

## MODELOVÁNÍ VÁRKOVÝCH CHEMICKO-TECHNOLOGICKÝCH APARÁTŮ

*Jan Vrzák, Vladimír Hanta*

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

**Klíčová slova:** víceproduktové várkové výroby, rozvrhování a krátkodobé plánování, systémy diskretních událostí, modelování a simulace, simulátor Witness

### 1 Úvod

Víceproduktové várkové procesy patří mezi často používané typy várkových chemických výrobních procesů. Lze je charakterizovat tím, že na skoro stejné výrobní lince se postupně vyrábí podobnými technologiemi několik podobných produktů. Výrobní proces se skládá z operací, jejichž posloupnost je pro všechny produkty skoro stejná (některé operace mohou být případně vynechány). Odpovídající operace pro různé produkty se navzájem liší jen fyzikálními a fyzikálně-chemickými parametry.

Při řízení víceproduktových várkových procesů základní postupy řízení jsou rozvrhování a lhůtové plánování. Při lhůtovém plánování není zapotřebí sledovat vlastní průběh výrobních operací, ale zejména jejich ukončení. Várkové procesy lze pak s výhodou modelovat jako systémy diskretních událostí. Důležitý je jen začátek a konec operace, nikoliv její průběh. K popisu operací pak postačuje jen několik jednoduchých integrálních charakteristik, které popisují časový průběh výrobních operací (operační časy, doby čištění, doby plnění nebo vyprazdňování aparátů atd.) nebo kapacitní parametry skladovacích a transportních zařízení (kapacita zásobníků, kapacita dopravníků apod.).

Výrobní jednotky pro zpracování várek se modelují jako stroje, které mohou provádět postupně jednu nebo více operací. Stroje jsou zásadně aktivní prvky modelu. Protože každá várka se zpracovává jako celek, je možné je modelovat jako části. Tyto části mohou do modelu vstupovat aktivně nebo jsou pasivní a do modelu vstupují jen podle požadavků strojů. Skladovací jednotky se modelují jako pasivní zásobníky, ve kterých jsou části pouze pasivně skladovány, případně tam mohou být zadrženy po určitou dobu.

### 2 Víceproduktové vsádkové výroby

Při tvorbě výrobních plánů pro víceproduktové várkové výroby je zapotřebí mít k dispozici model výroby dostatečně podrobný z hlediska plánování. Výrobní cyklus typické várkové výrobní jednotky lze rozčlenit na několik fází: seřízení, plnění, vlastní operace, vyprázdnění, pooperační a meziproduktové čištění. Seřízení jednotky se provádí obvykle při změně produktu, při něm jednotka neobsahuje žádnou várku. V průběhu plnění sdílí jednotka várku s předcházejícími a během vyprázdnění s následujícími jednotkami. Vlastní výrobní operaci lze zahájit, až jednotka obsahuje kompletní várku. Pooperační čištění (proplachování) se provádí po každém výrobním cyklu, zatímco meziproduktové čištění pouze před přechodem na výrobu jiného produktu.

Modelování výrobních operací je založeno na několika jednoduchých pravidlech, která popisují podmínky, za kterých mohou operace probíhat:

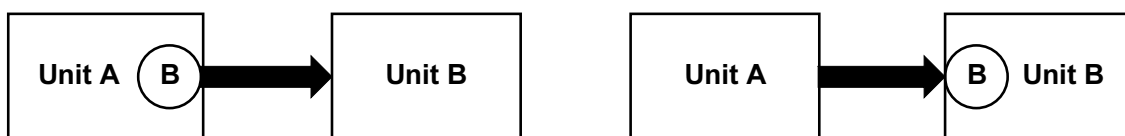
1. pohyb várek a pomocných (fiktivních) částí modelem je řízen pomocí vstupních a výstupních pravidel, která určují podmínky, za kterých mohou várky (části) do výrobní jednotky (aparátu) vstoupit nebo z něj vystoupit,

2. v aparátu mohou operace probíhat pouze tehdy, jestliže aparát obsahuje alespoň jednu část,
3. pokud aparát neobsahuje žádnou část, musí čekat, až bude mít nějakou část k dispozici,
4. jestliže aparát má provádět více operací, modeluje se jako stroj s více pracovními cykly,
5. jestliže aparát má provádět nějaké operace i poté, když várka z něj vystoupila, je zapotřebí použít fiktivní části, které pouze řídí činnost aparátů neobsahujících várky, případně jejich vzájemnou spolupráci,
6. při operacích seřízení, vyprázdnění, proplachování a čištění nesmí aparáty obsahovat reálné části reprezentující várky produktů,
7. várky vstupují do aparátů po jedné na začátku operace čištění,
8. při vzájemné synchronizaci aparátů, z nichž jeden má být seřízen, musí na druhém probíhat synchronizační fiktivní operace,
9. tato fiktivní operace pouze pozdrží várku, pokud není dokončeno seřízení následujícího aparátu.

