bol teoreticky opísaný a experimentálne dôkladne overený.

Metóda využívajúca koeficient synchronizácie

Metóda opísaná v práci [Králová-Bielak2004] je založená na účelovej funkcii reprezentujúcej dosiahnutú mieru synchronizácie výroby. Účelová funkcia je súčtom čiastkových funkcií – ukazovateľov kritickosti jednotlivých pracovísk, ktoré sa definujú ako funkcia štatistických ukazovateľov získaných ako výsledok simulácie vo Witsesse (obr. 10).

Ak za kritické pracovisko (úzke miesto alebo rezervu) považujeme také pracovisko, ktoré má buď veľkú odchýlku (kladnú alebo zápornú) ukazovateľa využitia oproti priemernému využitiu všetkých pracovísk, alebo veľkú odchýlku (kladnú alebo zápornú) v prestojoch spôsobených nedostatkom materiálu alebo čakaním na pracovníka oproti priemeru ostatných pracovísk, alebo je podstatne viac, alebo podstatne menej blokované než je priemer blokovania ostatných pracovísk, tak ukazovateľ kritickosti i -teho pracoviska možno vyjadriť nasledovnou funkciou:

$$KR_i = \left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} - B_i \right) + \left(I_i - \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \right) + \left(Bl_i - \frac{\sum_{i=1}^n Bl_i}{n} \right) + \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} - L_i \right)$$

KR_i - ukazovateľ kritickosti i -teho zariadenia

B_i - využitie i -teho pracoviska (ukazovateľ Busy)

I_i - prestoj spôsobený čakaním na materiál (Idle)

Bl_i - blokovanie spôsobené obsadenosťou nasledujúceho zariadenia (Blocked)

L_i - prestoj spôsobený čakaním na obsluhu (Waiting for Labor)

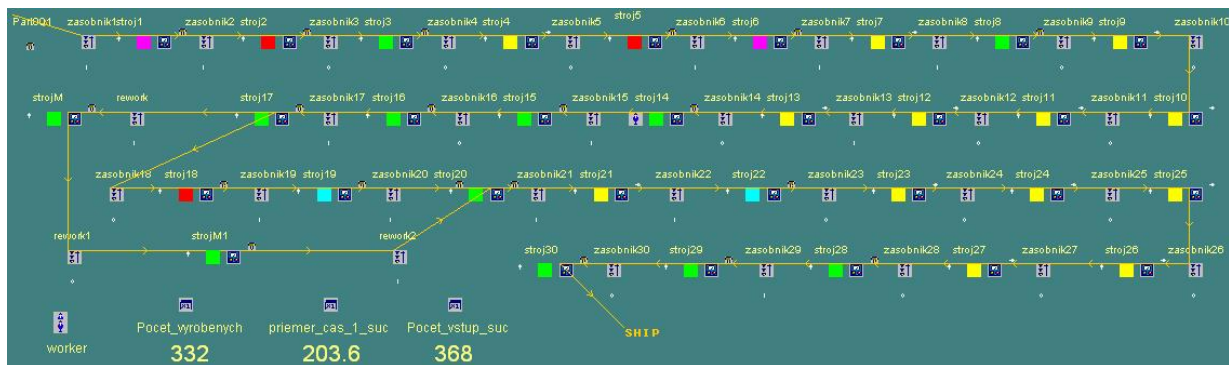
Za úzke miesto sa považuje pracovisko, na ktorom sa dosahuje najzápornejšia hodnota ukazovateľa KR_i .

