

ZVYŠOVÁNÍ VYUŽITÍ VÍCEPRODUKTOVÝCH VÁRKOVÝCH VÝROB POMOCÍ MEZIOPERAČNÍCH ZÁSOBNÍKŮ

Jan Vrzák, Vladimír Hanta

Vysoká škola chemicko-technologická Praha, Ústav počítačové a řídicí techniky

Klíčová slova: víceproduktové várkové procesy, modelování a simulace, simulační program Witness, mezioperační zásobníky, výrobní plány, optimalizace

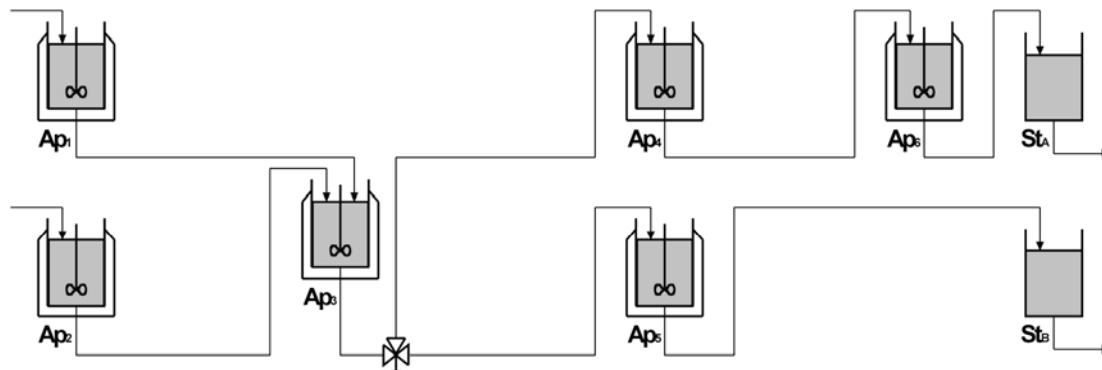
1. Úvod

Chemické produkty lze podle způsobu výroby rozdělit do tří velkých skupin: chemické komodity vyráběné ve velkých množstvích (kyselina sírová), čisté chemikálie (titaničitan barnatý) a chemické speciality (léky, barviva, parfémy, chuťové přísady). Naprostá většina produktů ze druhé a třetí skupiny se vyrábí várkovým způsobem. Na rozdíl od kontinuálních procesů ve várkových procesech hlavní výrobní stupně pracují přetržitě a várkové procesy vyrábějí produkty ve diskretních množstvích po várkách. Várkové výrobní linky mají z hlediska výroby produktů druhé a třetí skupiny řadu předností:

- jsou ekonomické pro malé objemy vyráběných produktů,
- pružně se přizpůsobují změnám ve vyráběném sortimentu,
- jsou kdykoliv schopny pružně měnit vyráběná množství produktů změnou počtu várek,
- dovolují použít standardizované víceúčelové aparáty pro výrobu rozsáhlého sortimentu na stejném zařízení,
- velmi dobře se čistí, ať už je zapotřebí odstranit znečištění a nánosy nebo sterilizovat,
- při návrhu je lze dobře přenést z laboratorního měřítka,
- dovolují úplnou identifikaci jednotlivých várek produktů.

2. Víceproduktové várkové procesy

Víceproduktové várkové procesy, které vyrábějí řadu produktů na stejném výrobním zařízení, kladou na návrh výrobního zařízení a na optimalizaci výrobního procesu velké požadavky. Odlišné produkty vyžadují odlišný návrh, odlišné pracovní podmínky a odlišný způsob řízení výroby. Návrh a řízení víceproduktových procesů vyžadují kompromisy, které musí být provedeny napříč požadavků a potřeb jednotlivých produktů.



