

IDENTIFIKACE A ELIMINACE ÚZKÝCH PROFILŮ VE VÍCEPRODUKTOVÝCH VÁRKOVÝCH VÝROBÁCH

Jan Vrzák, Vladimír Hanta

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav počítačové a řídicí techniky

Klíčová slova: víceproduktové várkové procesy, modelování a simulace, identifikace a eliminace úzkých profilů, plovoucí úzký profil, simulační program Witness

1 Úvod

Várkové výrobní linky mají z hlediska výroby chemických produktů celou řadu předností, zejména:

- jsou ekonomické zejména pro malé objemy vyráběných produktů,
- pružně se přizpůsobují změnám a inovacím ve vyráběném sortimentu,
- jsou schopny jednoduše změnit vyráběné množství produktů změnou počtu várek,
- dovolují použít standardizované víceúčelové aparáty pro výrobu rozsáhlého sortimentu na stejném zařízení,
- velmi dobře se čistí, snadno se z nich odstraňují nánosy a lze je lehce sterilizovat,
- při návrhu je lze dobře přenést z laboratorního do poloprovozního/provozního měřítka,
- dovolují úplnou identifikaci várek produktů důležitou při výrobě léčiv a potravin.

Várkové výroby lze rozdělit podle organizace výroby na dva základní typy: víceúčelové a víceproduktové. Pro víceúčelové výroby je typické použití různorodých technologických postupů na výrobních linkách, které jsou přechodně sestavovány z aparátů vybíraných z dané sestavy výrobních jednotek. Některé várky různých produktů mohou být vyráběny současně, zatímco některé várky stejného produktu mohou být vyráběny v různých časech na odlišných linkách. Naproti tomu lze víceproduktové várkové procesy charakterizovat tím, že se na stejné výrobní lince postupně vyrábí podobnými technologiemi několik různých produktů.

2 Víceproduktové várkové procesy

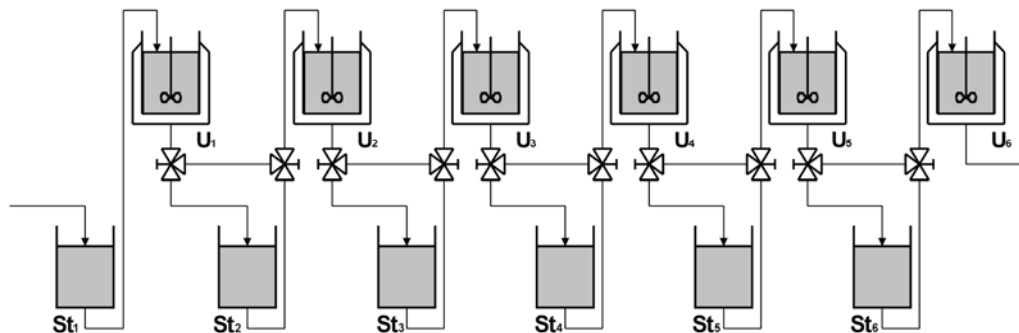
Víceproduktové várkové procesy, ve kterých vyrábí několik různých produktů na stejném zařízení, kladou na návrh výrobního zařízení a na optimalizaci výrobního procesu velké požadavky. Odlišné produkty vyžadují odlišný návrh, odlišné pracovní podmínky a odlišný způsob řízení výroby. Návrh, plánování a řízení víceproduktových procesů vyžadují kompromisy, které musí být provedeny napříč požadavků a potřeb jednotlivých produktů. Rozvrhy výroby a krátkodobé výrobní plány jsou důležité nástroje manažerského řízení těchto typů várkových výrob. Ekonomické parametry výrobní linky mohou být významně zlepšeny bez dodatečných nákladů vhodnou organizací výroby podle dobrého výrobního plánu.

3 Model víceproduktové várkové výrobní linky

Víceproduktový várkový proces lze pro potřeby krátkodobého plánování modelovat jako systém diskrétních událostí. Simulační model se sestavuje na základě souboru pravidel, z nichž nejdůležitější jsou pravidla popisující podmínky pro zahájení výrobní operace. Zpracování várky zahájit, jestliže byly splněny tyto podmínky (nastaly tyto události):

- operace při zpracování této várky, které předcházejí uvažované operaci, byly dokončeny,
- byla dokončena stejná operace při zpracování předcházející várky

- aparát, ve kterém má probíhat uvažovaná operace, není právě používán k dočasnému skladování předcházející várky.



