

MODEL VÁRKOVÉ LINKY NA VÝROBU CHLORIDU ŽELEZNATÉHO PRO FARMACEUTICKÉ ÚČELY

Vladimír Hanta

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

Klíčová slova: modelování a simulace, systémy diskretních událostí, simulační program Witness, chemické várkové výroby, výroba chloridu železnatého

1 Úvod

Velkotonážní linky pro výrobu chemických komodit jsou obvykle provozovány jako kontinuální výrobní zařízení, která už byla optimalizována přímo při návrhu. Naproti tomu výroba chemických specialit a léčiv probíhá várkovým způsobem. Várkové výrobní linky se obvykle budují ze standardizovaných univerzálních aparátů. Ve snaze redukovat investiční náklady se dražší aparáty používají opakovaně pro rozdílné technologické operace.

Tvorba simulačních modelů várkových výrobních linek jako systémů diskretních událostí je jednodušší než tvorba matematických modelů. Pro vyhodnocení možných alternativ nebo přímo pro optimalizaci výrobní linky lze s výhodou použít simulační programy. Metodologie intenzifikace složitějších várkových výrob pomocí modelování a následných simulačních experimentů je aplikována na výrobu chloridu železnatého pro farmaceutické účely. Z chemického hlediska není tato technologie složitá, je tvořena šesti výrobními stupni. Řada aparátů je však použita opakovaně, některé dokonce v různých výrobních stupních odlišným způsobem. To je důvod vzniku několika recyklů na lince, a proto se řízení této výroby stává složitým. Je možné navrhnout několik variant organizace výroby, které mohou zvýšit využití linky bez mimořádných investičních nákladů.

2 Počítačová simulace

Počítačová simulace [6, 3] je experimentální metoda analýzy reálného systému nebo procesu pomocí matematicko-logického modelu realizovaného pomocí výpočetní techniky. Moderní simulační programy [5] umožňují sestavovat modely a provádět simulační experimenty v plně vizualizovaném interaktivním prostředí s využitím rozsáhlé knihovny simulačních prvků. Vizualní interaktivní modelování a simulace se od tradičních numerických postupů liší zejména ze dvou hledisek:

- vizualizace: průběh simulace je animován pomocí 2D nebo dokonce 3D animace – na obrazovce se pohybují ikony simulačních prvků mezi různými pozicemi nebo po určených dráhách, mění se stavy prvků jsou reprezentovány barevným kódem, výsledky jsou průběžně zobrazovány pomocí dynamických tabulek a grafů,
- interaktivnost: modely se vytvářejí postupně tak, že korektnost dílčího modelu lze kdykoliv simulačně ověřovat, simulační běhy mohou být přerušeny, je možné opravit nebo změnit parametry prvků a vnitřní logiku modelu a pokračovat v přerušném simulačním běhu.

Tvorba simulačního modelu a práce s ním vyžaduje obvykle pouze zlomek nákladů experimentování na reálném objektu. Provozní a investiční náklady na další pracovníky a přídatná zařízení pro provedení reálných experimentů jsou vysoké. Alternativní reálné experimenty nemohou být často provedeny za stejných vnějších podmínek. Vyhodnocení, zda změna výsledků byla způsobena hlavně podmínkami experimentu nebo změnou neovlivnitelných vnějších podmínek, je obtížné. Reálný experiment probíhá vždy v reálném

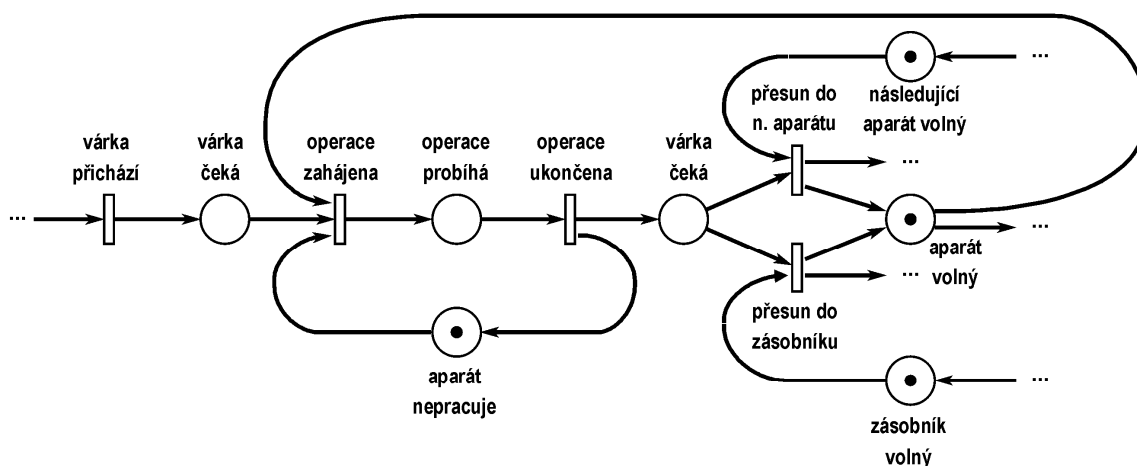
fyzikálním čase, simulační čas při experimentech může být významně urychlen, případně i zpomalen. Na modelu lze prověřit i různé situace a podmínky, které jsou na existujícím reálném objektu nemožné. Některé potřebné experimenty na existujícím zařízení nelze z různých důvodů provést.