Obr. 1. Schéma jednoduchého typického víceproduktového várkového procesu

3. Simulační model víceproduktové várkové výrobní linky

Model víceproduktového várkového procesu jako systému diskrétních událostí lze sestavit pomocí těchto pravidel:

1. Výroba várek každého produktu probíhá postupně na všech aparátech ve stejném pořadí.
2. Velikosti várek stejných produktů jsou vždy stejné, velikosti várek různých produktů se mohou lišit.
3. Operaci při výrobě várky některého produktu lze zahájit, jestliže nastaly tyto události:
 - všechny předcházející operace při výrobě várky byly dokončeny,
 - byla dokončena stejná operace při výrobě předcházející várky
 - aparát, na kterém má probíhat tato operace, není právě používán k dočasnému skladování některé várky.
4. Výroba várky na žádném aparátu nemůže být přerušena a znovu obnovena.
5. Žádný aparát nesmí vyrábět více než jednu várku současně.
6. Žádná várka nesmí být zpracovávána současně na více aparátech.
7. Po dokončení operace je celá várka přesunuta do následující výrobní jednotky.
8. Pokud není tento aparát volný, je várka přesunuta a přechodně uchována v přiřazeném výstupním mezioperačním zásobníku.
9. Pokud není volný ani mezioperační zásobník, je várka dočasně skladována přímo ve výrobní jednotce.
10. Doba přesunu várek mezi aparáty je zanedbatelná ve srovnání s operační dobou a je do ní plně zahrnuta, stejně jako doby najetí, odstavení a čištění výrobního zařízení.

4. Úzké profily várkových procesů

Úzký profil výrobního procesu lze obecně definovat jako jakýkoliv zdroj ve výrobním procesu, jehož kapacita je stejná nebo menší než požadavky na něj kladené. Další možné definice jsou např.:

- výrobní zařízení, které nejvíce snižuje výkonnost procesu,
- nejpomalejší operace procesu,
- operace, která nejvíce omezuje výrobní kapacitu.

Lze říci zcela obecně, že každý výrobní proces obsahuje úzký profil. Pokud výrobní proces nemá úzký profil, jeho výrobní kapacita překračuje obvyklé požadavky na něj kladené. Vzhledem k těmto poněkud obecným definicím úzkého profilu, vzniká problém, jak nalézt úzké výrobní profily. Ve víceproduktových výrobních linkách lze úzký profil identifikovat analýzou vztahů mezi zablokováním aparátů a jejich nedostatečným zásobováním. Jestliže výrobní zařízení je zablokováno, pak úzký profil leží dále na lince ve směru toku materiálu. Obráceně, jestliže výrobní zařízení není dostatečně zásobováno, pak úzký profil leží někde před tímto zařízením. U výrobních zařízení se vstupními a výstupními zásobníky úzký profil je zařízení, jehož vstupní zásobník je plný, zatímco výstupní zásobník je prázdný. Z hlediska rozpracované výroby úzkým profilem je výrobní zařízení, které má nejvyšší zásoby rozpracované výroby. Po identifikování úzkého profilu je nutné nalézt možnosti pro zvýšení výkonu výrobní linky pomocí opatření s nejmenšími nebo alespoň přiměřenými investicemi.

K identifikaci úzkých profilů ve víceproduktových procesech lze použít některé uvedené kritérií úzkých profilů. Úzkým profilem je výrobní jednotka, která blokuje předcházející aparáty v nejvyšší míře. Identifikované úzké profily se eliminují zcela nebo alespoň částečně pomocí mezioperačních zásobníků. Skladovací kapacita těchto zásobníků je stanovena tak, že každý zásobník může dočasně skladovat nejvýše jednu várku. Identifikace a následná eliminace úzkého profilu se provádí podle těchto heuristických pravidel:

1. úzkoprofilový aparát je aparát, u něž předcházející aparáty vykazovaly největší relativní podíl blokování během celé výroby
2. za identifikovaný úzkoprofilový aparát se umístí mezioperační zásobník,
3. pokud nepomůže ani toto opatření (předcházející aparát vykazuje stále vysoký podíl blokování), pak se další mezioperační zásobník umístí za aparát následující za úzkoprofilovým aparátem,
4. další pokus o snížení blokování se provádí umístěním jiného mezioperačního zásobníku mezi úzkoprofilový aparát a aparát s nejvyšším podílem blokování.