## 2.1 Vstupní a výstupní pravidla

Vstupní a výstupní pravidla (obr. 1) popisují vzájemné propojení aktivních i pasivních simulačních prvků a řídí pohyb částí modelem. V modelu víceproduktového procesu se vždy přesouvá jedna část (vlastní várka produktu nebo fiktivní část zajišťující činnost aparátů, jejich vzájemnou spolupráci a synchronizaci některých operací). Pro sériovou víceproduktovou várkovou výrobu postačuje použití nejjednodušších vstupních a výstupních pravidel:

1. pravidlo WAIT (aparát pasivně čeká, dokud do něj nebo z něj není nějaká část přesunuta jiným aktivním aparátem),
2. pravidlo PUSH, pomocí kterého aparát přesouvá nějakou část do následujícího aparátu,
3. pravidlo PULL, pomocí kterého si aparát přesouvá nějakou část z předcházejícího aparátu.



Obr. 1. Princip vstupních a výstupních pravidel

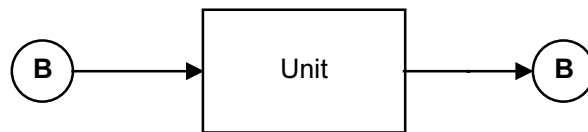
## 2.2 Zpracování várky a její členění

Při tvorbě nejjednoduššího modelu víceproduktového várkového procesu k jeho popisu postačují souhrnné doby zpracování várky na aparátech. Všechny ostatní časové údaje jsou zanedbatelné vůči nim a lze je do nich integrovat. Pro potřeby plánování víceproduktových procesů nemusí jednoduchý popis časového chování postačovat. Tato situace nastává zejména tehdy, jestliže je zapotřebí modelovat některé paralelní operace aparátů řazených za sebou v sériové lince. Proces zpracování várky pak je možné rozčlenit na tyto dílčí procesy:

1. seřízení prázdného aparátu (obvykle před přechodem na várku jiného produktu)
2. naplnění aparátu (přečerpávání nové várky),
3. vlastní výrobní operace (obvykle chemická reakce nebo separační proces),
4. vyprázdnění aparátu (odčerpání zpracované várky),
5. jednoduché pooperační čištění aparátu (propláchnutí)

#### 6. meziproduktové vyčištění aparátu (před přechodem na výrobu jiného produktu).

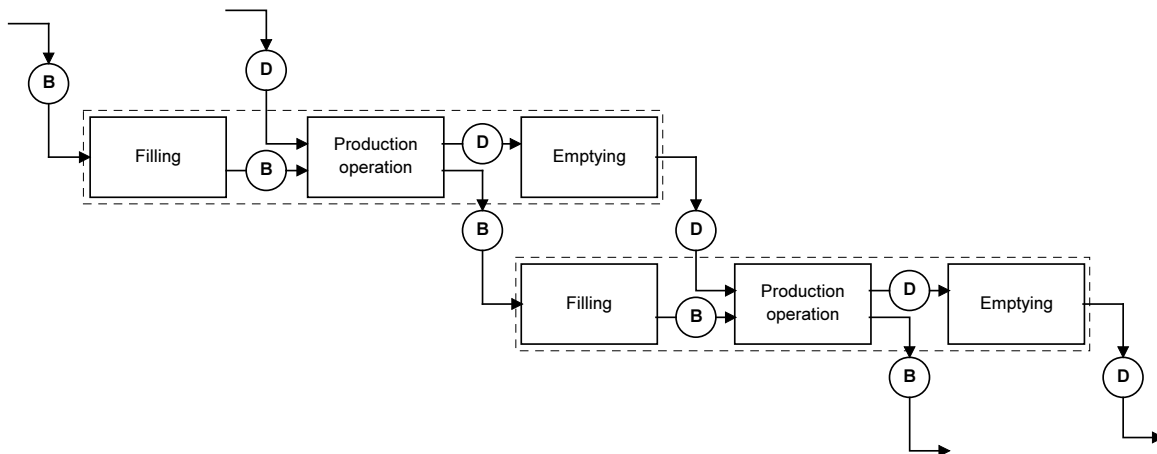
Jestliže při sestavování výrobních plánů pro víceproduktové várkové procesy postačuje integrovaná doba zpracování várky, pak se várkové procesy se modelují jako jednoduchá propojená síť aparátů (obr. 2). Způsob propojení je definován pomocí vstupních a výstupních pravidel simulačních prvků. Do doby zpracování várky musí být integrována i doba meziproduktového čištění. S touto integrací jsou spojeny určité problémy, protože meziproduktové čištění na rozdíl od zpracování várky je sekvenčně závislý proces (závisí nejen na zpracovaném produktu, ale i na produktu, který se bude zpracovávat jako další). Obvykle se nahrazuje průměrnou dobou čištění pro všechny kombinace zpracovaného produktu a možných dalších produktů nebo se použije náhodné generování této doby s rovnoměrným rozdělením.