3 Systémy diskretních událostí

Systémy diskretních událostí [1, 2] je možné stručně charakterizovat jako nedeterministické systémy, jejichž stavy se mění v závislosti na výskytu asynchronních a nedeterministických diskretních událostí, které popisují kvalitativní změny v systému. Stav systému je množina obecně nenumerických proměnných, které popisují systém v libovolném okamžiku a nabývají hodnot z konečné diskretní množiny. Události jsou okamžité situace, které mohou, ale nemusí měnit stavy systému. Mohou být samovolně vyvolané podstatou systému nebo vynucené jeho okolím. Aktivita (stroje) jsou aktivní prvky systémů diskretních událostí, které během své činnosti mění vlastnosti entit (částí) nebo stavy jiných aktivit (strojů). Činnosti (operace) jsou časové intervaly konečné délky, během kterých probíhá nějaký proces. Entity (části) jsou obvykle pasivní prvky, které vstupují do systému, procházejí systémem, přitom jsou modifikovány aktivitami (zpracovány stroji). Při průchodu systémem spotřebovávají zdroje a nakonec obvykle v pozmeněné formě ze systému vystupují. Zdroje (pracovní síly) jsou entitami spotřebovávány nebo používány. Diskretní simulační čas se nemění spojitě, ale přeskakuje od jedné diskretní události ke druhé. Při simulaci není podstatný vlastní průběh činnosti (operace), ale pouze diskretní události zahájení a ukončení operace. Během činnosti (operace) se mění jenom simulační čas. Simulační běhy jsou proto poměrně rychlé.

Chemické várkové výroby lze popsat jako systémy diskretních událostí. Každou diskretní událost (operace, čištění aparátu, skladování v mezioperačním zásobníku atd.) lze charakterizovat pomocí těchto údajů:

- množina podmínek, jejichž splnění je potřebné pro vznik diskretní události,
- doba trvání diskretní události,
- množina podmínek, které se změni dokončením diskretní události.



Obr. 1. Petriho síť modelující jednoduchou chemickou operaci

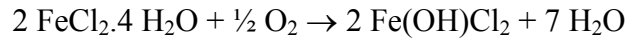
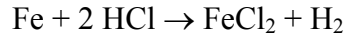
Chemickou výrobní operaci při výrobě nějakého produktu na vhodném aparátu lze modelovat jako diskretní událost, která nastane, jestliže všechny předcházející operace jsou dokončeny, aparát neprovádí žádnou operaci a současně není zablokován dočasným skladováním vyrobeného meziprojektu (obr. 1).

4 Várková výroba chloridu železnatého FeCl₂

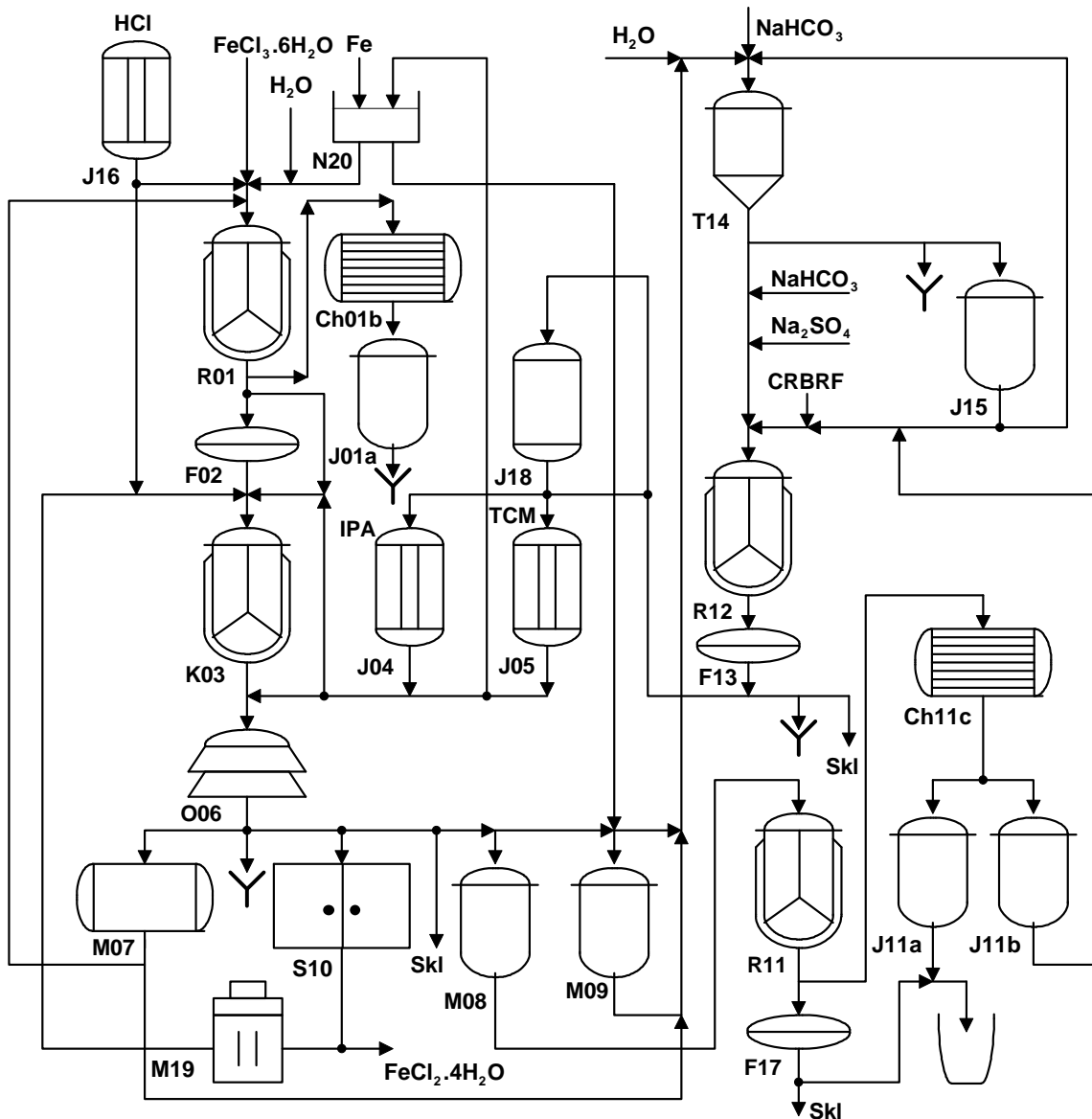
Várková výroba chloridu železnatého pro farmaceutické účely [7] je založená na redukcí chloridu železitého železem:



Souběžně probíhají dvě konkurenční vedlejší reakce:



Výroba vychází z krystalického hexahydrátu chloridu železitého, který se redukuje železem v prostředí kyseliny chlorovodíkové. Při výrobě se používají rozpouštědla isopropanol (IPA) a tetrachlórmetan (TCM) jako provozní chemikálie a během výroby se částečně regenerují. Celá technologie (obr. 2) se skládá ze šesti výrobních stupňů propojených zásobníky meziproduktů. Výrobní postup je tvořen 14 technologickými operacemi.



Obr. 2. Technologické schéma výroby chloridu železnatého

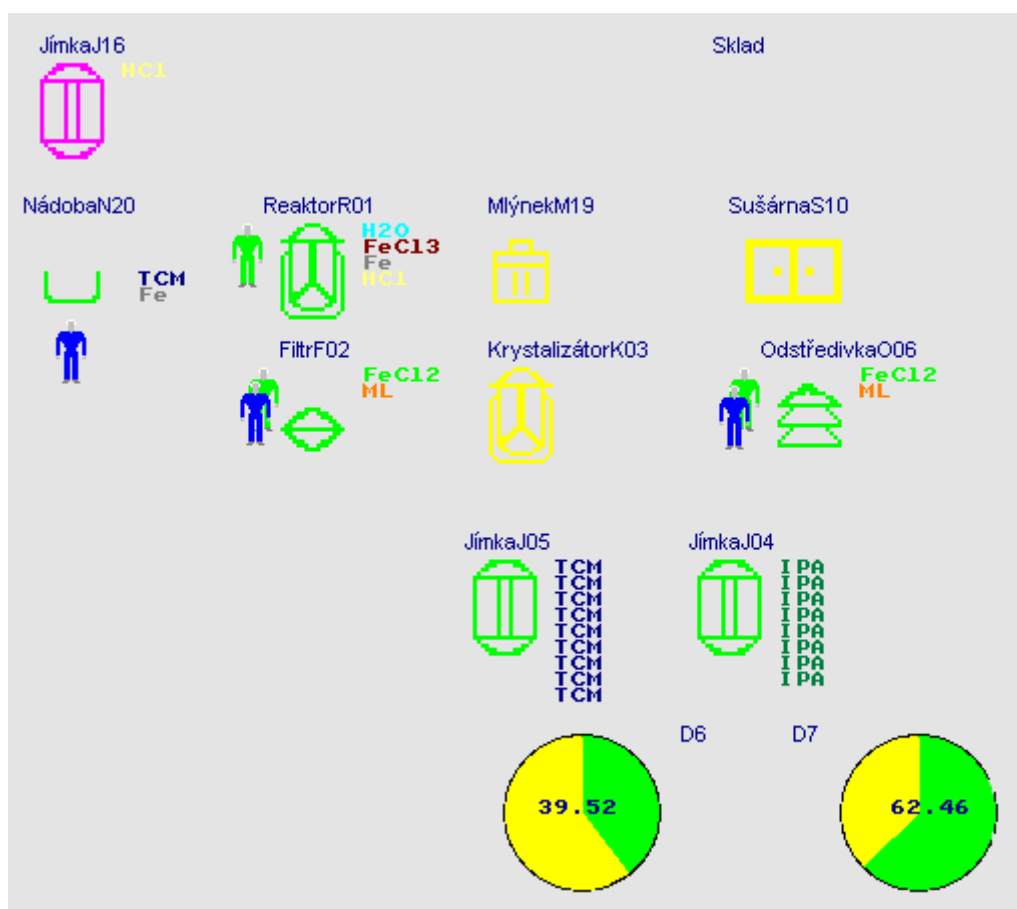
Výrobní linku tvoří 26 aparátů, některé z nich jsou aktivní. Zbylé jsou pasivní a slouží pouze ke skladování meziproductů. Seznam všech použitých aparátů a jejich symboly v technologickém schématu jsou uvedeny v tabulce Tab. 1. K zajištění činnosti výrobní linky je zapotřebí pracovní síly různých kvalifikací, technologický reglement rozlišuje dvě úrovně kvalifikace: kvalifikovaný chemik D7 a zaučený dělník D6.