5. Identifikace a eliminace úzkých profilů pomocí simulačních experimentů

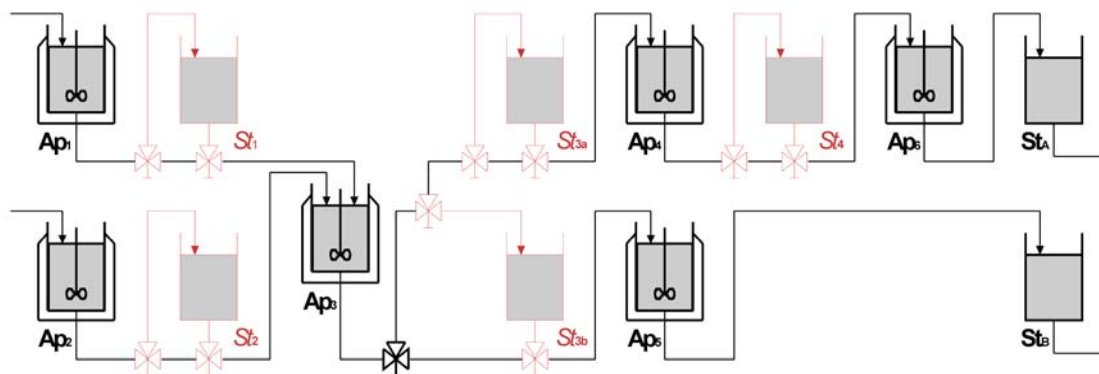
Postup zlepšování vářkových výrobních procesů pomocí simulačních experimentů je vzhledem množství alternativních možností možné formulovat jen rámcově. Prakticky vždy se jedná o heuristický postup založený na analýze kapacit a časového využití výrobního zařízení a zdrojů, tedy výrobních, dopravních a skladovacích jednotek, pracovních sil, surovin atd. Základním klíčem k úspěšnému provozování výrobních linek je nalezení úzkého profilu výrobního procesu a jeho eliminace přiměřeným zvyšováním jeho kapacity. Eliminace jednoho úzkého profilu obvykle vede ke vzniku jiného úzkého profilu s vyšší kapacitou.

Simulační experimenty a výpočty byly provedeny na modelovém příkladu víceproduktové linky. Vářková výrobní linka, na které se vyrábí osm různých produktů, se skládá ze šesti aparátů. Všechny aparáty mohou mít připojeny výstupní mezioperační zásobníky, ve kterých mohou být dočasně skladovány meziprodukty. Za koncovými aparáty jsou umístěny expediční zásobníky s dostatečnou kapacitou pro skladování všech várek. Třetí aparát zpracovává najednou dva meziprodukty a produkuje základní meziprodukt a důležitý vedlejší meziprodukt, který se ještě dále zpracovává. Schéma výrobní linky je znázorněno na obr. 1, vstupní údaje jsou uvedeny v tab. 1. Optimální výrobní plány (posloupnost výroby jednotlivých produktů) byly sestaveny za předpokladu, že se každý z osmi produktů bude vyrábět vždy jen po jedné várce.

| Produkt | Operace ₁ | Operace ₂ | Operace ₃ | Operace ₄ | Operace ₅ | Operace ₆ |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| P_1 | 12 | 22 | 6 | 30 | 33 | 15 |
| P_2 | 6 | 6 | 20 | 15 | 10 | 25 |
| P_3 | 14 | 21 | 15 | 30 | 5 | 10 |
| P_4 | 45 | 25 | 6 | 12 | 35 | 9 |
| P_5 | 30 | 23 | 15 | 21 | 24 | 4 |
| P_6 | 5 | 5 | 20 | 20 | 15 | 9 |
| P_7 | 6 | 16 | 17 | 30 | 23 | 40 |
| P_8 | 15 | 15 | 26 | 13 | 9 | 25 |

Tab. 1 Operační časy modelového víceproduktového vářkového procesu

Cílem simulačních experimentů je nalézt umístění mezioperačních zásobníků tak, aby se odstraněním úzkoprofilových aparátů co nejvýše zvýšila výkonnost víceproduktové linky. Možnosti umístění mezioperačních zásobníků jsou znázorněny na obr. 2.



Obr. 2. Možnosti umístění mezioperačních zásobníků

Všechny simulační experimenty zaměřené na identifikaci úzkého profilu byly provedeny s výrobním plánem $P_1 \rightarrow P_8 \rightarrow P_2 \rightarrow P_7 \rightarrow P_3 \rightarrow P_6 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5$, tento plán vyplynul z požadavků zákazníků na termíny dodávek jednotlivých produktů.

