

## PŮVODNÍ A METODICKÉ PRÁCE

### VYUŽITÍ DYNAMICKÉ SIMULACE PŘI PLÁNOVÁNÍ A ROZVRHOVÁNÍ V DODAVATELSKÉM ŘETĚZCI TĚŽBY A ZPRACOVÁNÍ ROPY

JAKUB DYNTAR<sup>a</sup>, JAN LACHMAN<sup>a</sup>, ANNA MENČÍKOVÁ<sup>a</sup> a MAREK BOTEK<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Katedra podnikové ekonomiky a managementu, Technická univerzita Liberec, Voroněžská 13, 460 01 Liberec,

<sup>b</sup> Ústav ekonomiky a managementu, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha  
botekm@vscht.cz

Došlo 22.7.20, přijato 6.10.20.

Klíčová slova: ropa, plánování, rozvrhování, dynamická simulace, podnikový informační systém, supply chain management

#### Úvod

Dodavatelský řetězec těžby a zpracování ropy (COSC) patří mezi nejvýznamnější a nejkompaktnější dodavatelské řetězce v chemickém průmyslu (viz obr. 1).

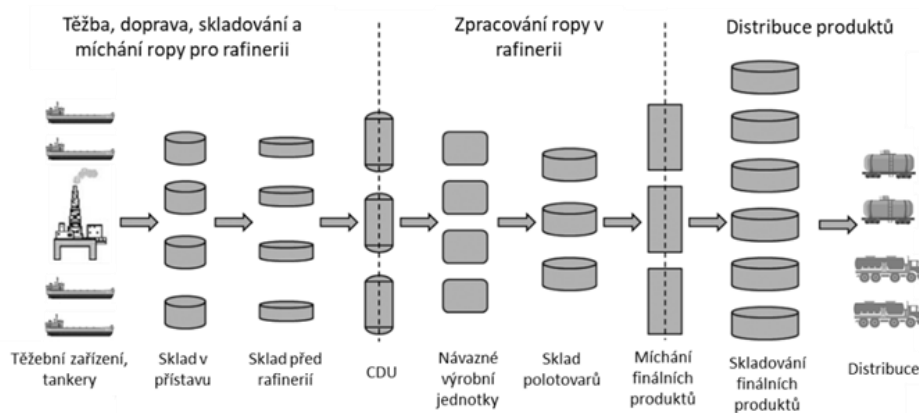
Produkty rafinerií představují důležité vstupy mnoha zpracovatelských odvětví, jsou významným zdrojem energie pro domácnosti či v dopravě. Globální konkurence a tlak na dodržování stále přísnějších environmentálních pravidel vedou organizace zahrnuté v COSC (v Česku např. Čepro, Mero či Unipetrol) k hledání příležitostí vedoucích k růstu provozní efektivity. To spočívá nejen

v integraci základních podnikových funkcí (nákup, výroba, distribuce a realizace zpětných toků) uvnitř podniku, ale také ve spolupráci s partnery v COSC založené na sdílení informací a společném plánování a rozvrhování materiálových toků. Hovoří se o enterprise-wide optimalizaci<sup>1</sup> jako součásti supply chain managementu<sup>2</sup>. V literatuře jsou pro enterprise-wide optimalizaci v COSC vymezeny tři základní oblasti výzkumu týkající se plánování a rozvrhování<sup>3</sup>:

- zásobování rafinerií ropou včetně skladování a míchání směsí,
- zpracování ropy v rafineriích a míchání finálních produktů,
- distribuce finálních produktů k zákazníkům.

Efektivní plánování a rozvrhování patří mezi podnikové činnosti, které v současném konkurenčním podnikatelském prostředí přináší významný ekonomický efekt. Plánování je již běžnou součástí systémů Enterprise Resource Planning (ERP) podniků (viz obr. 2) ve většině průmyslových odvětví a poskytuje odpovědi na otázky související zejména s ekonomikou podniku a potřebou materiálových vstupů v delším časovém horizontu<sup>4</sup>. Standardně jsou při sestavování plánů v rámci ERP využívány techniky lineárního programování (LP), které zajišťují nalezení kvalitního řešení v rozumném čase<sup>5</sup>. Pro COSC jsou v současnosti na trhu k dispozici kvalitní softwarová řešení pro podporu plánování, jako je např. Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS) od firmy Honeywell<sup>6</sup> nebo Process Industry Modeling System (PIMS) od Aspen Technology<sup>7</sup>.