Tab. 1. Použité aparáty a jejich symboly

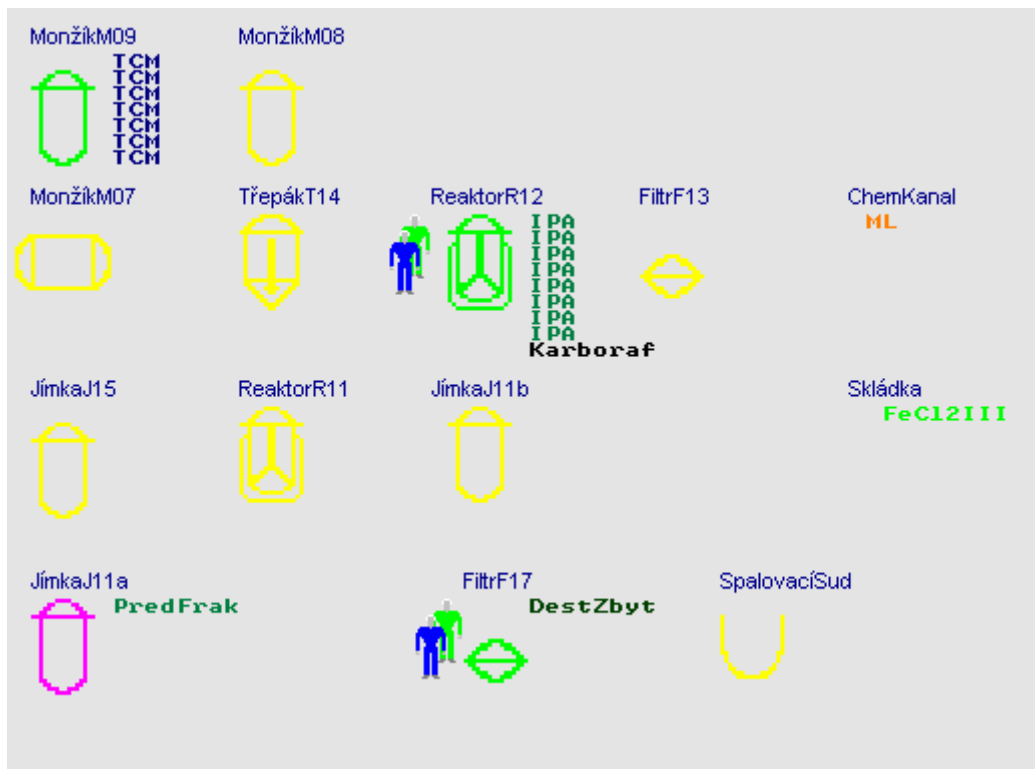
| Číslo | Symbol | Aparát | Číslo | Symbol | Aparát |
|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------------------|
| 1 | R01 | Reaktor | 11a | J11a | Jímka na destilát |
| 1a | J01a | Jímka na destilát | 11b | J11b | Jímka na destilát |
| 1b | Ch01b | Chladič | 11c | Ch11c | Chladič |
| 2 | F02 | Tlakový filtr | 12 | R12 | Reaktor |
| 3 | K03 | Krystalizátor | 13 | F13 | Tlakový filtr |
| 4 | J04 | Odměrná jímka | 14 | T14 | Třepák |
| 5 | J05 | Odměrná jímka | 15 | J15 | Jímka |
| 6 | O06 | Odstředivka | 16 | J16 | Odměrná jímka |
| 7 | M07 | Monžík | 17 | F17 | Tlakový filtr |
| 8 | M08 | Monžík | 18 | J18 | Zásobní jímka |
| 9 | M09 | Monžík | 19 | M19 | Mlýnek |
| 10 | S10 | Vakuová sušárna | 20 | N20 | Pomocná nádoba |
| 11 | R11 | Reaktor | | | Sud na spalování |

5 Simulační model linky pro výrobu chloridu železnatého

Výrobní linka pro výrobu farmaceutického chloridu železnatého je modelována jako systém diskretních událostí [4]. Simulační model se skládá ze tří částí: chemická část výrobní linky (obr. 3), regenerace isopropylalkoholu (obr. 4) a regenerace tetrachlormetanu (obr. 5).