Při simulaci průběhu výrobního plánu pro víceproduktovou linku bez mezioperačních zásobníků bylo zjištěno výrazné blokování jednotlivých výrobních aparátů, přehledná statistika je uvedena v tabulce Tab. 2. Doba výroby podle plánu byla 269 h, celková doba blokování aparátů 263 h.

| Jednotka | Aparát ₁ | Aparát ₂ | Aparát ₃ | Aparát ₄ | Aparát ₅ | Aparát ₆ |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| % nečinnosti | 14,87 | 22,31 | 30,86 | 25,28 | 42,75 | 49,07 |
| % aktivity | 49,44 | 49,44 | 46,47 | 63,57 | 57,25 | 50,93 |
| % zablokování | 35,69 | 28,25 | 22,68 | 11,15 | 0,00 | 0,00 |
| Počet operací | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tab. 2. Statistika činnosti výrobních jednotek pro linku bez mezioperačních zásobníků

Vzhledem k vysokému podílu blokování aparátu Ap₁ by mezioperační zásobník měl být umístěn za následující aparát, který je úzkým profilem celé linky. Za tento aparát lze umístit buď zásobník St_{3a} nebo zásobník St_{3b} nebo oba dva zásobníky. Po provedení tří simulačních experimentů pro uvedené tři možnosti se ukázalo, že zásobník St_{3b} nemá žádný vliv na dobu trvání výroby. Naopak použití zásobníku St_{3a} zkrátí dobu výroby na 246 h. Statistika jediné úspěšné možnosti je uvedena v tabulce Tab. 3.

| Jednotka | Ap ₁ | Ap ₂ | Ap ₃ | Ap ₄ | Ap ₅ | Ap ₆ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| % nečinnosti | 18,30 | 27,24 | 37,40 | 18,30 | 37,40 | 44,31 |
| % aktivity | 54,06 | 54,06 | 50,81 | 69,51 | 62,60 | 55,69 |
| % zablokování | 27,64 | 18,70 | 11,79 | 12,19 | 0,00 | 0,00 |
| Počet operací | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tab. 3. Statistika činnosti výrobních jednotek pro linku s mezioperačním zásobníkem St_{3a}

Po nasazení zásobníku St_{3a} se součet dob blokování jednotek výrazně sníží na 173 h, přesto aparát Ap₃ zůstává úzkým profilem. V této situaci je účelné umístit další zásobník za aparát Ap₄, protože pravděpodobně současně dochází k naplnění zásobníku St_{3a} a zablokování aparátu Ap₄.

| Jednotka | Ap ₁ | Ap ₂ | Ap ₃ | Ap ₄ | Ap ₅ | Ap ₆ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| % nečinnosti | 16,60 | 26,56 | 41,91 | 26,97 | 36,10 | 43,16 |
| % aktivity | 55,18 | 55,18 | 51,87 | 70,95 | 63,90 | 56,84 |
| % zablokování | 28,21 | 18,26 | 6,22 | 2,07 | 0,00 | 0,00 |
| Počet operací | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tab. 4. Statistika činnosti výrobních jednotek pro linku se zásobníky St_{3a} a St₄

Po nasazení zásobníku St₄ se doba výroby zkrátí na 241 h a celková doba blokování aparátů klesne na 132 h. Vzhledem k tomu, že pro skladování meziproductů mezi aparáty lze použít nejvýše jeden zásobník, zbývá už jen jediná možnost, jak snížit vysoký podíl blokování aparátu Ap₁: další zásobník St₁ se umístí mezi aparáty Ap₁ a Ap₃.

| Jednotka | Ap ₁ | Ap ₂ | Ap ₃ | Ap ₄ | Ap ₅ | Ap ₆ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| % nečinnosti | 18,10 | 20,82 | 36,65 | 20,37 | 30,32 | 38,01 |
| % aktivity | 60,18 | 60,18 | 56,56 | 77,37 | 69,68 | 61,99 |
| % zablokování | 21,72 | 19,00 | 6,79 | 2,26 | 0,00 | 0,00 |
| Počet operací | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tab. 5. Statistika činnosti výrobních jednotek pro linku se zásobníky St_{3a}, St₄ a St₁