Porovnanie uvedených metód

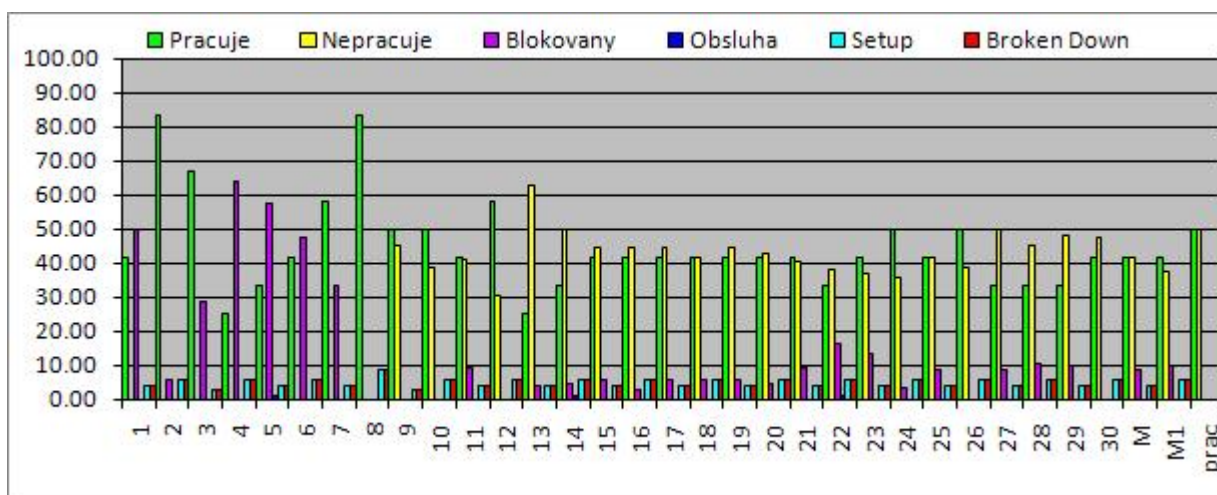
Na overenie spoľahlivosti uvedených metód bolo skonštruované experimentálne prostredie: simulačný model vo Witsesse + používateľské rozhranie v MS Excel, umožňujúce zadávať vstupné dáta k modelu a sledovať výsledné ukazovatele pre jednotlivé metódy.

Experimentálny model predstavuje sériovú výrobnú linku s 30 pracoviskami po jednom stroji so zásobníkmi. Ďalšie varianty modelu zahŕňujú vetvenie a spojenie materiálového toku (obr. 4), ako aj spätný tok materiálu (rework). Pri niektorých strojoch boli doplnení pracovníci, aby bolo možné overiť funkciu metód v prípade, že úzkym miestom je pracovník. Operačné časy, charakteristiky poruchovosti a nastavovania strojov sa zadávajú cez excelovské rozhranie. Na vyhodnocovanie sa využívajú výsledky simulácie z Witsesu (Statistics - obr. 5) a zapisovanie udalostí cez akcie. Vychádzalo sa vždy z plne synchronizovaného modelu, čím sa zistila maximálna dosiahnuteľná kapacita systému. Potom sa do modelu vnášali úzke miesta zmenou operačných časov, trvania a intervalov poruchovosti a nastavovacích časov, počtu pracovníkov a pod.

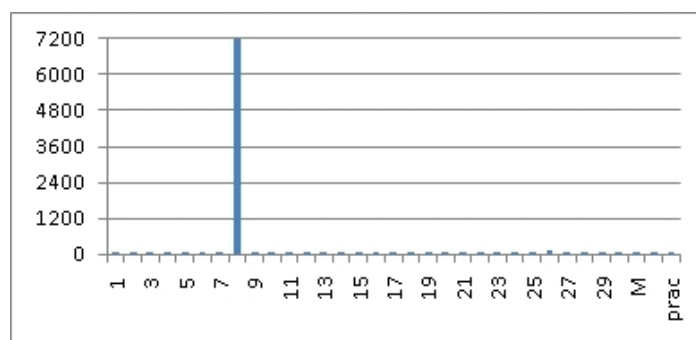
Obr. 5 až 10 ilustrujú výsledky jedného z experimentov, pri ktorom všetky metódy ukázali ako úzke miesto pracovisko č. 8. Model zahŕňa vetvenie materiálového toku medzi pracoviskami 17 a 20 a dvoch pracovníkov obsluhujúcich stroje 5,14 a 22. Na paralelnej vetve sú umiestnené stroje M a M1 so zásobníkmi, ktoré sú vo výsledkoch pridané na koniec grafov.