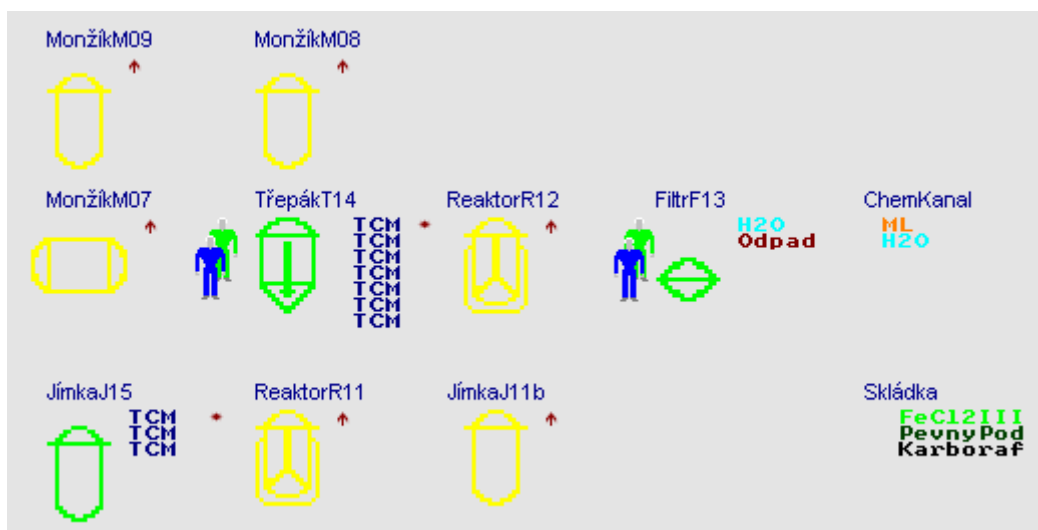


Obr. 3. Část modelu pro chemickou část výroby FeCl₂



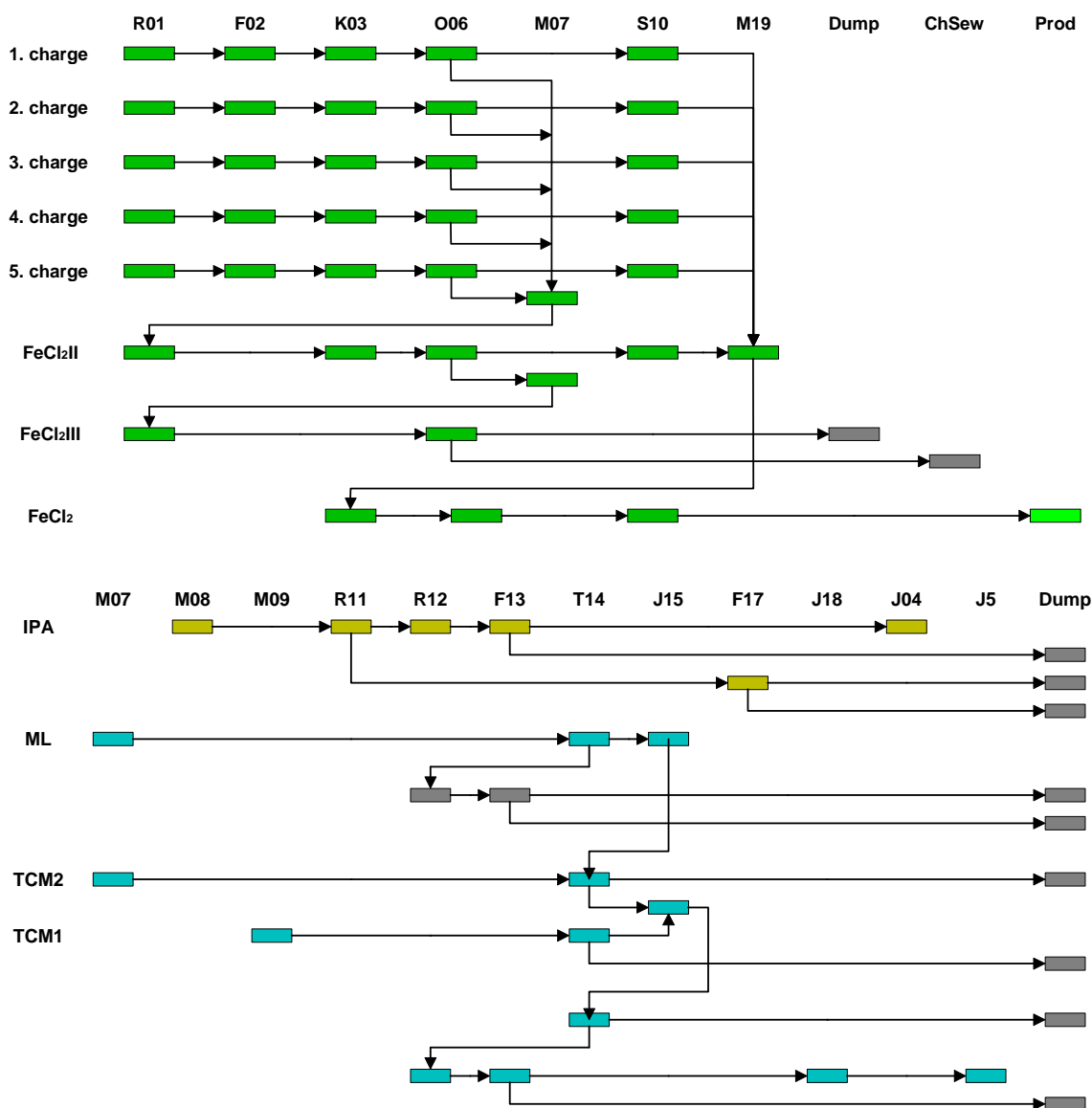
Obr. 4. Část modelu pro regeneraci isopropylalkoholu