Rozvrhování je zaměřeno na vytváření sekvencí a časování úkolů a přiřazování zdrojů nutných k jejich realizaci v relativně krátkém časovém horizontu tak, aby byla zajištěna proveditelnost plánu<sup>8</sup>. Obtížnost rozvrhování v COSC spočívá v komplexnosti, neboť úkolů a zdrojů je obvykle velké množství a popis vztahů mezi nimi vyžaduje zapojení celočíselných a binárních proměnných či jde dokonce o vztahy nelineární. Od úloh lineárního progra-



Obr. 1. Dodavatelský řetězec těžby a zpracování ropy



Obr. 2. Plánování, rozvrhování a operativní řízení v COSC z pohledu informačního systému podniku; upraveno dle cit.<sup>3</sup>

mování charakteristických pro plánování dochází k posunu k úlohám smíšeného lineárního (MILP) či smíšeného nelineárního programování (MINLP) tj. úlohám, u kterých nelze nalézt řešení buď vůbec či v rozumném čase, nebo nelze zajistit, že řešení je dostatečně kvalitní<sup>9</sup>. Rozvrhování v COSC také vyžaduje rozhodnutí o způsobu vnímání času a způsobu nakládání s materiálovým tokem (diskrétní vs. spojitý přístup), což opět značně ovlivňuje rychlost výpočtu a kvalitu řešení<sup>10–13</sup>. Uvedené problémy vedou v praxi k tomu, že rozvrhování v COSC probíhá často pouze v rámci jednoho podniku bez možnosti získání efektů vyplývajících z integrace celého dodavatelského řetězce a že podniky rozvrhují na základě zkušeností plánovačů bez podpory MES a APS systémů, jejichž nabídka na trhu je pro tento obor omezená<sup>14</sup>.

Alternativu k plánování a rozvrhování pomocí optimalizačních modelů na bázi matematického programování představuje dynamická simulace. Simulace je proces tvorby logicko-matematického modelu reálného objektu, systému na něm definovaného nebo procesu rozhodování a realizace velkého množství experimentů s ním, jejichž cílem je popis systému, poznání jeho funkce a odhad jeho budoucího chování<sup>15</sup>. Výhodou simulace je možnost prověřit velké množství variant uspořádání systému ještě před vynaložením zdrojů na samotnou realizaci<sup>16</sup>. To je nutné zejména v případech existence rizika spojeného s plánováním rozsáhlých investic s relativně dlouhou návratností. V COSC jde především o investice do výrobní, dopravní a skladovací infrastruktury.

Cílem tohoto článku je popsat využití dynamické simulace při plánování a rozvrhování čerpání ropy v systému tvořeném třemi rafineriemi a dvěma tankovišti s nádržemi na skladování ropy, do kterých přitéká ropa ze tří ropovodů. Simulační model systému byl vytvořen v prostředí softwaru pro diskrétní dynamickou simulaci Witness 14 s podporou MS Excel 16 pro import vstupních dat a export a úpravu výstupů a vychází z obecného simulačního modelu materiálových toků v dodavatelských systémech<sup>17</sup>. Ten je založen na předpokladu, že jakýkoli materiálový tok v dodavatelském systému lze rozložit do konečného počtu pohybů, přičemž realizace pohybu může vyžadovat využití nějakého zdroje a splnění nějakých podmínek. Na výstupech z modelu diskutujeme možnosti využití simulace pro plánování, rozvrhování a operativní říze-

ní v COSC a srovnáváme výhody a nevýhody navrženého řešení s metodami matematického programování.

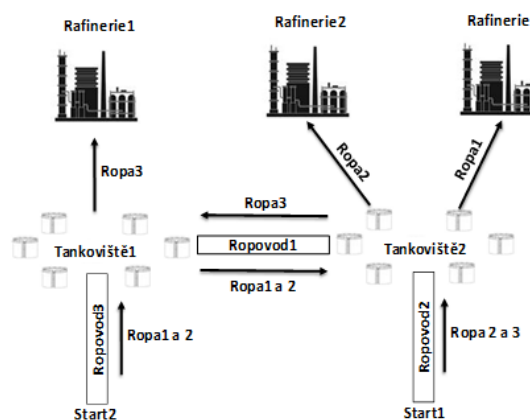
## Experimentální část

Strukturu modelovaného systému zachycuje obr. 3. Jedná se o existující strukturu reálného podniku, který si nepřál zveřejnit své jméno. Po dohodě s podnikem byl pro účely publikace modelovaný systém zjednodušen o zanedbání směsných sloupců a vynechání procesu přípravy směsi pro rafinerie v tankovištích. Systém tvoří dvě tankoviště, ve kterých jsou umístěny nádrže na skladování ropy, tři ropovody, které zásobují tankoviště třemi typy ropy s odlišným složením a tři rafinerie, které odebírají ropy z nádrží v tankovištích. Rafinerie 2 plánuje zpracovat 515 000 m<sup>3</sup> ropy za měsíc, rafinerie 3 zpracuje 325 000 m<sup>3</sup> ropy za měsíc. Cílem je naplánovat, jaké maximální množství ropy za měsíc dokáže zpracovat rafinerie 1, zjistit jaký minimální počet nových nádrží na skladování ropy a s jakou kapacitou bude třeba umístit do tankovišť a jakým způsobem rozvrhnout čerpání ropy mezi tankovišti a rafineriemi, aby byl plán proveditelný. Maximální kapacita nové nádrže na skladování ropy v tankovišti 1 je 68 000 m<sup>3</sup>, v tankovišti 2 pak 111 400 m<sup>3</sup>. Maximální výkon čerpání ropovodem 1 je 1400 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, ropovodem 2 je 820 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a ropovodem 3 pak 6400 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Maximální výkon čerpání do rafinerie 1 je 1400 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, do rafinerie 2 je 820 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a do rafinerie 3 pak 900 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Při čerpání ropy do nebo z nádrží musí platit následující podmínky:

1. V nádrži nesmí dojít ke smíchání různých typů ropy.
2. Ropa do nádrže může být v jednom okamžiku čerpána pouze z 1 ropovodu.
3. Ropa z nádrže může být v 1 okamžiku čerpána pouze do 1 rafinerie.
4. Do nebo z nádrže může v 1 okamžiku ropa buď přitékat, nebo odtékat.

Z pohledu obecného simulačního modelu materiálových toků v dodavatelských systémech existují v logice modelovaného systému popsáném na obr. 3 dva typy pohybů:



Obr. 3. Struktura modelovaného systému; upraveno dle cit.<sup>8</sup>

Tabulka I  
Pohyby v modelovaném systému

Pohyb	Popis
1	Tankoviště 1→Ropovod 1→Tankoviště 2
2	Tankoviště 2→Ropovod 1→Tankoviště 1
3	Start 1→Ropovod 2→Tankoviště 2
4	Start 2→Ropovod 3→Tankoviště 1
5	Tankoviště 2→Rafinerie 3
6	Tankoviště 2→Rafinerie 2
7	Tankoviště 1→Rafinerie 1

1. čerpání určitého množství ropy do ropovodu,
2. čerpání určitého množství ropy do rafinerie.

Jelikož ropovody jsou v každém okamžiku plné ropy, vyžaduje realizace čerpání určitého množství ropy do ropovodu (tj. typ pohybu 1) místo v nádrži umístěné v tankovišti (tj. zdroj), které zaplní ropa z ropovodu vytlačena. V případě, že místem, odkud je třeba do ropovodu čerpat, je nádrž umístěná v tankovišti, musí být v nádrži k dispozici požadovaný typ ropy v požadovaném množství, v momentě, kdy je třeba zahájit čerpání. Je-li místem, odkud se bude do ropovodu čerpat, začátek ropovodu označený Start 1 a Start 2 (obr. 3) platí, že požadovaný typ ropy v požadovaném množství je v momentě, kdy bude zahájeno čerpání k dispozici vždy a že po zahájení čerpání ropy do ropovodu bude stejný typ ropy ve stejném množství vytékat i do nádrže v tankovišti. V případě čerpání určitého množství ropy do rafinerie (tj. typ pohybu 2), předpokládáme, že rafinerie ropy vždy odebere.

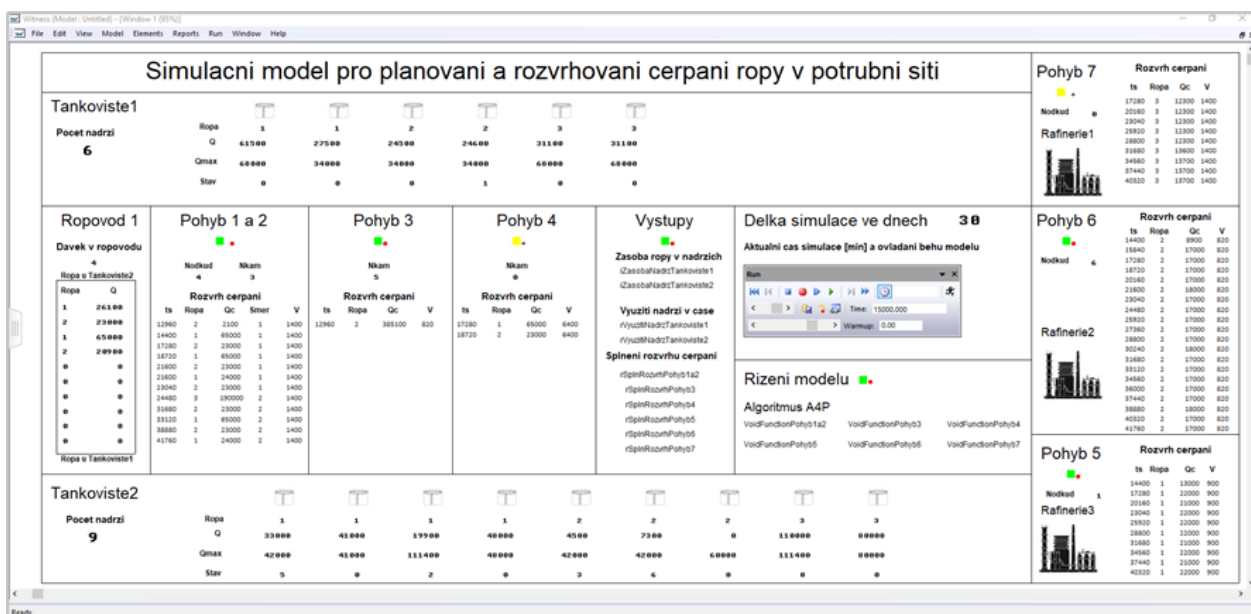
Z výše uvedeného popisu vyplývá, že v modelovaném systému lze realizovat 7 různých pohybů (tab. I):