Obr. 2. Základní model aparátu s integrovanou dobou zpracování várky

### 2.3 Modelování plnění a vyprazdňování aparátů

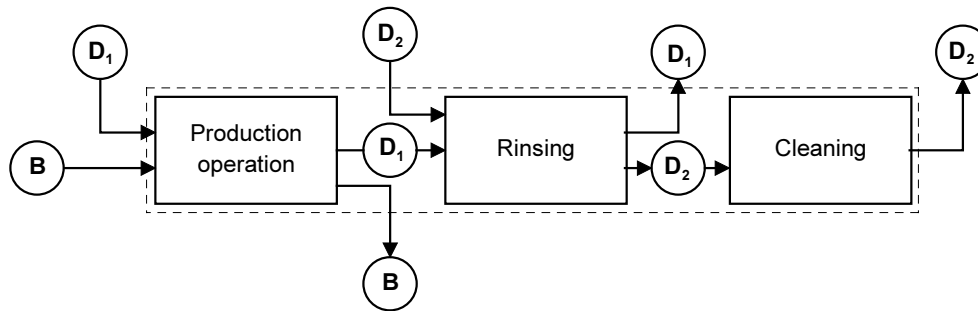
Pokud při modelování aparátů nelze zanedbat doby přečerpávání produktů mezi aparáty, je zapotřebí o tyto operace rozšířit model. Při přečerpávání meziproduktů musí být vzájemně koordinována činnost obou aparátů, mezi kterými se várka přesouvá: Aparát se může začít vyprazdňovat pouze tehdy, když je následující aparát volný. Po dobu přečerpávání meziproduktů nemohou oba aparáty provádět žádnou jinou činnost. Aparáty jsou modelovány jako vícestupňové stroje, jejich vzájemná spolupráce je řízena fiktivními částmi (obr. 3).



Obr. 3. Spolupráce a synchronizace aparátů při přečerpávání várek

### 2.4 Modelování pooperačního a meziproduktového čištění aparátů

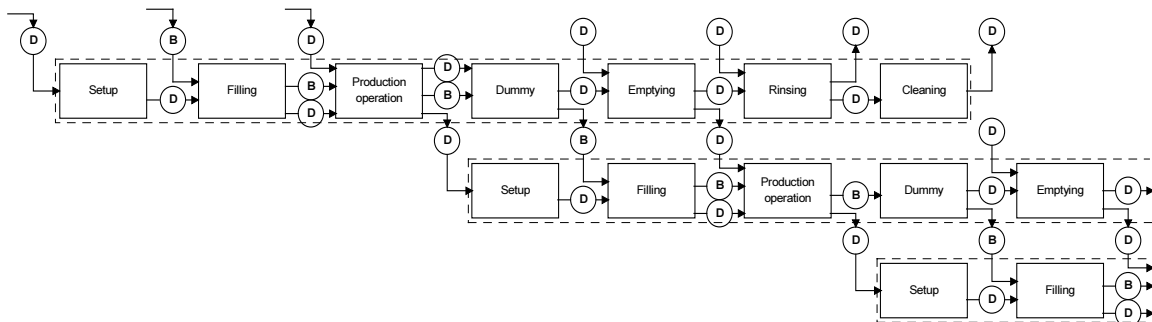
Po ukončení vlastní výrobní operace je várka přesunuta do následujícího aparátu (pokud je volný) a měl by následovat některý typ čištění, případně i oba. Protože prázdný aparát nemůže provádět žádné operace, musí být do něj včas přesunuty fiktivní části (obr. 4), které udrží aparát v činnosti i po přesunu várky. Pokud je zapotřebí koordinovat čištění s činnostmi jiných jednotek, pak se pro každý druh čištění použijí odlišné fiktivní části.