Obr. 4 . Ukážka prostredia s experimentálnym modelom výrobnéj linky vo WITNESSE



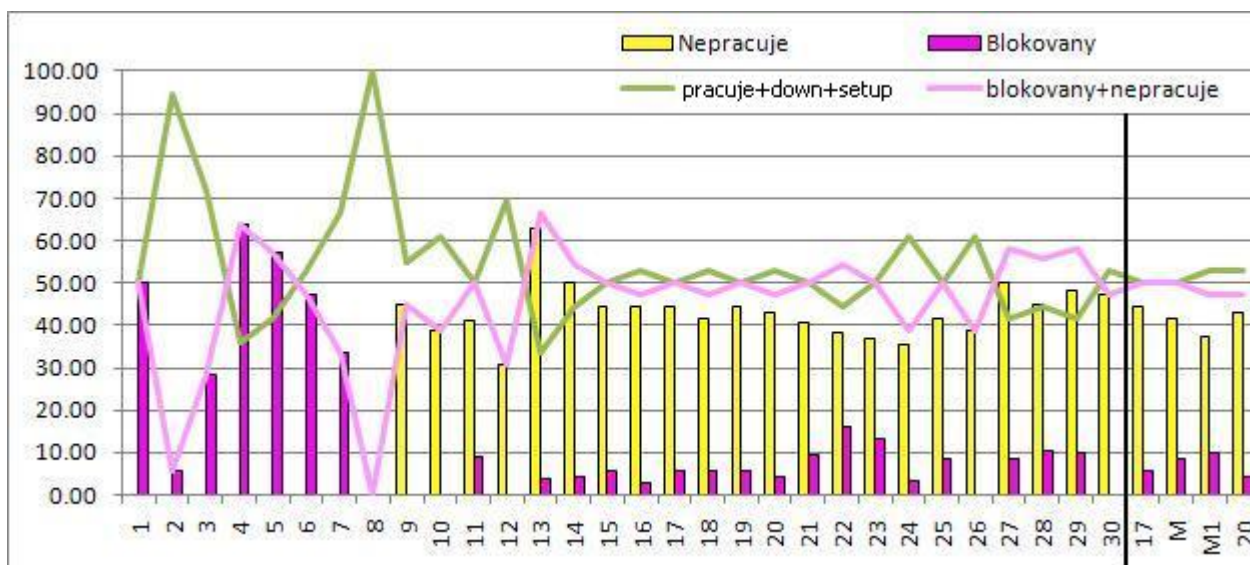
Obr. 5. Ukážka výsledkov simulácie z WITNESSu po transformovaní do grafickej podoby v MS Excel



Obr. 6. Výsledok analýzy získaný metódou intervalov aktivity

	stroj1	stroj2	stroj3	stroj4	stroj5	stroj6	stroj7	stroj8	stroj9	stroj10	pracovník
Počet intervalov aktivít	481	160	521	561	479	480	481	1	601	440	800
Dĺžka intervalov aktivít	3600	6750	5160	2600	2996	3800	4800	7200	3960	4400	5310
Priemerná dĺžka intervalov aktivít	7.4844	42.188	9.904	4.6346	6.2547	7.9167	9.9792	7200	6.589	10	6.6375

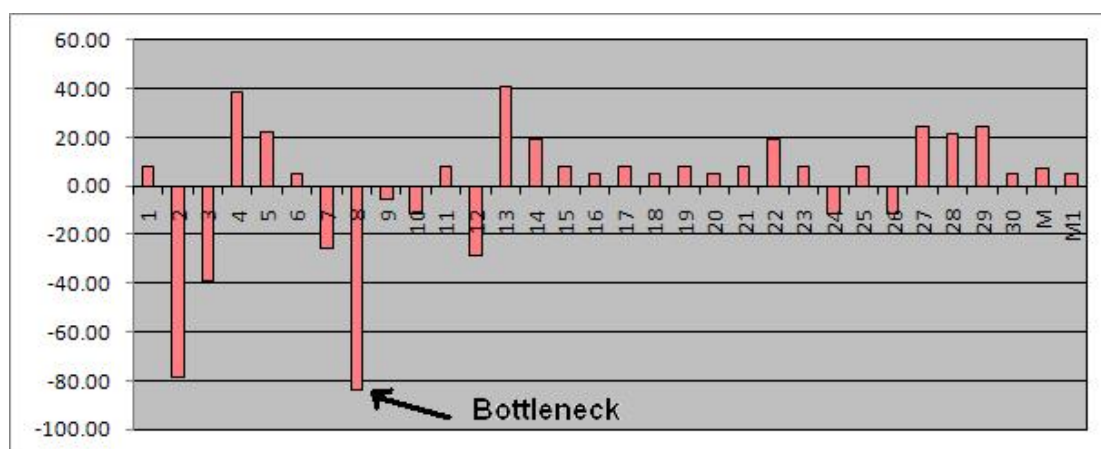
Obr. 7. Výpočty k metóde intervalov aktivity (časť výstupu)