Simulační model systému vytvořený na počítači s procesorem Intel Core i7 7600U – 2,9GHz, 16GB RAM zachycuje obr. 4. Požadavky na provedení pohybu vstupují do simulace z MS Excel v podobě rozvrhů. Protože pohyby 1 a 2 využívají Ropovod 1 (jde o obousměrné čerpání ropy), jsou požadavky na pohyb 1 a 2 importovány do simulace v podobě společného rozvrhu, do kterého je přidán sloupec s názvem „Směr“ obsahující buď hodnotu 1 (jde o pohyb 1) nebo 2 (tj. pohyb 2). Tím je zamezeno současnému čerpání ropy Ropovodem 1 v obou směrech. Dále jsou do simulace z MS Excel importovány informace o počtu, kapacitách, počáteční zásobě a typu ropy v nádržích. Požadavek na nemísění různých typů rop znamená, že po celou dobu simulace je nádrž vyhrazena pouze konkrétnímu jednomu typu ropy. Posledním vstupem do simulace z MS Excel jsou informace o počáteční zásobě v Ropovodu 1 v detailu rozmístění jednotlivých dávek ropy v potrubí a jejich velikosti.

Všechny vstupní informace do simulace jsou v inicializačních akcích modelu kódovány do elementů typu Variable. Po načtení vstupních dat z MS Excel a jejich kódování do elementů typu Variable dochází v modelu k následujícím procesům:

1. Elementem typu Machine, který zajišťuje řízení modelu, prochází pomocí PULL/PUSH pravidel opakovaně a ve zvoleném velmi krátkém intervalu (např. 1 minuta) element typu Part. Kdykoli element typu Part projde skrz Actions on Input elementu typu Machine, dochází ke spuštění algoritmu přiřazování požadavku na provedení pohybu (A4P). Tento algoritmus tvoří elementy typu Void Function, které obsahují programový kód napsaný v jazyku Visual Basic. Programový kód pokrývá následující kroky, které se odehrávají v simulaci:

Krok 1: Zvol minimální množství ropy, kterým bude dis-



Obr. 4. Simulační model systému vytvořený v prostředí Witness

Tabulka II  
Stavy nádrží v simulačním modelu

Stav nádrže	Popis
0	Do/z nádrže neproudí ropa
1	Nádrž→Ropovod 1
2	Ropovod 1→Nádrž
3	Ropovod 2→Nádrž
4	Ropovod 3→Nádrž
5	Nádrž→Rafinerie 3
6	Nádrž→Rafinerie 2
7	Nádrž→Rafinerie 1

kretizován požadavek na provedení pohybu v prvním řádku rozvrhu čerpání (např. 100 m<sup>3</sup>).

Krok 2: Projdi první řádek všech rozvrhů čerpání (tj. celkem 6) v pořadí pro pohyb 7 až 1+2, zajistiš tím přednostní zásobování rafinerií z tankovišť.

Krok 3: Pokud čas simulace je větší nebo roven času v prvním řádku, prvním sloupci rozvrhu čerpání, najdi nádrže, do kterých lze čerpat ropu, pokud to provedení pohybu vyžaduje. Pokud existuje více vyhovujících nádrží, vyber tu, ve které je nejvíce místa.

Krok 4: Pokud existuje nádrž, do které lze čerpat ropu, najdi nádrž, ze které bude čerpáno, pokud to provedení pohybu vyžaduje. Pokud existuje více vyhovujících nádrží, vyber tu, ve které je nejvíce ropy.

Krok 5: Pokud existuje nádrž, do a ze které lze čerpat ropu, rozhodni, jaké bude čerpané množství. Toto množství musí být celočíselným násobkem množství minimálního a zároveň minimem z množství požadovaného v rozvrhu a množství, které lze čerpat z/do nádrže.

Krok 6: Proveď rezervaci nádrží z/do, kterých čerpáš změnou hodnoty elementů typu Integer Variable reprezentujících, co se v nádržích děje (tj. stav nádrže – viz tab. II), z hodnoty 0 (do/z nádrže se nečerpá) na hodnotu větší než 0 (do/z nádrže se odněkud/někam čerpá v rámci realizace určitého pohybu). Přiřaď požadavek na provedení pohybu elementu typu Machine, který simuluje provedení pohybu.