Obr. 1. Schéma sériové víceproduktové várkové výrobní linky

4 Úzké profily víceproduktových 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. V sériových várkových 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 je úzký profil to zařízení, jehož vstupní zásobník je plný, zatímco výstupní zásobník je prázdný. Po identifikování úzkého profilu je možné nalézt možnosti pro zvýšení výkonu výrobní linky pomocí opatření s nejmenšími nebo alespoň přiměřenými investicemi.

K identifikaci úzkých profilů ve víceproduktových procesech lze použít následující kritérium. Úzkým profilem je ta výrobní jednotka, která splňuje tyto silné podmínky:

1. úzkoprofilová výrobní jednotka je aktivní a provádí nějakou výrobní operaci,
2. všechny předcházející jednotky jsou zablokovány (dočasně skladují zpracované várky),
3. všechny předcházející mezioperační zásobníky jsou plné,
4. všechny následující výrobní jednotky čekají na novou várku,
5. všechny následující mezioperační zásobníky jsou prázdné.

Úzký profil identifikovaný podle těchto podmínek je globální, to znamená, že celá linka pracuje v rytmu úzkoprofilového aparátu. Jednotky před úzkým profilem jsou plně zásobeny materiálem, ale nemají žádnou volnou výrobní kapacitu. Naproti tomu jednotky za úzkým profilem mají volnou plnou výrobní kapacitu, ale vůbec žádný materiál. Jakmile úzkoprofilová jednotka dokončí operaci, dojde u všech jednotek před úzkoprofilovým aparátem ke kaskádovému posunu várek. Takovýto úzký profil může být odstraněn pouze vnějším zásahem, např. změnou produktu.

Doby trvání výrobních operací (operační časy) se u víceproduktových linek mohou výrazně lišit. Pak může nastat jev, který se nazývá plovoucí úzký profil. V závislosti na vyráběném produktu se úzkým profilem může stát vždy jiný aparát. Úzkoprofilové aparáty identifikované podle silných podmínek plně ovlivňují chování výrobní linky. Celá linka pracuje v taktu určeném pracovním cyklem úzkoprofilového aparátu. Při řízení víceproduktových výrob výskyt plovoucích úzkých profilů lze využít k jejich eliminaci vhodnými organizačními opatřeními. Kampaně produktů (várky stejného produktu vyráběné bezprostředně po sobě) by neměly dosahovat kritického počtu várek, kdy se plně projeví úzký profil linky. Výrobní plán by měl být sestaven tak, aby se přechodem na výrobu jiného produktu s jiným úzkým profilem nebo bez úzkého profilu zabránilo zablokování linky.

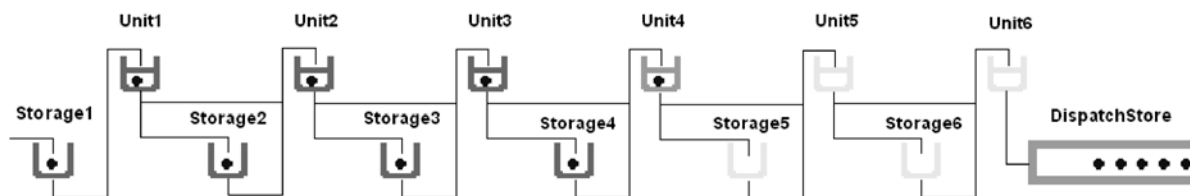
5 Identifikace úzkých profilů pomocí simulačních experimentů

Simulační experimenty a výpočty byly provedeny na modelovém příkladu sériové vářkové linky. Víceproduktová výrobní linka, na které se vyrábí osm různých produktů, se skládá ze šesti sériově řazených aparátů. Všechny aparáty až na koncové aparáty mají připojeny výstupní zásobníky, ve kterých mohou být dočasně skladovány meziprodukty. Tyto zásobníky mají kapacitu právě na skladování jediné várky. Za koncovým aparátem je umístěn expediční zásobník s dostatečnou kapacitou pro skladování všech vyrobených várek. Schéma výrobní linky je znázorněno na obr. 1, doby trvání operací jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Doby trvání operací víceproduktového vářkového procesu

Produkt	Doby trvání operací [h]					
	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

Na obr. 2 je zobrazen stav víceproduktového procesu v okamžiku vzniku globálního úzkého profilu po splnění silných podmínek. Všechny předcházející aparáty jsou zablokované (vyrobená várka v nich musí být dočasně skladována, protože ji nelze přesunout do následujících aparátů nebo zásobníků) a všechny předcházející zásobníky jsou plné. Všechny následující aparáty čekají na další várky a všechny následující mezioperační zásobníky jsou prázdné. V činnosti je pouze úzkoprofilová jednotka a právě na ní probíhá operace.