V modelu jsou použity 2 typy aktivních částí a 12 typů pasivních částí jako modely surovin, rozpouštědel, pomocných látek, produktů a odpadů. Operace probíhají na 16 aktivních strojích (modely výrobních jednotek: reaktory, filtry, krystalizátor, odstředivka, vakuová sušárna, homogenizační mlýnek, třepák) a meziproducty jsou skladovány v celkem 12 zásobnících (jímky a monžíky). Některé zásobníky (odměrná jímka pro dávkování HCl, monžík pro shromažďování matečných louhů) musely být modelovány jako aktivní prvky. Obsluha linky byla modelována pomocí dvou typů pracovních sil s různou kvalifikací (chemik a dělník). Pro modelování směnného provozu byly použity 4 typy pracovních směn (směna PracTýden a 3 podsměny: PracDen, PracPátek, VolnýDen). Simulační model byl vytvořen v prostředí simulačního programu Witness 2008 [5].



Obr. 5. Část modelu pro regeneraci tetrachlormetanu

Simulační model má složitou vnitřní logiku, protože několik aparátů je použito opakovaně, některé z nich v různých výrobních stupních zcela odlišným způsobem. Proto na lince vzniká několik recyklů, kdy se produkty v různém stupni zpracování vrací do aparátu, který je už v předcházejících stupních zpracovával. Vnitřní logika modelu je řízena celočíselnými proměnnými popisujícími počet zpracovaných várek produktů a provozních chemikálií na aktivních aparátech. Složitě návaznosti operací a opakované využití výrobních a skladovacích jednotek jsou schematicky znázorněny na obr. 6.



Obr. 6. Návaznost operací a využití aparátů ve výrobě FeCl₂ a regeneraci IPA a TCM

Při simulačních experimentech se zjistilo, že v reglementu je porušeno několik požadavků při skladování a regeneraci promývacích rozpouštědel. Podle něj se měly skladovat všechny promývací várky tetrachlormetanu v monžíku M09 spolu s matečnými louhy a promývkami ze závěrečného čištění finálního produktu. Při regeneraci se však měly zpracovat finální promývky, finální matečné louhy a meziproductové promývky zpracovat zvlášť a měly se postupně spojovat až po částečném vyčištění.

Na základě rozboru simulačních experimentů byly navrženy úpravy technologického reglementu, které zajistily splnění požadavků na regeneraci tetrachlormetanu. Podle těchto úprav je k dočasnému skladování znečištěných a částečně vyčištěných tetrachlórmetanových promývek používán volný monžík M07 (viz obr. 5), který je jinak využíván jen v chemické

části výroby. Tak se dosáhne, že různě znečištěné promývky se spolu spojují postupně až po dostatečném vyčištění tak, jak to předepisuje reglement.

Složitou návaznost operací a opakované využívání stejných aparátů lze dokumentovat také přehlednou statistikou vytížení aparátů (Tab. 2), kde je uveden také počet operací, které proběhly na každém aparátu během výroby jedné várky finálního produktu. Skutečný počet operací je u některých aparátů vyšší, protože simulační program považuje operaci za dokončenou pouze tehdy, když proběhly všechny cykly této operace.

Tab. 2. Vytížení aparátů během výroby jedné várky

| Název | Nečinný | Aktivní | Blokován | Operace |
|------------------|---------|---------|----------|---------|
| ReaktorR01 | 55,11 | 42,05 | 1,70 | 5/7 |
| FiltrF02 | 70,45 | 28,41 | 0,00 | 5 |
| KrystalizátorK03 | 65,34 | 31,82 | 2,84 | 7 |
| OdstředivkaO06 | 50,00 | 26,14 | 23,86 | 7/8 |
| SušárnaS10 | 37,50 | 62,50 | 0,00 | 7 |
| ReaktorR12 | 95,45 | 4,55 | 0,00 | 3 |
| FiltrF13 | 92,61 | 7,39 | 0,00 | 3 |
| TřepákT14 | 91,48 | 8,52 | 0,00 | 4 |

V reaktoru R01 postupně proběhne 7 operací, z toho pětkrát Redukce a jedenkrát Matečné louhy I a jedenkrát Matečné louhy II. Jednotlivé operace se vzájemně liší (Tab. 3):

- počtem cyklů a dobou jejich trvání,
- počtem zpracovávaných várek surovin, provozních chemikálií a meziproductů,
- počtem potřebných pracovních sil
- předcházejícími a následujícími aparáty.