2. Na základě přiřazeného požadavku na provedení pohybu prochází pomocí PULL/PUSH pravidel elementem typu Machine, který simuluje provedení pohybu, element typu Part. Elementů Machine simulujících provedení pohybu je v modelu 6, jeden pro každý rozvrh čerpání. Jelikož element typu Part reprezentuje v tomto případě minimální množství ropy zvolené v kroku 1 algoritmu A4P, zdrží se v elementu Machine po dobu,

kteřá odpovídá podílu minimálního množství a výkonu čerpání, jež je specifikován v rozvrhu čerpání. Po průchodu elementu Part skrz Actions on Finish elementu Machine jsou v modelu v závislosti na simulovaném pohybu upraveny:

- Elementy typu Variable simulující zásobu v nádržích, do/z kterých je čerpáno, jsou zvýšeny/sníženy o minimální množství.
  - Element typu Variable simulující zásobu, rozmístění jednotlivých dávek ropy a jejich velikosti v Ropovodu 1 je upraven tak, aby zůstal zachován stav plného potrubí. To zahrnuje například přidání/odebrání řádku do/z elementu v případě, že na jednom konci je do ropovodu čerpána nová dávka ropy jiného typu či na opačném konci byl z ropovodu vytlačen zbytek dávky ropy odpovídající minimálnímu množství. Jednodušší je situace, kdy stačí pouze zvýšit/snížit velikost dávky na začátku a konci ropovodu z pohledu směru čerpání.
  - Element typu Variable simulující rozvrh čerpání je v prvním řádku, ve sloupci obsahujícím množství ropy k čerpání, ponížen o minimální množství. Pokud je množství ropy k čerpání rovno 0, jsou pomocí cyklu FOR/NEXT posunuty všechny zbývající řádky rozvrhu o 1 nahoru a do elementu typu Variable, který obsahuje čas dokončení požadavku na provedení pohybu, je zapsán aktuální čas simulace.
  - Element typu Variable s čerpaným množstvím získaným v kroku 5 A4P je snížen o minimální množství. Pokud je po snížení čerpané množství rovno 0, hodnoty elementů typu Integer Variable reprezentujících, co se děje v nádržích, z/do kterých čerpám, jsou z hodnoty větší než 0 (do/z nádrže se odněkud/někam čerpá v rámci realizace určitého pohybu) změněny na hodnotu 0 (do/z nádrže se nečerpá) a je spuštěn algoritmus A4P.
3. Elementem typu Machine, který zajišťuje sběr výstupů z modelu, prochází pomocí PULL/PUSH pravidel opakovaně a ve zvoleném velmi krátkém intervalu (např. 1 minuta) element typu Part. Kdykoli element typu Part projde skrz Actions on Input elementu typu Machine, dochází k zapsání aktuálního stavu zásob a stavu nádrží do elementů typu Variable pro všechny nádrže ve všech tankovištích. Po dosažení času simulace, který je roven délce simulace ve dnech přepočítané na minuty, dochází k exportu výstupů ze simulace do MS Excel pomocí příkazu XIWriteArray. Kromě stavů zásob a stavů nádrží jsou do MS Excel exportovány i časy dokončení požadavku na provedení pohybu a model je zastaven.

Tabulka III

Počáteční rozmístění a velikosti dávek ropy v Ropovodu 1

	Ropa				
Tankoviště 1	2	1	2	1	Tankoviště 2
	23 000	65 000	23 000	24 000	
	Q				

## Výsledky

Vytvoření výsledného rozvrhu čerpání (obr. 5), který byl provozovatelem systému vyhodnocen jako proveditelný, zabralo cca 60 minut. Součástí sestavování rozvrhu bylo i opakované spouštění simulačního modelu, kdy jeden běh modelu pokrývající časový horizont 30 dnů zabral cca 6 sekund.

Počáteční rozmístění a velikosti dávek ropy v Ropovodu 1 zachycuje tab. III.

Potřebný počet nádrží k realizaci rozvrhu a jejich parametry zachycuje tab. IV. Návrh počítá s instalací dvou nových nádrží na ropu 3 v tankovišti 1 a dvou nových nádrží na ropu 1, jedné nové nádrže na ropu 2 a dvou nových nádrží na ropu 3 v tankovišti 2.

Výsledný rozvrh čerpání a instalace nových nádrží zajistí zásobování rafinerie 1 ropou 3 v množství 190 000 m<sup>3</sup>/měsíc. Rafinerie 1 je pravidelně obden zásobována ropou 3 v množství 12 300 – 13 700 m<sup>3</sup>. Rafinerie 2 je pravidelně každý den zásobována ropou 2 v množství 17 000 – 18 000 m<sup>3</sup>. Rafinerie 3 je pravidelně obden zásobována ropou 1 v množství 21 000 – 22 000 m<sup>3</sup>. Uvedená množství a frekvence zásobování ropou z tankovišť jsou v souladu s výrobními a skladovacími kapacitami rafinerií a ve výsledném rozvrhu čerpání nedochází k žádným zpožděním při jejich realizaci (tab. V). Maximální zpoždění realizace požadavku na čerpání v rámci pohybů 1 – 4 (tj. z<sub>100%</sub>) se pohybuje ve výši 22 hodin, což znamená, že některá čerpání nezačnou v 0:00 hodin příslušného dne, ale až ve 22:00 hodin.