Obr. 4. Řízení aparátu pomocí fiktivních částí při modelování obou typů čištění

### 2.5 Modelování seřízení aparátu před přechodem na jiný produkt

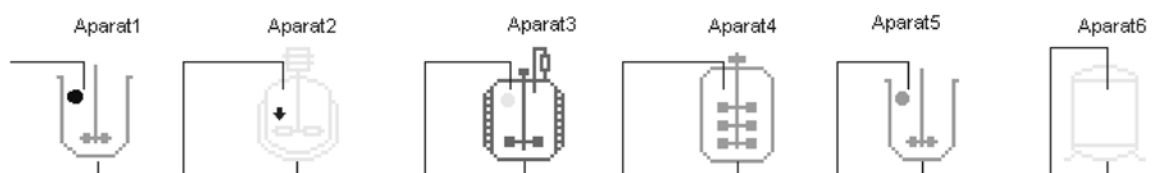
Seřízení aparátů před přechodem na zpracování várky jiného produktu je možné modelovat dvěma způsoby, které se liší v tom, zda se aparát seřizuje těsně po dokončení čisticích operací nebo až před načerpáním várky jiného produktu (častější případ) do aparátu. První způsob seřízení je z hlediska modelování jednodušší, seřízení se modeluje podobně jako operace čištění. Druhý způsob je složitější, pomocí fiktivní operace se musí zajistit synchronizace aparátů tak, aby se várka přečerpala do následujícího aparátu až po dokončení seřízení (obr. 5). Dokud není následující aparát seřízený, musí být várka dočasně skladována v aparátu, který ji zpracoval a zablokuje jej pro jinou činnost.



Obr. 5. Spolupráce a synchronizace všech dílčích operací

### 3 Porovnání modelů várkových aparátů

Simulační experimenty a výpočty byly provedeny na modelovém příkladu sériové várkové linky. Víceproduktová výrobní linka, na které se postupně vyrábí osm různých produktů, se skládá ze šesti sériově řazených aparátů. Za koncovým aparátem je umístěn expediční zásobník s dostatečnou kapacitou pro skladování všech vyrobených várek. Schéma výrobní linky je znázorněno na obr. 6.



Obr. 6. Schéma sériové víceproduktové várkové výrobní linky

V průběhu simulačních experimentů bylo postupně vytvořeno sedm modelů této víceproduktové výroby, ve kterých se postupně operace zpracování várky rozčleňovala na několik dílčích operací:

1. model č. 1: základní model – pouze jediná výrobní operace, která v sobě integrovala všechny dílčí fáze zpracování várky
2. model č. 2: plnění aparátu, výrobní operace, vyprázdnění aparátu
3. model č. 3: výrobní operace, meziproductové čištění
4. model č. 4: výrobní operace, pooperační propláchnutí, meziproductové čištění,
5. model č. 5: plnění, výrobní operace, vyprázdnění, meziproductové čištění,
6. model č. 6: plnění aparátu, výrobní operace, vyprázdnění, pooperační propláchnutí, meziproductové čištění,
7. model č. 7 seřízení aparátu, plnění aparátu, výrobní operace, vyprázdnění, pooperační propláchnutí, meziproductové čištění.

Výrobní plány byly sestaveny pro výrobu každého produktu vždy po jediné várce. Doby meziproductového čištění (sekvenčně orientované) byly do doby zpracování várky (není sekvenčně orientovaná) integrovány jako průměrné hodnoty všech možností. Průběhy výroby podle těchto plánů byly zachyceny pomocí Ganttových diagramů. K zobrazení dílčích operací procesu zpracování várek byly použity barevné kódy. Kromě provádění dílčích operací mohou aparáty nečinné (čekají na přísun materiálu) nebo zablokované (následující aparát provádí nějakou operaci a proto do něj nemůže být přesunuta zpracovaná várka). Barevné kódy stavů aparátů jsou přehledně uvedeny na obr. 7.