Obr. 2. Identifikace globální úzkoprofilové jednotky pomocí silných podmínek

Doby trvání výrobních operací (procesní časy) se u víceproduktové vářkové linky mohou výrazně lišit, což může způsobit vznik plovoucího úzkého profilu. V závislosti na vyráběném produktu se úzkým profilem může stát vždy jiný aparát, úzký profil se pohybuje podél linky. Možné přesuny úzkých profilů v závislosti na vyráběném profilu jsou ukázány v tabulce Tab. 2.

Tab. 2. Plovoucí úzký profil ve víceproduktové vářkové výrobě

Produkt	Jednotka	Čas [h]	Počet várek
P ₁	5	430	10
P ₂	6	452	15
P ₃	4	224	5
P ₄		úzký profil neidentifikován	
P ₅		úzký profil neidentifikován	
P ₆		úzký profil neidentifikován	
P ₇	6	369	6
P ₈		úzký profil neidentifikován	

6 Heuristický návrh krátkodobého výrobního plánu

Na základě výsledků analýzy vzniku úzkých profilů je možné sestavit několik heuristických pravidel pro návrh kvalitního krátkodobého výrobního plánu:

1. Počet várek stejného produktu vyráběných v jedné kampani v sérii po sobě by neměl překročit počet várek, který lze vyrobit, aniž by se projevil globální úzký profil.
2. Plán by měl začínat produktem, u kterého se úzký profil projeví nejpозději (na aparátu s vyšším pořadovým číslem nebo po větším počtu vyrobených várek).
3. Plán by měl končit produktem, u kterého se úzký profil projeví nejdříve (na aparátu s nižším pořadovým číslem nebo po menším počtu vyrobených várek).
4. Při přechodu na nový produkt by se měl podle možností vybírat produkt, u kterého vzniká úzký profil na aparátu nejvíce vzdáleném od aktuálního úzkého profilu.
5. Plán by měl minimalizovat počet přechodů, i když nejsou časově ani materiálově náročné.
6. Počet přechodů lze zvyšovat, dokud se snižuje doba trvání plánu. Pokud kampaně produktů se rozdělí novým přechodem mezi produkty na skupiny, pak v každé skupině by pořadí produktů mělo být zachováno.

Při tvorbě plánu podle těchto heuristických pravidel by výroba čtyř produktů P_1, P_2, P_3 a P_7 měla začínat kampaní produktu P_2 a končit kampaní produktu P_3 . Po produktu P_2 by se měly vzájemně střídát kampaně produktů P_1 a P_7 . Do střídání těchto kampaní je možné zahrnout i počáteční produkt, naopak koncový produkt by do střídání neměl být zahrnut. Produkty, které jsou z hlediska vytvoření možného úzkého profilu neutrální, je možné umístit kdekoli do výrobního plánu. Tyto produkty neovlivní vznik úzkých profilů, ale mohou zkrátit nebo prodloužit výrobní plán.

7 Možnosti vytváření výrobních plánů

Počty možných a přípustných plánů jsou dány počtem vyráběných produktů n , celkovým počtem plánovaných várek m a počty požadovaných várek vyráběných produktů m_1, m_2, \dots, m_n , $\sum_{i=1}^n m_i = m$. Počty možných plánů jsou dány vzorcem n^m a počty přípustných

plánů, které berou do úvahy požadované počty várek produktů, vzorcem $m! / \prod_{i=1}^n m_i!$.

Generování možných i přípustných plánů patří mezi NP-úplné problémy, jejich počty rostou enormním způsobem s počtem produktů a várek (viz Tab. 3).