Tabulka IV

Nádrže v tankovištích a jejich parametry, počáteční zásoba

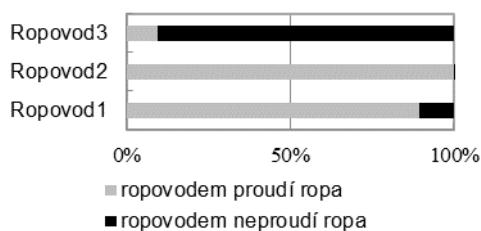
Nová nádrž?	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne	ne	ano	ano	ne	ne	ano	ano	ano
Ropa	1	1	2	2	3	3	1	1	1	1	2	2	2	3	3
$Q/1000$	55	34	24	23	68	68	1	0	0	0	28	17	40	0	0
$Q_{max}/1000$	68	34	34	34	68	68	42	41	111,4	48	42	42	60	111,4	80
Tankoviště	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Den	Ropa	$Q_z/1\ 000$	Pohyb	$V/1\ 000$	Den	Ropa	$Q_z/1\ 000$	Pohyb	$V/1\ 000$	Den	Ropa	$Q_z/1\ 000$	Pohyb	$V/1\ 000$
1	3	12,3	7	1,40	9	2	17,0	6	0,82	18	2	17,0	6	0,82
1	2	17,0	6	0,82	9	1	21,0	5	0,90	18	3	190,0	2	1,40
1	1	22,0	5	0,90	10	2	18,0	6	0,82	19	3	12,3	7	1,40
1	3	190,0	3	0,82	10	1	65,0	4	6,40	19	2	17,0	6	0,82
1	1	65,0	1	1,40	10	2	400,0	3	0,82	19	1	22,0	5	0,90
2	2	17,0	6	0,82	10	2	23,0	1	1,40	20	2	17,0	6	0,82
2	1	65,0	4	6,40	11	3	12,3	7	1,40	21	3	12,3	7	1,40
2	2	23,0	1	1,40	11	2	17,0	6	0,82	21	2	17,0	6	0,82
3	3	12,3	7	1,40	11	1	22,0	5	0,90	21	1	22,0	5	0,90
3	2	18,0	6	0,82	11	2	23,0	4	6,40	22	2	18,0	6	0,82
3	1	21,0	5	0,90	11	1	65,0	1	1,40	23	3	13,6	7	1,40
3	2	23,0	4	6,40	12	2	17,0	6	0,82	23	2	17,0	6	0,82
3	1	65,0	1	1,40	13	3	12,3	7	1,40	23	1	21,0	5	0,90
4	2	17,0	6	0,82	13	2	17,0	6	0,82	23	2	23,0	2	1,40
5	3	12,3	7	1,40	13	1	22,0	5	0,90	24	2	17,0	6	0,82
5	2	17,0	6	0,82	13	1	65,0	4	6,40	24	1	65,0	2	1,40
5	1	22,0	5	0,90	13	2	23,0	1	1,40	25	3	13,7	7	1,40
5	1	65,0	4	6,40	14	2	17,0	6	0,82	25	2	17,0	6	0,82
5	2	23,0	1	1,40	14	2	23,0	4	6,40	25	1	22,0	5	0,90
6	2	17,0	6	0,82	14	1	65,0	1	1,40	26	2	17,0	6	0,82
6	2	23,0	4	6,40	15	3	12,3	7	1,40	27	3	13,7	7	1,40
6	1	65,0	1	1,40	15	2	17,0	6	0,82	27	2	17,0	6	0,82
7	3	12,3	7	1,40	15	1	21,0	5	0,90	27	1	21,0	5	0,90
7	2	17,0	6	0,82	16	2	18,0	6	0,82	28	2	18,0	6	0,82
7	1	22,0	5	0,90	16	2	23,0	1	1,40	28	2	23,0	2	1,40
8	2	17,0	6	0,82	16	1	24,0	1	1,40	29	3	13,7	7	1,40
8	1	65,0	4	6,40	17	3	12,3	7	1,40	29	2	17,0	6	0,82
8	2	23,0	4	6,40	17	2	17,0	6	0,82	29	1	22,0	5	0,90
8	2	23,0	1	1,40	17	1	22,0	5	0,90	30	2	17,0	6	0,82
8	1	65,0	1	1,40	17	2	23,0	1	1,40	30	1	24,0	2	1,40
9	3	12,3	7	1,40										