Tab. 3. Porovnání různých typů operací probíhajících v reaktoru R01

| Operace | Cyklus | Název | Čas | Operace | Název | Čas | Operace | Název | Čas |
|---------|--------|--------------------------|------|-----------------|----------------------|------|------------------|----------------------|-------|
| Redukce | 1 | Příprava surovin, násada | 60,0 | Matečné louhy I | Příprava, manipulace | 60,0 | Matečné louhy II | Příprava, manipulace | 60,0 |
| | 2 | Rozpouštění | 60,0 | | Destilace za vakua | 60,0 | | Destilace | 60,0 |
| | 3 | Přidání drátu, kyselení | 60,0 | | | | | Vychlazení | 180,0 |
| | 4 | Temperace | 60,0 | | | | | | |
| | 5 | Exotermní reakce | 60,0 | | | | | | |
| | 6 | Rozpouštění, ukončení | 60,0 | | | | | | |

Rozdílný počet cyklů pro různé operace probíhající postupně na stejných aparátech se řídí využitím vlastností simulačního prvku typu stroj. Stroj může činnost zahájit, pouze když má ve vstupním zásobníku potřebný počet částí. Naopak stroj ukončí svou činnost, jakmile neobsahuje žádnou část, kterou by mohl zpracovávat. Doby trvání cyklů, počty částí vstupujících, vytvořených nebo vystupujících v jednotlivých cyklech a počty potřebných pracovních sil je možné zadávat:

- pomocí funkce s pořadovým číslem zpracovávané várky jako jediným vstupním parametrem, která vrací potřebný údaj,
- pomocí matice, kde výsledek je prvek matice, jehož řádkový index je určen cyklem a sloupcový index operací.

Pružné propojení aparátů mezi sebou je řízeno pomocí rozvětvených vstupních a výstupních pravidel, ve kterých potřebná větev je určena pořadovým číslem zpracovávané várky.

Pracovní směny jsou modelovány pomocí simulačních prvků typu směna a jejich složek podsměn a period. Každá směna nebo podsměna se skládá z period, které mají tři části: čas práce, čas odpočinku a přesčas. Použitý soubor směn (jedna směna a tři podsměny) umožňuje realizaci všech systémů směn běžných v chemických várkových výroбах.

6 Určení potřebného počtu pracovních sil

Počet potřebných pracovních sil včetně jejich kvalifikace lze určit pomocí série simulačních experimentů, ve kterých se postupně mění počty pracovních sil. Pracovní síly s vyšším využitím jsou obvykle příčinou zablokování aparátů, protože nejsou v čase potřeby volně k dispozici. Technologický reglement požaduje dva různé typy pracovních sil:

- zaučeného dělníka, který vykonává méně kvalifikované a pomocné práce, případně pracuje pod dohledem,
- kvalifikovaného chemika, který je schopen provádět složitější práce včetně provozních analýz a případně řídí méně kvalifikovaného dělníka.

Nejprve se zjistila doba zpracování jedné várky ve stanoveném systému směn za předpokladu, že výroba nevyžaduje žádné pracovní síly. V případě čtyřsměnného provozu výroba jedné várky produktu včetně regenerace rozpouštědel a likvidace odpadu trvala celkem 5 280 minut, tedy 88 hodin. Po zavedení požadavků na pracovní síly podle reglementu pro minimální možný počet pracovních sil (1 chemik a 1 dělník) byly získány tyto výsledky (Tab. 4).

Tab. 4. Využití pracovních sil (1 dělník + 1 chemik)

| Typ | Aktivní | Nečinný | Počet | Úkoly | Doba |
|--------|---------|---------|-------|-------|------|
| Dělník | 74,92% | 25,08% | 1 | 88 | 9210 |
| Chemik | 94,46% | 5,54% | 1 | 106 | |

Pracovní vytížení chemika je mimořádně vysoké, je zřejmé, že tento typ pracovních sil je úzkým profilem, aparáty na něj musí čekat a tak chemik blokuje celou výrobní linku. V dalším simulačním experimentu se proto zvýší počet chemiků na dva (Tab. 5).

Tab. 5. Využití pracovních sil (1 dělník + 2 chemici)

| Typ | Aktivní | Nečinný | Počet | Úkoly | Doba |
|--------|---------|---------|-------|-------|------|
| Dělník | 95,04% | 4,96% | 1 | 88 | 7260 |
| Chemik | 59,92% | 40,08% | 2 | 106 | |

Po této změně se úzkým profilem blokujícím linky stal naopak dělník, proto se zvýší i počet dělníků o jednoho na dva (Tab. 6).