Tab. 3. Závislosti počtu plánů na počtu produktů a várek

Počet produktů	Počet várek	Počet možných plánů	Počet várek produktu								Počet přípustných plánů
			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	
2	12	4 096			6					6	924
3	12	531 441	4		4					4	34 650
4	12	16 777 216	3	3	3					3	369 600
5	12	244 140 625	2	2	3	2				3	1 663 200
6	12	2 176 782 336	2	2	2	2	2			2	7 484 400
7	12	13 841 287 201	2	2	2	2	1	1		2	14 968 800
8	12	68 719 476 736	2	2	2	1	1	1	1	2	29 937 600
2	16	65 536			8					8	12 870
3	16	43 046 721	5		5					6	2 018 016
4	16	4 294 967 296	4	4	4					4	63 063 000
5	16	152 587 890 625	3	3	3	3				4	672 672 000
6	16	2 821 109 907 456	3	3	3	2	2			3	4 036 032 000
7	16	33 232 930 569 601	2	2	3	2	2	2		3	18 162 144 000
8	16	281 474 976 710 656	2	2	2	2	2	2	2	2	81 729 648 000

8 Simulační experimenty

Při sestavování krátkodobých výrobních plánů byly provedeny celkem tři skupiny simulačních experimentů. Ve všech experimentech se pomocí použitelných metod diskrétní optimalizace vyhledával optimální výrobní plán a srovnával se s výrobním plánem vytvářeným a postupně zlepšovaným pomocí heuristických pravidel uvedených výše. Cílem bylo sestavit co nejlepší výrobní plán pro výrobu celkem 16 várek postupně dvou, tří a čtyř produktů, které způsobovaly vznik plovoucích úzkých profilů (viz Tab. 2).

8.1 Plán pro výrobu 8 várek produktu P₃ a 8 várek produktu P₇

Po zpracování a sumarizaci požadavků zákazníků pro daný plánovací horizont je zapotřebí vyrobit celkem po osmi várkách produktů P₃ a P₇. Počet přípustných výrobních plánů je v tomto případě $\frac{(8+8)!}{8!8!} = 12870$. Výrobní plány, které začínají produktem P₇, by

podle druhého pravidla měly mít celkovou dobu výroby kratší než plány začínající produktem P₃. Maximální počet po sobě vyráběných várek produktu P₃ by neměl překročit hodnotu 5, zatímco pro produkt P₇ by limitní počet várek vyráběných v kampani měl být 6 (první pravidlo). Kvalitní plán by tedy měl začít výrobou 6 várek produktu P₇, pak se vyrobí 5 várek produktu P₃ a plán se dokončí výrobou 2 várek produktu P₇ a 3 várek produktu P₃ (viz Tab. 4). Celková doba trvání heuristicky sestaveného výrobního plánu je 534 h. Pravidlo č. 2 je významné – jestliže se neuvažuje, pak doba výroby stoupne na 606 h, tedy o 13,5 %. Jestliže výroba bude vzhledem k heuristickému plánu probíhat v opačném pořadí (stejný počet přechodů), doba trvání plánu stoupne až na 643 h, tedy o 20,5 %.

Tab. 4. Vliv druhého heuristického pravidla na délku krátkodobého výrobního plánu

Krátkodobý plán	Délka plánu [h]	Počet přechodů
P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃	534	3
P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇	606	3
P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇	643	3

Minimalizace počtu přechodů je pouze pomocným pravidlem pro návrh krátkodobého plánu. Klasický způsob návrhu plánu minimalizací počtu přechodů nemusí dávat nejlepší plán. Při návrhu plánu pomocí tohoto kritéria se může objevit paradoxní jev: minimální počet přechodů vede k horšímu plánu než maximální počet přechodů (viz tabulka Tab. 5).

Tab. 5. Paradoxní vliv počtu přechodů na délku výrobního plánu

Krátkodobý plán	Délka plánu	Počet přechodů
P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇ →P ₃ →P ₇	593	15
P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇	643	3
P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇	663	1

8.2 Rozbor heuristického výrobního plánu pro výrobu dvou produktů

Kvalitu krátkodobého výrobního plánu, který byl vytvořen na základě rozboru chování výrobní linky (identifikace úzkých profilů) a aplikace heuristických pravidel (eliminace úzkých profilů), je možné vyhodnotit pomocí analýzy výkonu výrobních i skladovacích jednotek. Přehled výsledků jejich analýzy je uveden v tabulce Tab. 6.