Obr. 5. Výsledný rozvrh čerpání

Tabulka V  
Splnění rozvrhu čerpání

Pohyb	$Q_c$	$Q_{cN}$	$Z_{50\%}$	$Z_{95\%}$	$Z_{100\%}$
1+2	900 000	0	10	21	22
3	590 000	0	8	15	16
4	440 000	0	0	7	10
5	325 000	0	0	0	0
6	515 000	0	0	0	0
7	190 000	0	0	0	0
Kritérium plnění rozvrhu	Množství		Včasnost dokončení požadavku na čerpání		



Obr. 6. Využití ropovodů v čase

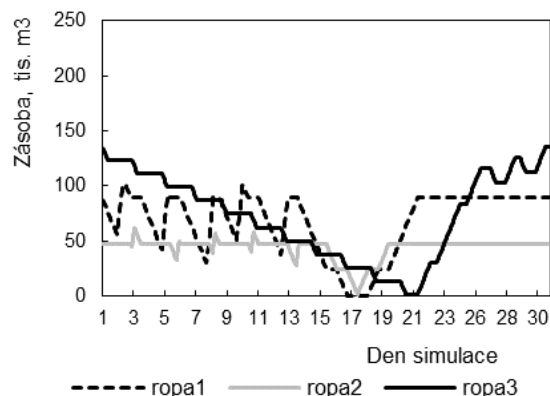
Platí, že množství ropy 3 dopravené do rafinerie 1 ve výši 190 000 m<sup>3</sup>/měsíc se blíží maximální kapacitě přepravního systému. Využití ropovodu 2 (obr. 6), který přivádí ropu do tankoviště 2 je téměř 100 %, jedná se o úzké místo modelovaného systému pro navržený výsledný rozvrh čerpání.

Zároveň platí, že instalovaná skladovací kapacita v tankovištích je pro výsledný rozvrh čerpání minimální, neboť zásoba všech uvažovaných rop se v obou tankovištích pohybuje v určitém čase okolo nuly (obr. 7 a 8).

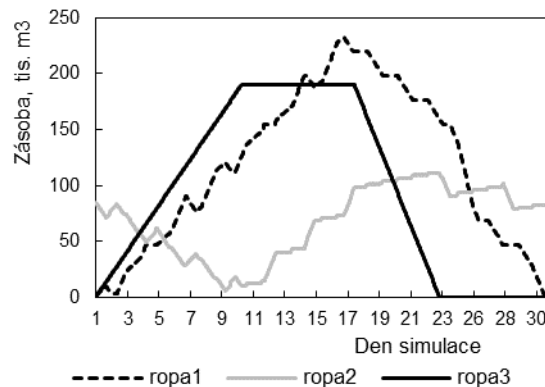
## Závěr

Prostředí dynamické simulace a zvolená technika modelování přináší z pohledu plánování a rozvrhování v COSC řadu výhod:

1. Minimalizace počtu fyzických elementů typu Part, Buffer a Machine či jejich spojité obdoby v modelu, vede k výrazně větší rychlosti jeho běhu, což při plánování a rozvrhování hraje klíčovou roli.
2. Uživatel může volbou diskretizace čerpaného množství a délky časového intervalu, ve kterém dochází k přiřazování požadavků na provedení pohybu či sběru výstupů nalézt kompromis mezi rychlostí běhu modelu a rozsahem a podrobností výstupů.
3. Přidáváním nových pohybů lze rozšiřovat modelovaný systém o materiálové toky mezi rafineriemi, navazujícími provozu a zákazníky a docílit tak efektů vyplývajících z integrace plánování a rozvrhování v celém dodavatelském systému.



Obr. 7. Zásoba ropy v tankovišti 1



Obr. 8. Zásoba ropy v tankovišti 2

4. Přidáváním stavů nádrží a možností volby výkonu čerpání pro každou diskrétní jednotku čerpaného množství lze simulovat například údržbu či poruchy, což znamená, že model je využitelný i v rámci operativního řízení.
5. Díky své jednoduchosti lze model snadno přenášet i do prostředí jiných simulačních produktů, jako je např. Simul8 či Arena.

Zásadní nevýhodou oproti matematickému programování je fakt, že simulace sama o sobě nedokáže vygenerovat rozvrh tak, aby byl proveditelný a optimální. To jednak

znamená, že ji nelze využít k automatizaci procesů rozvrhování v podniku, neboť rozvrh sestavuje vždy uživatel, a pak také že rozvrh získaný matematickým programováním bude obvykle kvalitnější např. s ohledem na výši provozních nákladů. Větší univerzálnost dynamické simulace, možnost sestavení modelu celého dodavatelského systému s velkou rychlostí běhu nás ovšem vedou k názoru, že budoucí moderní nástroje pro plánování a rozvrhování musí být kombinací obou přístupů. To je v souladu s poznatky uvedenými např. v pracích<sup>18,19</sup>. Hovoří se o hybridním modelování<sup>20</sup> či technice simulace-optimalizace<sup>21</sup>. Hybridní modelování představuje mimořádně slibný směr výzkumu v oblasti plánování a rozvrhování v supply chain managementu a budeme se mu věnovat v další práci.