Tab. 6. Využití pracovních sil (2 dělníci + 2 chemici)

| Typ | Aktivní | Nečinný | Počet | Úkoly | Doba |
|--------|---------|---------|-------|-------|------|
| Dělník | 59,59% | 40,41% | 2 | 88 | 5790 |
| Chemik | 75,13% | 24,87% | 2 | 106 | |

Situace se opět změnila a blokujícím elementem se stal opět chemik. Počet chemiků se proto zvýší o jednoho na tři (Tab. 7).

Tab. 7. Využití pracovních sil (2 dělníci + 3 chemici)

| Typ | Aktivní | Nečinný | Počet | Úkoly | Doba |
|--------|---------|---------|-------|-------|------|
| Dělník | 63,19% | 36,81% | 2 | 88 | 5460 |
| Chemik | 53,11% | 46,89% | 3 | 106 | |

Vytížení obou typů pracovních sil se začíná vyrovnávat, současně se přibližuje doba výroby jedné várky hodnotě dosažené v situaci, kdy nebyly žádné požadavky na pracovní síly. Pro další experiment se zvětší počet dělníků na tři (Tab. 8).

Tab. 8. Využití pracovních sil (3 dělníci + 3 chemici)

| Typ | Aktivní | Nečinný | Počet | Úkoly | Doba |
|--------|---------|---------|-------|-------|------|
| Dělník | 43,56% | 56,44% | 3 | 88 | 5280 |
| Chemik | 54,92% | 45,08% | 3 | 106 | |

Bylo dosaženo stavu, kdy pracovní síly přestaly být úzkým profilem. Samozřejmě při reálném ověřování se musí vzít do úvahy náklady na pracovní síly a musí se vyhodnotit zisk vzniklý zvýšením produktivity výrobní linky. Podobným simulačním experimentováním lze zjistit vliv směnnosti na produktivitu výroby. Základní typy pracovních směn zabudované do modelu (pracovní týden, pracovní den, pátek a volný den) postačují k modelování nejdůležitějších používaných systémů organizace pracovních směn.

7 Závěry

Tvorba simulačních modelů v prostředí moderních simulačních programů a následné experimenty s cílem zlepšit efektivitu výrobních linek jsou účinné nástroje zlepšování výrobních procesů. Model výrobního procesu jako systému diskretních událostí v prostředí simulátoru Witness má proti vyšetřování klasického matematického modelu celou řadu předností. Během krátké doby lze vyhodnotit množství různých alternativ nastavení parametrů zkoumaného procesu, identifikovat úzká místa procesu, testovat varianty změn procesu a vyhodnotit jejich dopady na průběh procesu. Na modelu lze také poměrně jednoduše prověřit i takové alternativy řešení, které zatím není možné nebo je příliš nákladné realizovat. Rozborem automaticky generovaných sestav lze získat důležité informace, které umožňují zlepšit parametry zkoumaného procesu a zvýšit jeho efektivitu.

Byl vytvořen simulační model várkové výroby chloridu železnatého pro farmaceutické účely. Z chemického hlediska není tato technologie složitá, je tvořena 6 výrobními stupni. Vzhledem k omezenému vybavení výroby musí být některé unifikované standardní aparáty použity opakovaně, navíc v různých výrobních stupních zcela odlišným způsobem. Na výrobní lince vzniká několik recyklů a tak se organizace a řízení výroby stává složitým. Nejprve bylo nutné ověřit reálnost navrženého technologického reglementu a získat účinný nástroj pro zlepšení návaznosti operací a jejich časování tak, aby zvýšilo využití výrobní linky. Na základě simulačních experimentů byly navrženy úpravy technologického reglementu s cílem dodržet požadavky na regeneraci provozních chemikálií obvyklých ve farmaceutické výrobě. Dále je možné navrhnout několik jednoduchých variant řazení operací, které mohou zvýšit produkci bez mimořádných investičních nákladů. Do modelu byl zaveden kalendářní čas, protože várkové výroby se obvykle provozují ve dvousměnném a třisměnném pracovním systému. To umožnilo sledování využití pracovních sil na výrobní lince, protože mzdové náklady představují výraznou část výrobních nákladů.

Poděkování

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

Literatura

1. Banks J., Carson II J. S., Nelson B. L., Nicol D. M.: Discrete-Event System Simulation. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005
2. Cassandras Ch. G., Lafortune S.: Introduction to Discrete Event Systems. Springer, New York, 2008.

3. Hanta, V. 2005. Computer Simulation as an Effective Tool for Improving Production Processes. In: Proceedings of 39th International Conference Modelling and Simulation of Systems MOSIS '05, Rožnov pod Radhoštěm, Czech Republic, April 19 – 21, 2005. Ostrava: MARQ., Jan Štefan, 2005. s. 281-288. ISBN 80-85988-98-4.
4. Hanta V., Poživil J.: Modelling of the Ferrous Chloride Production Line as a Discrete Event System. Proc. of the 35th Int. Conference SSCHE '08, Tatranské Matliare, Slovakia, 26.-30.5.2008, CD ROM 063p(1-7). ISBN 978-80-227-2903-1
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.
7. Předpis na výrobu chloridu železnatého pro farmaceutické účely. VÚFB Praha, 1994.

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