Tab. 6. Statistika výkonu výrobních a skladovacích jednotek

Aparát	Nečinný [%]	Aktivní [%]	Blokovaný [%]	Operace	Zásobník	Vstup	Várky [%]	Výstup	Prům. čas
Unit1	36,52	29,96	33,52	16	Storage1	16	100,00	16	18,38
Unit2	26,40	55,43	18,16	16	Storage2	15	93,75	15	23,80
Unit3	18,16	47,94	33,90	16	Storage3	15	93,75	15	23,07
Unit4	10,11	89,89	0,00	16	Storage4	15	93,75	15	28,60
Unit5	39,70	41,95	18,35	16	Storage5	4	25,00	4	10,50
Unit6	25,90	74,91	0,00	16	Storage6	12	75,00	12	22,33

Ze statistiky výkonu aparátů je zřejmé, že aparáty Unit4 a Unit6, které byly identifikovány jako úzké profily víceproduktové linky, nejsou vůbec blokovány, tedy výrobní plán byl navržen dobře. Přechody na výrobu jiného produktu byly určeny tak, že žádný z úzkých profilů se nemohl plně rozvinout a zablokovat výrobní linku. Využití mezioperačních zásobníků je až na zásobník Storage5 vysoké, je možné uvažovat o odstranění tohoto zásobníku. Doba trvání výroby podle heuristicky sestaveného plánu se pak prodlouží z 534 h na 556 h, tedy o 4,11 %. Změny ve výkonu jednotek jsou uvedeny v tabulce Tab. 7.

Tab. 7. Statistika výkonu výrobních a skladovacích jednotek po odstranění zásobníku č. 5

Aparát	Nečinný [%]	Aktivní [%]	Blokovaný [%]	Operace	Zásobník	Vstup	Várky [%]	Výstup	Prům. čas
Unit1	35,01	28,73	36,27	16	Storage1	16	100,00	16	19,81
Unit2	25,31	53,14	21,54	16	Storage2	15	93,75	15	25,33
Unit3	17,41	45,96	36,62	16	Storage3	15	93,75	15	24,60
Unit4	9,69	86,18	4,13	16	Storage4	15	93,75	15	30,13
Unit5	43,09	40,22	16,70	16	Storage5	0	0,00	0	0,00
Unit6	28,19	71,81	0,00	16	Storage6	11	68,75	11	23,45

Odstranění zásobníku Storage5 se projeví malým zablokováním aparátu Unit4, velikost blokování odpovídá prodloužení výrobního plánu. Pro takto změněnou výrobní linku je možné provést novou identifikaci úzkých profilů a navrhnout heuristický plán odpovídající změněné lince. Tuto změnu linky má smysl provést pouze tehdy, pokud úspory vynecháním jednoho zásobníku jsou vyšší než ztráty způsobené zmenšenou výkonností linky.

8.3 Optimalizace krátkodobého výrobního plánu pro výrobu dvou produktů

Při hledání optimálního krátkodobého výrobního plánu pro výše uvedený úkol (vyrobit celkem po osmi várkách produktů P_3 a P_7) byly použity čtyři metody diskrétní optimalizace:

1. úplná enumerace
2. náhodné vyhledávání
3. simulované žhání
4. metoda nejrychlejšího spádu

Počet možných výrobních plánů je celkem 12 870, optimálních plánů se stejnou hodnotou doby výroby je 594, výroba podle optimálního plánu trvá 534 h. Nejhorší nalezený plán $P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_3 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7 \rightarrow P_7$ je jediný s hodnotou doby výroby 663 h. Průměrná doba trvání výroby podle plánu je 585,91 h.

Průběh optimalizačních výpočtů závisí na počátečním pořadí výběru produktu pro jednotlivé várky (pravidlo č. 2). Metoda nejrychlejšího spádu našla optimální plán pouze pro počáteční pořadí výběru produktů $\{P_7, P_3\}$. Rychlé dosažení optimálního plánu pomocí metody náhodného vyhledávání (3 iterace) pro počáteční pořadí produktů $\{P_3, P_7\}$ je zřejmě šťastnou shodou okolností, nikoliv důsledkem mimořádné kvality metody. Aplikace heuristických pravidel návrhu vede přímo k jednomu z optimálních plánů. Výsledky optimalizace jsou přehledně uvedeny v tabulce Tab. 8.