## Seznam zkratk

APC	advanced process control
APS	advanced planning and scheduling
CDU	crude distillation unit
COSC	crude oil supply chain
ERP	enterprise resource planning
LP	linear programming
MES	manufacturing executive system
MILP	mixed integer linear programming
MINLP	mixed integer nonlinear programming
MPC	model predictive control
$N_{\text{odkud}}$	nádrž, ze které je čerpána ropa
$N_{\text{kam}}$	nádrž, do které je čerpána ropa
PIMS	Process Industry Modeling System
$Q$	množství ropy v nádrži či ropovodu [ $\text{m}^3$ ]
$Q_c$	množství ropy k čerpání v rozvrhu [ $\text{m}^3$ ]
$Q_{\text{max}}$	maximální možné množství ropy v nádrži [ $\text{m}^3$ ]
$Q_{\text{cN}}$	nedodané množství ropy dle rozvrhu [ $\text{m}^3$ ]
RPMS	Refinery and Petrochemical Modeling System
RTO	real time optimization
$t_s$	čas plánovaného zahájení čerpání ropy [min]
$V$	výkon čerpání [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]
$z_{50\%}$	medián zpoždění splnění požadavku na čerpání ropy [h]
$z_{95\%}$	95 % kvantil zpoždění splnění požadavku na čerpání ropy [h]
$z_{100\%}$	maximální zpoždění splnění požadavku na čerpání ropy [h]

## LITERATURA

- Grossmann I.: *AIChE J.* 51, 1846 (2005).
- Shapiro J. F.: *Comput. Chem. Eng.* 28, 855 (2004).
- Shah N. K., Li Z. K., Ierapetritou M. G.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 1161 (2011).
- Reddy P. C. P., Karimi I. A., Srinivasan R.: *AIChE J.* 50, 1177 (2004).
- Yuzgec U., Palazoglu A., Romagnoli J. A.: *Comput. Chem. Eng.* 34, 1671 (2010).
- Kuo T. H., Chang C. T.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 1935 (2008).
- Mendez C. A., Grossmann I. E., Harjunkski I., Kabore P.: *Comput. Chem. Eng.* 30, 614 (2006).
- Castro P. M., Grossmann I. E., Zhang Q.: *Comput. Chem. Eng.* 50, 14 (2018).
- Mouret S., Grossmann I. E., Pestiaux P.: *Comput. Chem. Eng.* 35, 2750 (2011).
- Lee H. M., Pinto J. M., Grossmann I. E., Park S.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, 1630 (1996).
- Pinto J. M., Joly M., Moro L. F. L.: *Comput. Chem. Eng.* 24, 2259 (2000).
- Jia Z. Y., Ierapetritou M., Kelly J. D.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 42, 3085 (2003).
- Floudas C. A., Lin X. X.: *Comput. Chem. Eng.* 28, 2109 (2004).
- Wu N. Q., Zhu M. C., Bai L. P., Li Z. W.: *Enterp. Inf. Syst.* 10, 581 (2016).
- Dyntar J., Gros I.: *Matematické modely pro manažerské rozhodování* (2. vyd.). VŠCHT Praha, Praha 2015.
- Law A. M.: *Simulation modeling and analysis* (5. vyd.). McGraw-Hill, New York 2015.
- Dyntar J.: *Návrh a optimalizace dodavatelských systémů s využitím dynamické simulace*. FinEco, Praha 2018.
- Castro P. M., Aguirre A. M., Zeballos L. J., Mendez C. A.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 10665 (2011).
- Bassi H. V., Ferreira V. J. M., Bahiense L.: *Comput. Chem. Eng.* 63, 1074 (2012).
- Figueira G., Almada-Lobo B.: *Simul. Model Pract. Th.* 46, 118 (2014).
- Martins S., Amorim P., Figueira G., Almada-Lobo B.: *Comput. Chem. Eng.* 106, 315 (2017).

**J. Dyntar<sup>a</sup>, J. Lachman<sup>a</sup>, A. Menčíková<sup>a</sup>, and M. Botek<sup>b</sup>** (<sup>a</sup>Department of Business Administration and Management, TU Liberec, <sup>b</sup>School of Business, University of Chemistry and Technology, Prague): **Application of Dynamic Simulation in Planning and Scheduling in Oil Chemistry**

In this paper we describe an application of dynamic simulation in the planning and scheduling of oil pumping in a system consisting of three refineries and two tank farms equipped with oil storage tanks, into which oil flows from three pipelines. The simulation model of the system is created in the software environment for discrete event simulation Witness with MS Excel support for importing input data and exporting and editing outputs. The model is based on the principles of the general simulation model of material flows in a supply chain. The outputs of the model are used to discuss the possibilities of using simulation for planning, scheduling, and operational control in oil chemistry and to compare the advantages and disadvantages of the proposed solution with methods of mathematical programming.

Keywords: oil, planning, scheduling, dynamic simulation, company information system, supply chain management