Idle	Grey	I
Setup	Cyan	S
Filling	Yellow	F
Operation	Green	O
Emptying	Brown	E
Blocking	Magenta	B
Rinsing	Blue	R
Cleaning	Red	C

Obr. 7. Barevné a znakové kódy stavů aparátů

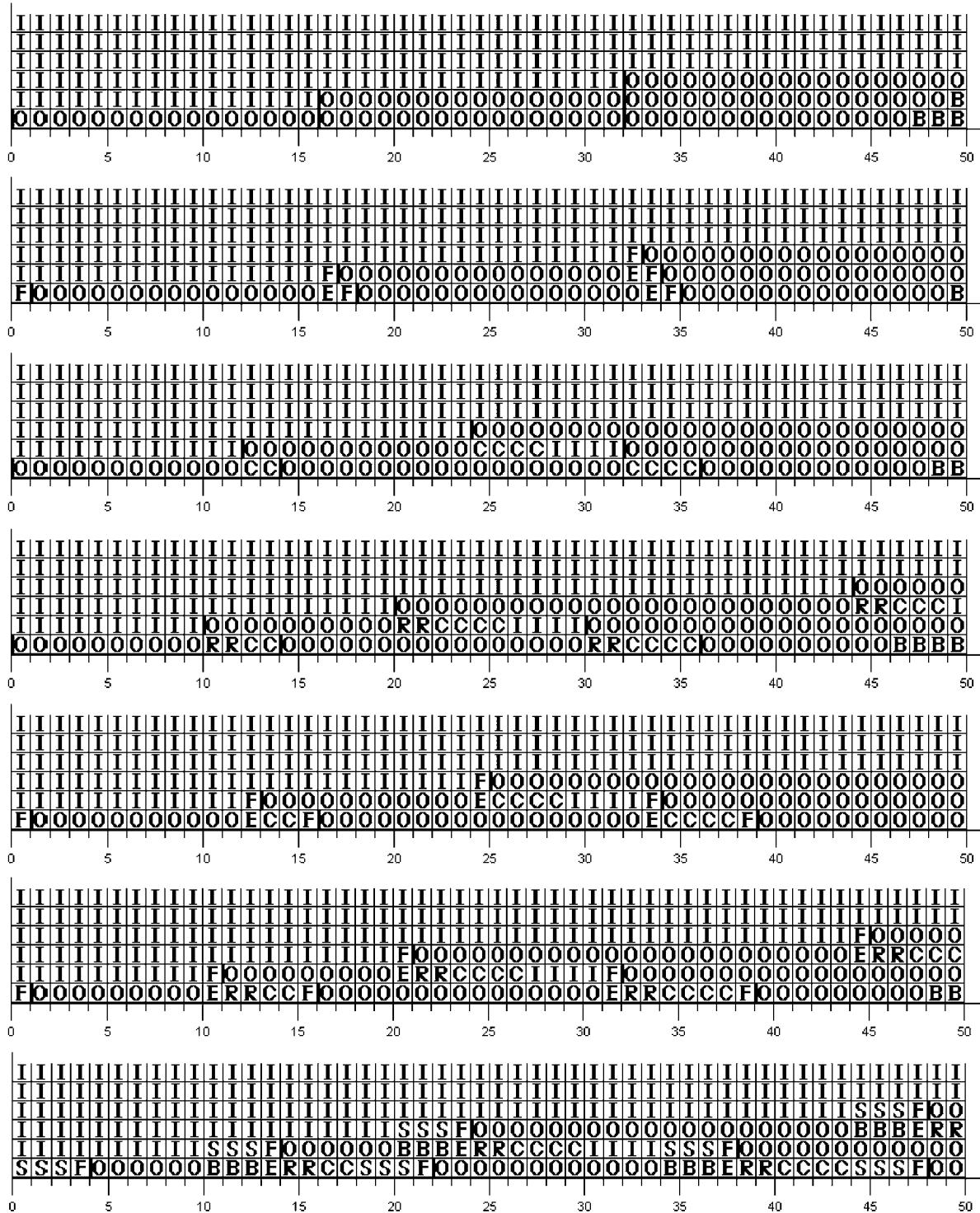
Pro každý model byl nalezen optimální výrobní plán. Ukázalo se, že optimální plány (pořadí výroby produktů) jsou určeny operací meziproductového čištění. Pro všech sedm modelů byly nalezeny pouze dva optimální plány v závislosti na tom, zda tato operace byla integrována jako nesequenční do jediné výrobní operace nebo zda se uplatnila samostatně jako sekvenčně orientovaná operace. S postupným členěním modelu výrobní operace docházelo vzhledem k nutné synchronizaci aparátů k prodlužování celkové doby výroby. Přehled optimálních plánů je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Přehled optimálních plánů pro různé modely víceproduktové linky