Tab. 8. Srovnání metod hledání optimálního plánu

Optimalizační metoda	Počet iterací	
	{ P ₃ , P ₇ }	{ P ₇ , P ₃ }
úplná enumerace	7632	10
náhodné vyhledávání	3	6
simulované žihání	37	21
nejrychlejší spád	–	28
heuristická pravidla		1

8.4 Plán pro výrobu 6 várek produktu P₇ a 5 várek produktů P₃ a P₁

Po zpracování a sumarizaci požadavků zákazníků pro daný plánovací horizont je zapotřebí vyrobit celkem pět várek produktu P₁, pět várek P₃ a šest várek P₇. Počet přípustných výrobních plánů je v tomto případě $\frac{(5+5+6)!}{5!5!6!} = 2\,018\,016$. Heuristický výrobní

plán by opět měl začít produktem P₇ a skončit produktem P₃. Mezi kampaněmi těchto produktů by se měl opět v kampani vyrábět produkt P₁. Maximální počet po sobě vyráběných várek produktů P₃ a P₁ by neměl překročit hodnotu 5, zatímco pro produkt P₇ limitní počet várek vyráběných v kampani je 6 (první pravidlo). Tyto požadavky jsou splněny pro všechny tři produkty. Kvalitní plán by tedy měl začít výrobou 6 várek produktu P₇, pak se vyrobí 5 várek produktu P₁ a plán se dokončí výrobou 5 várek produktu P₃. Tento výchozí heuristický plán je možné se pokusit zlepšit vložení přechodu na výrobu produktu P₁ už po 5 várkách. Zbývá várka produktu P₇ se vyrobí až před posledním produktem P₃ (viz Tab. 9). Dalším vkládáním přechodů již není možné tento heuristický plán zlepšit. Takto vytvořený heuristický plán je jeden z možných optimálních plánů z hlediska minimalizace doby trvání výroby podle plánu.

Tab. 9. Postup sestavení a zlepšování heuristického výrobního plánu pro tři produkty

Krátkodobý plán	Délka plánu [h]	Počet přechodů
P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	536	2
P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	534	3
P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	534	4
P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₁ →P ₁ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	534	4

8.5 Optimalizace krátkodobého výrobního plánu pro výrobu tří produktů

Při hledání optimálního krátkodobého výrobního plánu pro výše uvedený úkol (vyrobit po pěti várkách produktů P₁ a P₃ a po šesti várkách produktu P₇) byly opět použity stejné čtyři metody diskrétní optimalizace.

Počet přípustných výrobních plánů je celkem 2 018 016, výroba podle optimálního plánu trvá 534 h. Vzhledem k obrovskému počtu přípustných plánů byl pro všechny metody omezen počet vyčíslení účelové funkce pomocí simulačních experimentů na 1000. Přehled dob trvání plánů, které optimalizační metody identifikovaly jako optimální, pro různé počáteční pořadí produktů je uveden v Tab. 10. Optimalizační metody při vyhledávání optimálního plánu pro tři produkty pracovaly ještě dostatečně spolehlivě.

Tab. 10. Výsledky optimalizace výrobního plánu pro různá pořadí produktů

Optimalizační metoda	Délka optimálního plánu pro různá pořadí produktů v plánu					
	{ P ₁ , P ₃ , P ₇ }	{ P ₁ , P ₇ , P ₃ }	{ P ₃ , P ₁ , P ₇ }	{ P ₃ , P ₇ , P ₁ }	{ P ₇ , P ₁ , P ₃ }	{ P ₇ , P ₃ , P ₁ }
úplná enumerace	548	535	581	563	534	534
náhodné hledání	534	534	534	534	534	534
simulované žihání	534	534	534	534	550	550
nejrychlejší spád	570	570	534	534	534	534