Po nasazení zásobníku St₁ se doba výroby sníží na 221 h, ale celková doba blokování aparátů zůstává pořád poměrně vysoká (110 h). Další přidáváním zásobníků St₂ a St_{3b} by se dosáhlo další snížení celkové doby blokování aparátů na 64 h (viz tabulka Tab. 6). Doba výroby se však už nezmění a proto možné přidávání dalších zásobníků nemá ekonomický smysl. Cílem není optimalizace celkové doby blokování aparátů, ale minimalizace celkové doby výroby podle daného plánu.

| Jednotka | Ap ₁ | Ap ₂ | Ap ₃ | Ap ₄ | Ap ₅ | Ap ₆ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| % nečinnosti | 25,34 | 37,11 | 33,94 | 20,37 | 30,32 | 38,01 |
| % aktivity | 60,18 | 60,18 | 56,56 | 77,37 | 69,68 | 61,99 |
| % zablokování | 14,48 | 2,71 | 9,50 | 2,26 | 0,00 | 0,00 |
| Počet operací | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Tab. 6. Statistika činnosti výrobních jednotek pro linku se všemi možnými zásobníky

6. Optimalizace nasazení mezioperačních zásobníků

Pro ověření heuristického postupu identifikace a eliminace úzkých profilů výrobní linky byla provedena diskrétní optimalizace nasazování mezioperačních zásobníků. Optimální počet a umístění mezioperačních zásobníků lze určit postupným přidáváním zásobníků po jednom, nalezením optimálního rozvrhu pro tuto konfiguraci zásobníků a systematickým hledáním jejich optimálního rozložení pro daný konečný počet zásobníků. Hodnota celkové doby výroby byla určována pomocí simulačních experimentů, zatímco optimální počet a umístění zásobníků pomocí metody cyklické záměny proměnných (relaxační metoda). Při

vyhledávání optimálního počtu a rozložení zásobníků byly s výhodou využity tyto skutečnosti:

- počet zásobníků lze změnit jen o celé číslo,
- přidání libovolného počtu zásobníků nemůže zhoršit dosaženou hodnotu účelové funkce,
- jediná možná změna účelové funkce je její zlepšení.

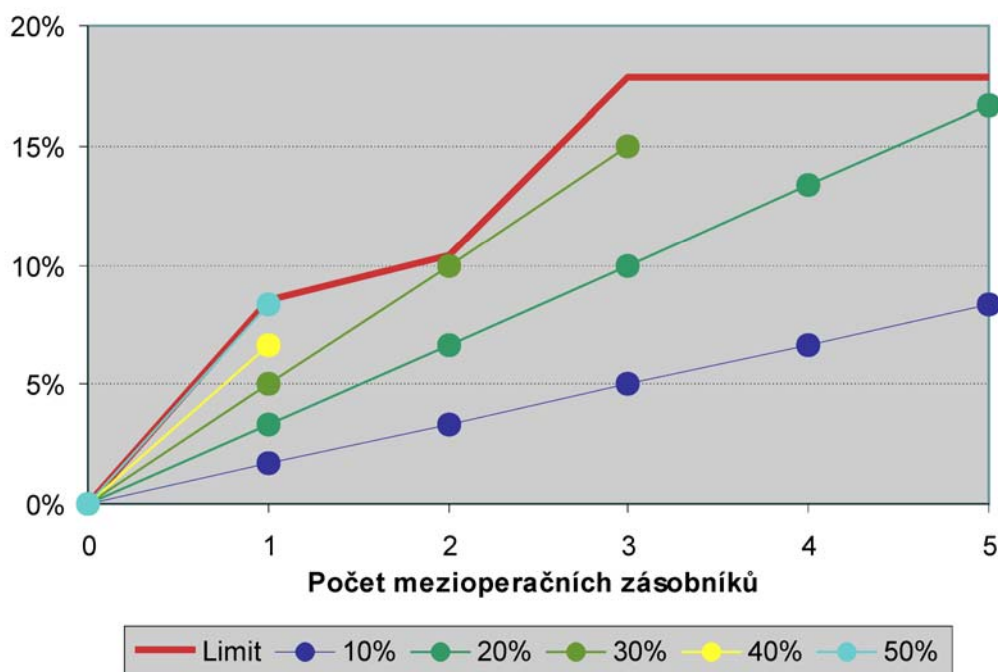
Postup diskrétní optimalizace při hledání optimálního počtu a umístění mezioperačních zásobníků je sumarizován v tabulce Tab. 7.