Model	Optimální plán	Doba výroby
1	$P_6 \rightarrow P_2 \rightarrow P_7 \rightarrow P_1 \rightarrow P_8 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_3$	392
2	$P_6 \rightarrow P_2 \rightarrow P_7 \rightarrow P_1 \rightarrow P_8 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_3$	400
3	$P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_7 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_8 \rightarrow P_6 \rightarrow P_3$	367
4	$P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_7 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_8 \rightarrow P_6 \rightarrow P_3$	357
5	$P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_7 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_8 \rightarrow P_6 \rightarrow P_3$	375
6	$P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_7 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_8 \rightarrow P_6 \rightarrow P_3$	365
7	$P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_7 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_8 \rightarrow P_6 \rightarrow P_3$	383

### 3.1 Průběh víceproduktového procesu pro různé modely výrobních operací

K zobrazení průběhu víceproduktového procesu je vhodné použít Ganttův graf, který přehledně zachycuje průběh výroby v čase. Lze jej vytvořit přímo jako součást modelu. Základní princip je využití vlastností vícenásobného zásobníku s definovanou maximální dobou zdržení, do kterého se ukládají části obarvené podle probíhajících výrobních operací (obr. 8). Vytvořený Ganttův diagram je dynamický graf, který se automaticky mění s postupem simulačního času. Zachycuje stavy aparátů víceproduktové linky indikované barevným kódem (řádky zdola nahoru odpovídají jednotkám Aparat1, Aparat2 atd.).



Obr. 8. Průběh prvních 50 hodin plánu pro různé modely

Při porovnání Ganttových diagramů prvních 50 hodin simulace plánu pro různé modely výrobních operací je možné vidět, jak operace, které vyžadující synchronizaci aparátů mohou urychlit nebo zpomalit simulovaný průběh výroby. Seřízení aparátu zablokuje přecházející aparát a zpomalí simulovaný plán, protože během seřizování nelze meziprodukt přečerpávat. Naopak přečerpání produktu do následujícího aparátu simulovaný plán urychlí, protože se tak aparát uvolní pro zpracování várky dalšího produktu.

#### 4 Závěr

Použití simulátoru systémů diskrétních událostí Witness k modelování, simulacím, analýze a optimalizaci víceproduktových várkových procesů přináší řadu výhod. Při tvorbě výrobních plánů pro víceproduktové várkové výroby je zapotřebí mít k dispozici model várkového procesu dostatečně podrobný z hlediska plánování. Simulační prvky se musí upravit tak, aby odpovídaly várkovým aparátům používaným ve várkových procesech. Na rozdíl od jiných typů výrobních procesů je ve várkovém chemickém procesu várka produktu v některých částech výrobního cyklu sdílena několika (obvykle dvěma) aparáty.

Jsou popsány různé možnosti modifikace modelů aparátů a operací tak, aby lépe popisovaly modelovanou realitu v závislosti na míře abstrakce při tvorbě modelu. Výrobní cyklus typického várkového aparátu lze rozčlenit na několik částí: seřízení, plnění, vlastní operace, vyprázdnění, pooperační a meziproduktové čištění. Seřízení jednotky se provádí obvykle při změně produktu, při něm jednotka neobsahuje žádnou várku. V průběhu plnění sdílí jednotka várku s předcházejícími a během vyprázdnění s následujícími jednotkami. Vlastní výrobní operaci lze zahájit, až jednotka obsahuje kompletní várku. Pooperační čištění se provádí po každém výrobním cyklu, zatímco meziproduktové čištění před přechodem na výrobu jiného produktu.

V příspěvku je ukázán způsob synchronizace aparátů při sdílení várek. Dále je popsán postup modelování operací, při kterých aparát nesmí obsahovat žádnou várku. Odpovídající simulační prvek však nesmí být prázdný, protože jinak nemůže požadovanou činnost provést, musí být do něj zavedeny fiktivní části. Postup zpřesňování modelu je demonstrován na příkladu víceproduktové várkové výrobní linky o šesti operacích, na které probíhá výroba osmi různých produktů podle výrobního plánu. Bylo vytvořeno sedm různých modelů várkové linky. Pro nalezené optimální plány bylo provedeno detailní porovnání jejich časových průběhů.

#### Poděkování

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

#### Literatura

1. Hanta V.: *Modelling and Simulation of Multiproduct Batch Processes as Discrete Event Systems*. In: Proc. of 38th Int. Conf. on Modelling and Simulation of Systems MOSIS '04, April 19–21, 2004, Rožnov pod Radhoštěm, 281–288.
2. Peredo, Carlos 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, Stewart: *Successful Simulation. A Practical Approach to Simulation Project*. 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