8.6 Plán pro výrobu produktů P₁, P₂, P₃ a P₇ po 4 várkách

Po zpracování a sumarizaci požadavků zákazníků pro daný plánovací horizont je zapotřebí vyrobit celkem po čtyřech várkách produktů P₁, P₂, P₃ a P₇. Počet přípustných výrobních plánů je v tomto případě $\frac{(4+4+4+4)!}{4!4!4!4!} = 63\,063\,000$. Heuristický výrobní plán by

měl v tomto případě začínat produktem P₂ a skončit produktem P₃. Mezi kampaněmi těchto produktů by se měly v kampaních vyrábět produkty P₁ a P₇. Počty várek stejného produktu vyráběných za sebou nedosahují ani pro jeden produkt limitního počtu. Kvalitní plán by tedy měl začít výrobou 4 várek produktu P₂, pak se vyrobí 4 várky produktu P₁ a 4 várky produktu P₇ a celý plán se dokončí výrobou 4 várek produktu P₃. Tento výchozí heuristický plán je možné se pokusit zlepšit postupným vkládáním přechodů na výrobu jiného produktu. Postup vkládání přechodů je uveden v Tab. 11. Dalším vkládáním přechodů již není možné tento heuristický plán zlepšit. Takto vytvořený heuristický plán je jeden z možných optimálních plánů z hlediska minimalizace doby trvání výroby podle plánu.

Tab. 11. Postup sestavení a zlepšování heuristického výrobního plánu pro čtyři produkty

Krátkodobý plán	Délka plánu [h]	Počet přechodů
P ₂ →P ₂ →P ₂ →P ₂ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	492	3
P ₂ →P ₂ →P ₂ →P ₁ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₇ →P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	479	6
P ₂ →P ₂ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₂ →P ₂ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	475	6
P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₂ →P ₂ →P ₁ →P ₁ →P ₇ →P ₇ →P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	467	9
P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₂ →P ₁ →P ₇ →P ₃ →P ₃ →P ₃ →P ₃	467	12

8.7 Optimalizace krátkodobého výrobního plánu pro výrobu čtyř produktů

Při hledání optimálního krátkodobého výrobního plánu pro úkol vyrobit po čtyřech várkách produktů P₁, P₂, P₃ a P₇ bylo možné použít spolehlivě jen metodu simulovaného žihání. Metoda nejrychlejšího spádu poskytovala daleko horší výsledky. Metody úplné enumerace a náhodného vyhledávání už nebylo možné vzhledem k obrovskému počtu možností vůbec použít.

Počet přípustných výrobních plánů je celkem 63 063 000, výroba podle nejlepšího nalezeného výrobního plánu trvala celkem 467 h. Vzhledem k obrovskému počtu přípustných plánů počet vyčíslení účelové funkce pomocí simulačních experimentů byl omezen na 1000. Přehled dob trvání plánů pro různá počáteční pořadí výběru produktů, které metody simulovaného žihání a nejrychlejšího spádu identifikovaly jako optimální, je uveden v Tab. 12. Největší odchylka od optimální hodnoty u metody simulovaného žihání je 4,5 %, u metody nejrychlejšího spádu je podstatně vyšší: 15,0 %. Horší je, že metoda simulovaného žihání našla skutečné optimum jen v 6 z 24 možných počátečních pořadí produktů, zatímco metoda nejrychlejšího spádu dokonce pouze v jediném případě. Úspěšnost optimalizačních metod silně závisí na počátečním pořadí výběru produktů. Pro větší počty vyráběných produktů není prakticky možné prověřovat všechny možnosti.

9 Závěry

Várkové procesy jsou vhodným způsobem výroby pro rozsáhlou skupinu chemických produktů od čistých chemikálií přes léčiva až po vonné látky a chuťové přísady. Operační časy stejných aparátů pro různé produkty vyráběné podle krátkodobého plánu pomocí víceproduktového procesu se mohou navzájem výrazně lišit. To způsobuje, že úzkým profilem pro různé produkty se stává vždy jiný aparát. V závislosti na vyráběném produktu se úzký profil může přesouvat podél linky. Změnou vyráběného produktu lze úzký profil přesouvat mezi aparáty. Přesun úzkého profilu musí být proveden dříve, než se úzký profil plně vyvine a začne ovlivňovat celkovou účinnost linky. Vhodnou organizací

víceproduktového várkového procesu pomocí krátkodobých nebo střednědobých výrobních plánů lze vzniku úzkého profilu zamezit a eliminovat jej.