Obr. 8. Výsledok analýzy metódou bodu zvratu

Nepracuje	Stroj1 0.00	Stroj2 0.00	Stroj3 0.00	Stroj4 0.00	Stroj5 0.00	Stroj6 0.00	Stroj7 0.00	Stroj8 0.00	Stroj9 45.00	Stroj10 38.89
Blokovany	50.00	5.56	28.33	63.89	57.22	47.22	33.33	0.00	0.00	0.00
Váha UM	s1 50	s2 55.5556	s3 33.8889	s4 92.222	s5 121.11	s6 104.44	s7 80.556	s8 78.333	s9 83.88889	s10 80
Nepracuje	Stroj11 41.11	Stroj12 30.56	Stroj13 62.78	Stroj14 50.00	Stroj15 44.44	Stroj16 44.44	Stroj17 44.44	Stroj18 41.67	Stroj19 44.44	Stroj20 42.78
Blokovany	8.89	0.00	3.89	4.44	5.56	2.78	5.56	5.56	5.56	4.44
Váha UM	s11 62.7778	s12 84.4444	s13 108.889	s14 86.111	s15 78.889	s16 80.556	s17 77.778	s18 75	s19 76.11111	s20 73.333
Nepracuje	Stroj21 40.56	Stroj22 38.33	Stroj23 36.67	Stroj24 35.56	Stroj25 41.67	Stroj26 38.89	Stroj27 50.00	Stroj28 45.00	Stroj29 48.33	Stroj30 47.22
Blokovany	9.44	16.11	13.33	3.33	8.33	0.00	8.33	10.56	10.00	0.00
Váha UM	s21 65	s22 49.4444	s23 42.7778	s24 60.556	s25 68.889	s26 80.556	s27 86.667	s28 74.444	s29 75	s30 37.222
Nepracuje	Stroj17 44.44	StrojM 41.67	StrojM1 37.22	Stroj20 42.78						
Blokovany	5.56	8.33	10.00	4.44						
Váha UM	ss17 37.2222	ssM 73.3333	ssM1 68.8889	ss20 32.778						

Obr. 9. Výsledok prvej etapy analýzy metódou šípiek.
Primárne úzke miesto je pracovisko č. 8 s hodnotou $S_8 = 78.333$



Obr. 10. Výsledok analýzy metódou synchronizačného koeficientu

S uvedeným modelom v rôznych variantoch bol vykonaný rad experimentov, na základe ktorých boli zistené nasledovné skutočnosti.

Metóda intervalov aktivity, ktorá je založená na princípe výpočtu aritmetického priemeru dĺžky intervalov aktivity pre každé zariadenie, dáva veľmi dôveryhodné výsledky. Za pozitíva možno považovať jednoduchosť vyhodnocovania, ako aj fakt, že nevychádza z relácií medzi susediacimi pracoviskami, ale ukazovatele sa počítajú pre každé zariadenie zvlášť, nezávisle od poradia, vetvenia procesu a spätných väzieb. Dokáže samostatne vyhodnotiť aj úzke miesto, ak je ním pracovník, dopravník, alebo AGV. Za určitý nedostatok možno považovať, že pri experimentoch sa vyskytli prípady, že neboli správne vyhodnotené viaceré rovnocenné úzke miesta. Ako výrazne užšie bolo označené jedno z nich, po jeho „rozšírení“ však nedošlo ku zvýšeniu prietoku, pretože pohyb materiálu uviazol na ďalších pracoviskách s rovnakou priepustnosťou. Táto metóda venuje tiež pozornosť výpočtu intervalu spoľahlivosti, čo zvyšuje vierohodnosť výsledkov.

Metóda bodu zvratu, ktorá pri vyhodnocovaní úzkych miest vychádza z porovnávania prechodu zo stavu Blokováný do Nepracuje, spolu s kumulatívnymi hodnotami na čiarovom grafe dáva tiež pomerne dobré výsledky. K jej nevýhodám patrí, že neumožňuje priamo vyhodnotiť, ktoré z viacerých úzkych miest je najužšie, možno to zistiť až na základe ďalších experimentov. Táto metóda neberie do úvahy pracovníkov ako možnú príčinu úzkeho miesta.