| Počet zásobníků | Zásobníky | | | | | Doba výroby |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------|
| | St ₁ | St ₂ | St _{3a} | St _{3b} | St ₄ | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 269 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249 |
| | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 269 |
| | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 246 |
| | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 269 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 249 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 246 |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 246 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 246 |
| | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 241 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 221 |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 241 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 229 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 221 |
| | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 221 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 221 |

Tab. 7. Postup diskrétní optimalizace umístění mezioperačních zásobníků

7. Efektivnost nasazení mezioperačních zásobníků

Nasazení mezioperačního zásobníku mezi aparáty víceproduktové vářkové linky je účelné pouze tehdy, jestliže je efektivní z ekonomického hlediska. Zisk ze zvýšení efektivity výrobní linky zkrácením celkové doby výroby nesmí být menší než jsou celkové náklady na zakoupení nebo pronájem zásobníku a jeho instalaci do výrobní linky. Na obr. 3 jsou přehledně uvedeny možnosti, kdy nasazení zásobníku je ještě hospodárné. Cena zásobníku je vyjádřena jako zlomek průměrné ceny jednoho výrobního aparátu, jsou uvažovány pouze investiční náklady bez provozních nákladů.



Obr. 3. Efektivnost nasazení zásobníků vzhledem k jejich relativní ceně

8. Závěr

Víceproduktové vářkové procesy jsou často používaným způsobem výroby pro rozsáhlou skupinu chemických produktů od čistých chemikálií přes léčiva až po vonné látky a chuťové přísady. Účinnost vářkové výrobní linky může být výrazně omezena úzkoprofilovými aparáty. Tyto aparáty způsobují zablokování předcházejících aparátů. Zablokované aparáty místo provádění výrobních operací pouze pasivně skladují vyrobený meziprodukt. Účinnost výrobní linky lze pozitivně ovlivnit zařazením mezioperačních zásobníků. Jejich vhodným umístěním lze vzniku úzkého profilu částečně nebo úplně zamezit, a tak jej eliminovat. Bylo navrženo několik heuristických pravidel pro identifikaci a eliminaci úzkých profilů pomocí mezioperačních zásobníků. Způsob identifikace úzkých profilů víceproduktové výrobní linky a návrh vhodného umístění mezioperačních zásobníků byl ukázán na příkladu víceproduktové linky o šesti operacích, která vyrábí celkem osm různých produktů. Navržená heuristická pravidla byla porovnána s diskrétní optimalizací.

Tato práce byla vypracována za podpory programu č. MSM 6046137306 MŠMT ČR.

Literatura

- [1] Goldratt E. M.: The Theory of Constraints. North River Press, Croton-on-Hudson, NY, 1990
 - [2] Hanta V.: Optimum Configuration of Storage Bins in Batch Production, Automatizace (2000) 43, 171–175.
 - [3] Humusoft CZ – materiály firmy: <http://www.humusoft.cz/>
 - [4] Lanner UK – materiály firmy: <http://www.lanner.com/>
 - [5] Peredo C. H. et al.: Learning Witness. Lanner Group. Houston, Texas, USA, 1998.
 - [6] Robinson S.: Successful Simulation. A Practical Approach to Simulation Projects. McGraw-Hill, London 1994.
-

Ing. Jan Vrzák

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Ústav počítačové a řídicí techniky

Technická 5, 166 28 Praha 6

tel.: +420-2 2044 4270, fax.: +420-2 2044 5053, email: vrzakj@vscht.cz

Ing. Vladimír Hanta, CSc.

Vysoká škola chemicko technologická v Praze

Ústav počítačové a řídicí techniky

Technická 5, 166 28 Praha 6

tel.: +420-2 2044 4212, fax.: +420-2 2044 5053, e-mail: hantav@vscht.cz