Tab. 12. Výsledky optimalizace plánu pro čtyři produkty

Počáteční pořadí produktů	Simulované žihání		Nejrychlejší spád	
	Počet iterací	Optimální hodnota	Počet iterací	Optimální hodnota
{ P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₇ }	207	469	21	507
{ P ₁ , P ₂ , P ₇ , P ₃ }	59	469	85	472
{ P ₁ , P ₃ , P ₂ , P ₇ }	66	469	74	477
{ P ₁ , P ₃ , P ₇ , P ₂ }	61	469	45	469
{ P ₁ , P ₇ , P ₂ , P ₃ }	60	469	67	495
{ P ₁ , P ₇ , P ₃ , P ₂ }	75	482	22	537
{ P ₂ , P ₁ , P ₃ , P ₇ }	267	487	30	510
{ P ₂ , P ₁ , P ₇ , P ₃ }	321	472	32	474
{ P ₂ , P ₃ , P ₁ , P ₇ }	80	487	34	474
{ P ₂ , P ₃ , P ₇ , P ₁ }	63	487	33	474
{ P ₂ , P ₇ , P ₁ , P ₃ }	41	485	118	474
{ P ₂ , P ₇ , P ₃ , P ₁ }	999	488	46	507
{ P ₃ , P ₁ , P ₂ , P ₇ }	54	469	31	510
{ P ₃ , P ₁ , P ₇ , P ₂ }	86	469	30	500
{ P ₃ , P ₂ , P ₁ , P ₇ }	95	469	96	533
{ P ₃ , P ₂ , P ₇ , P ₁ }	97	467	2	515
{ P ₃ , P ₇ , P ₁ , P ₂ }	91	467	48	520
{ P ₃ , P ₇ , P ₂ , P ₁ }	85	467	2	512
{ P ₇ , P ₁ , P ₂ , P ₃ }	49	475	1	488
{ P ₇ , P ₁ , P ₃ , P ₂ }	491	483	30	500
{ P ₇ , P ₂ , P ₁ , P ₃ }	67	467	23	490
{ P ₇ , P ₂ , P ₃ , P ₁ }	335	483	1	500
{ P ₇ , P ₃ , P ₁ , P ₂ }	24	467	88	467
{ P ₇ , P ₃ , P ₂ , P ₁ }	68	467	35	500

Na základě znalostí o umístění plovoucích úzkých profilů pro různé produkty byl navržen soubor heuristických pravidel pro vytvoření kvalitního krátkodobého plánu. Jejich základním principem byl požadavek, aby se úzký profil výrobní linky nestačil plně rozvinout a změnou produktu se přesouval k jinému aparátu. Tato pravidla byla použita pro návrh a zlepšování plánů pro výrobu vždy 16 várek postupně dvou, tří a čtyř různých produktů.

Způsob identifikace úzkých profilů a návrhy vhodných výrobních plánů byl ukázán na příkladu sériové víceproduktové linky o šesti operacích, která vyrábí celkem osm různých produktů. Všechny experimenty byly prováděny na simulačním modelu várkové linky vytvořeném v prostředí simulátoru systémů diskrétních událostí Witness. Byl popsán jednoduchý postup zlepšování výrobních plánů štěpením kampaní produktů postupným vkládáním přechodů na výrobu jiného produktu. Navržené heuristické plány na výrobu celkem 16 várek postupně dvou, tří a čtyř produktů byly srovnány s optimálními výrobními plány nalezenými pomocí několika diskrétních optimalizačních metod. Použití heuristických pravidel je jednoduché, dobrý výrobní plán lze sestavit v několika krocích. Vytvořené heuristické plány jsou z hlediska doby trvání celého plánu srovnatelné s optimálními plány, ve studovaných případech se podařilo aplikací heuristických pravidel vytvořit dokonce optimální plány. Dále se ukázalo, že pro sestavení výrobního plánu pro větší počty várek a produktů diskrétní optimalizační metody buď nelze vůbec použít nebo jejich výsledky je nutné hodnotit velmi opatrně.

Poděkování

Tato práce byla vypracována za podpory výzkumného záměru č. MSM 6046137306 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

1. Hanta V.: *Optimum Configuration of Storage Bins in Batch Production*, *Automatizace* (2000) 43, 171–175.
 2. Peredo C. H. et al.: *Learning Witness*. Lanner Group. Houston, Texas, USA, 1998.
 3. Rippin D. W. T.: *Batch process systems engineering. A retrospective and prospective review*. *Computers Chem. Engng.*, 1993, 17, Suppl., S1–S13.
 4. 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.: +420-220 444 270, fax.: +420-220 445 053, 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.: +420-220 444 212, fax.: +420-220 445 053, e-mail: hantav@vscht.cz