Billerova metóda šipiek je založená na porovnávaní ukazovateľov blokovania a prestoja susediacich pracovísk. Pri niekoľkých nerovnocenných úzkych miestach je schopná ich ukázať, pričom najužšie miesto je pracovisko s maximálnou hodnotou špecifického ukazovateľa. K nedostatkom tejto metódy patrí, že nevie spoľahlivo zistiť úzke miesto, ak je ním prvé alebo posledné pracovisko. Pri vetvení procesu sa musí každá vetva analyzovať zvlášť. Neberie do úvahy pracovníka ako možnú príčinu úzkeho miesta. Pri viacerých rovnocenných úzkych miestach vyhodnotí len jedno z nich.

Metóda založená na koeficientoch synchronizácie predpokladá výrobný systém s opakovanou výrobou obrábaco-montážneho typu tvorený postupnosťou pracovísk, na ktorých môže pracovať paralelne niekoľko zariadení rovnakého typu s rovnakými parametrami, pričom prísun materiálu na prvú operáciu nie je limitujúcim faktorom. Witnessovský model môže zahrňovať náhodné faktory pokiaľ ide o súčiastky, zariadenia i pracovníkov, poruchovosť zariadení, návrat časti súčiastok na predchádzajúce operácie apod. Uvedená metóda umožňuje jednoznačnú kvantitatívnu identifikáciu úzkeho miesta. Berie do úvahy aj pracovníkov, ale ktorý prvok systému je príčinou zúženia (stroj, pracovník) možno zistiť až v druhej etape na základe analýzy štatistík. Na rozdiel od všetkých skôr uvedených metód táto metóda kvantifikuje nielen úzke miesta a ich úroveň, ale aj „široké miesta“, t.j. pracoviská s nevyužitou kapacitou (rezervy), čo je dobrým východiskom pre automatizáciu procesu synchronizácie.

Záver

Cieľom tohto príspevku bolo zmapovať niekoľko metód identifikácie úzkych miest, vyvinutých v poslednom desaťročí, porovnať ich klady a nedostatky. Je zrejmé, že nie všetky metódy sú schopné správne vyhodnocovať úzke miesta v celej variabilite výrobných procesov a všetky majú svoje obmedzenia, preto je zaujímavý aj problém optimálneho výberu vhodnej metódy, ktorý však nebol predmetom tohto príspevku.

Experimentálne prostredie vytvorené na porovnávanie metód vyhodnocovania úzkych miest súčasne umožňuje názorne prezentovať platnosť základných postulátov Goldrattovej teórie a náročnosť procesu navrhovania výrobných systémov v dôsledku vzájomnej závislosti ich prvkov rôzneho typu a ťažko odhadnuteľných dopadov vplyvu zmien štruktúry a parametrov systému na jeho výkonnosť.

Pod'akovanie

Príspevok bol podporený vedeckou grantovou agentúrou MŠ SR VEGA v rámci grantu č. 1/0544/09.

Zoznam literatúry

- [1] Biller, S., Li, J., Marin, S.P., Meerkov, S. M., Zhang, L.: Bottlenecks in Production Lines with Rework: A System Approach. In: *Proceedings of the 17th World Congress the Int. Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp.14888-14893
- [2] Goldratt, E.M., Cox, J. : *The Goal. Excellence in Manufacturing*. North River Press, Croton-on-Hudson, N.Y 1984.
- [3] Jerz, V., Tolnay, M.: *Simulácia diskretných systémov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. 162 s., ISBN 80-227-2384-3
- [4] Králová, Z., Bielak, M.: Synchronizácia výrobného procesu s využitím simulácie vo WITNESSE. *7. konferencia WITNESS*, 3.-4.6.2004, Kozov, ČR
- [5] Kuo, C. T., Lim, J. T., Meerkov, S. M., Bottlenecks in serial production lines: a system-theoretic approach. *Mathematical Problem in Engineering*, 1996, Vol. 2, pp. 233-276.
- [6] Lawrence, S. R., Buss, A. H.: Economic analysis of production bottlenecks. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 1 (1995), Issue 4, pp. 341-363
- [7] Li, L., Chang, Q., Xiao, G., Biller, S.: Bottleneck Detection of Manufacturing Systems Using Data Driven Method. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing*, Ann Arbor, Michigan, USA, July 22-25, 2007, pp. 76-81
- [8] Roser, Ch., Nakano, M., Tanaka, M.: A practical bottleneck detection method. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, WSC 2001. December 9-12, 2001, Arlington, VA, USA. ACM, 2001, pp. 949-953

Autori

Doc. Ing. Zdenka Králová, PhD.
Ing. Michal Leporis
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, SR

zdenka.kralova@stuba.sk
michal.leporis@stuba.sk