

MODELOVÁNÍ POTRUBNÍCH SÍTÍ

Vladimír Hanta

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

Klíčová slova: distribuční logistika, potrubní sítě, optimální potrubní cesta, modelování a simulace, simulační program Witness

1 Úvod

Doprava surovin, meziproductů a produktů od výrobce k zákazníkovi nebo k dalšímu zpracování patří mezi základní prvky každého logistického systému. Speciální typem dopravy je potrubní doprava. Používá se hlavně na přepravu tekutých nebo plynných médií: ropa, zemní plyn, pohonné hmoty, voda (pitná, užitková a odpadní), chemické produkty a meziproducty. Někdy se tento způsob přepravy používá i pro přepravu práškových hmot nebo vodních suspenzí pevných substrátů.

Hlavní výhody potrubní dopravy jsou vysoká spolehlivost, možnost kontinuálního nepřetržitého využívání, šetrnost k okolnímu prostředí, silné zabezpečení přepravovaného média před vnějšími vlivy a krádežemi apod. Nevýhodami potrubní dopravy jsou vysoké investiční náklady a silná specializace na přepravovaná média. Distribuční sítě, ve kterých se provádí potrubní doprava, patří mezi statické distribuční sítě. Dalším charakteristickým rysem potrubní dopravy je skutečnost, že potrubí má trojí funkci: je současně přepravní nádobou, dopravním prostředkem i dopravní cestou.

2 Potrubní sítě

Potrubní sítě pro přepravu práškových, plynných a kapalných médií včetně vodních suspenzí pevných materiálů jsou důležité prvky nejen logistických, ale i technologických systémů. Používají se na přepravu meziproductů uvnitř výrobního podniku na menší vzdálenosti (lokální sítě) a na přepravu surovin a produktů na větší vzdálenosti. Pro zvýšení spolehlivosti dopravy se potrubní sítě často budují jako zokruhované sítě, ve kterých je možné provádět přepravu mezi libovolnými dvěma uzly alespoň dvěma nezávislými větvemi. Je možné vytvořit celou řadu formálních typů potrubních sítí (sít' liniová přímá nebo nepřímá, sít' kruhová, hvězdová, ... rozvodná nebo svodná atd.).

Struktura zokruhovaných potrubních sítí se obvykle zadává pomocí neorientovaného grafu. Každá větev sítě je popsána průtokem q_j a tlakovým spádem Δp_j . Platí pro ni Bernoulliho rovnice $q_j = K \Delta p_j^\alpha$, kde exponent α závisí na stlačitelnosti média a typu proudění a koeficient K na rychlosti proudění a místních odporech. Médium ve větvi proudí ve směru tlakového spádu. Pro stlačitelné médium se v rovnici někdy ztratí informace o směru tlakového spádu, pak se musí tato rovnice modifikovat. Při vytváření matematického modelu potrubní sítě o m větvích a n uzlech lze sestavit $2m$ nezávislých rovnic pro neznámé průtoky q_j a tlakové spády Δp_j . Každý z n uzlů je popsán rovnicí continuity, ale pouze $(n - 1)$ těchto rovnic je nezávislých. K úplnému popisu sítě je zapotřebí ještě dalších $k = 2m - (n - 1 + m) = m - n + 1$ nezávislých rovnic. Tyto rovnice se získají pomocí kostry grafu. Každá kostra grafu má $n - 1$ hran, zbylých $m - n + 1$ hran nepatří do kostry. Všechny hrany nepatřící do kostry se doplní pomocí hran kostry na kružnici (toto doplnění je vždy dáno jednoznačně). Získá se tak hledaných $m - n + 1$ nezávislých obvodů, jejichž matematický popis poskytne potřebný počet nezávislých rovnic. Tento matematický model je nutné doplnit o rovnice pro koeficient K a exponent α . Potřebné rovnice jsou často empirické a použitelné pouze pro určité podmínky proudění. Sestavený matematický model se používá obvykle pouze při návrhových

výpočtech, pro modelování běžného provozu potrubních sítí je vhodnější vytvořit simulační model a potřebné informace získávat pomocí simulačních experimentů.

3 Simulační model potrubní sítě

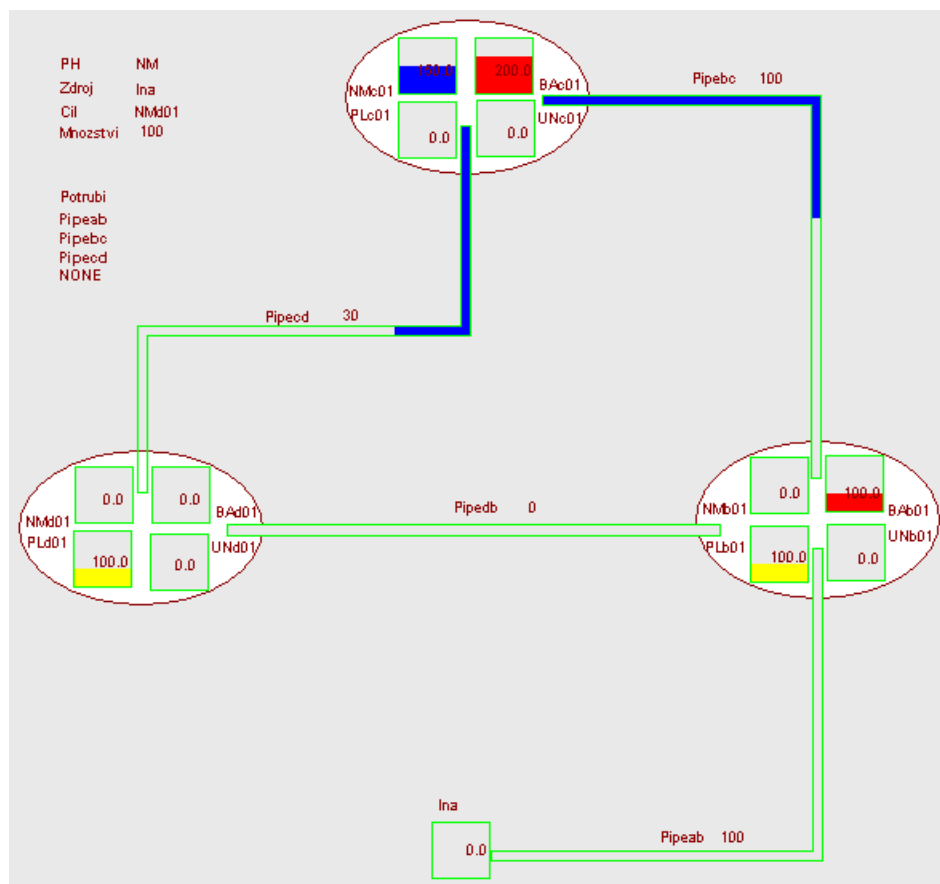
Simulační model rozsáhlé potrubní sítě pro modelování přepravy pohonných hmot z rafinérií do skladů a ze skladů do výdejních míst pro distributory se skládá z těchto prvků:

1. potrubní větve,
2. vstupní body do systému potrubní sítě,
3. sklady pohonných hmot,
4. armaturní uzly.

Ve vstupních bodech se přečerpávají jednotlivé dodávky pohonných hmot z rafinérie do systému potrubní sítě. Uzly potrubní sítě jsou dvojího druhu: armaturní uzly bez skladovacích kapacit (pouze větvení potrubní sítě nebo změna průměru potrubí) a vlastní sklady pohonných hmot. Operace čerpání pro uzly se sklady může probíhat dvojím způsobem: buď se médium čerpá do skladů tohoto uzlu nebo uzel slouží pouze jako tranzitní a čerpá se do skladů jiného uzlu sítě. Vzhledem k historickému vývoji systému potrubní sítě je většina větví obousměrná, ale některé větve jsou jednosměrné. Jednotlivé sklady v uzlech jsou buď specializované na skladování pouze určitého druhu pohonných hmot nebo univerzální. V univerzálních skladech lze skladovat libovolný druh hmot, ale vždy jen jediný.

Při tvorbě simulačního modelu byly použity tyto základní spojitě simulační prvky:

1. tekutiny **Fluid** pro jednotlivé druhy pohonných hmot (hlavně nafta NM a benzín BA),
2. potrubí **Pipe** pro větve potrubní sítě charakterizované především průtokem (*Rate*) a objemem (*Capacity*),
3. nádrže **Tank** pro sklady pohonných hmot charakterizované celkovým objemem (*Capacity*), počátečním množstvím (*Initial Volume*) a počátečním druhem skladovaného média (*Initial Fluid Type*).



Obr. 1. Simulační model jednoduché potrubní sítě

4 Syntéza optimální cesty pro čerpání dodávky pohonných hmot

Funkčnost vytvořeného modelu potrubní sítě byla testována na problému nalezení a syntézy nejkratší cesty pro čerpání 12 možných dodávek pohonných hmot mezi všemi kombinacemi uzlů. Každá dodávka byla popsána pomocí těchto údajů: zdrojový uzel, cílový uzel, druh pohonné hmoty a dodávané množství. Pro jednoduchou kontrolu správnosti optimální potrubní cesty pro konkrétní dodávku měla všechna dodávaná množství stejnou hodnotu 100 m^3 (viz tabulka Tab. 5). Optimální cesty byly hledány pomocí modifikovaného Dijkstrova algoritmu. Tento algoritmus je založen na vytváření kořenových stromů nejkratších cest. Pro grafy s nezápornými délkami hran, což je u grafů popisujících reálné potrubní sítě vždy splněno, lze jeho výpočetní složitost odhadnout jako kvadratickou v závislosti na počtu uzlů grafu. Patří tedy mezi rychlé algoritmy. Jeho výpočetní složitost lze ještě použitím vhodných datových struktur zlepšit, ale to se vyplatí pouze pro rozsáhlejší grafy, které obsahují více než 100 uzlů. To ale není případ reálných potrubních sítí pro přepravu pohonných hmot. Vzhledem k tomu, že některé větve sítě jsou jednosměrné, musela být potrubní síť popsána pomocí orientovaného grafu, ve kterém obousměrná větev vytvářela dvojici opačně orientovaných hran, zatímco jednosměrná větev pouze jedinou hranu.

Tab. 2. Popis potrubní sítě pomocí seznamu hran

Počátek	Konec	Délka
1	2	126
2	3	87
3	2	87
3	4	96
4	2	115
4	3	96

Po nalezení optimální cesty pro čerpání byla optimální cesta transformována z orientovaného grafu do potrubní sítě na optimální potrubní cestu. Přitom se určila i orientace toku v potrubí. V simulačním prvku *Pipe* není směr toku určen vstupním a výstupním pravidlem (to ve všech případech bylo *Connect with*, ale znaménkem průtoku).

Tab. 3. Transformace hran grafu na roury potrubní sítě

Pořadí	Počátek	Konec	Hrana	Roura	Orientace
1	1	2	1	1	1
2	2	3	2	2	1
3	3	2	2	2	-1
4	3	4	4	3	1
5	4	2	5	4	-1
6	4	3	4	3	-1

Po nalezení pořadových čísel jednotlivých rour byla sestavena jména všech potrubí tvořících nejkratší posloupnost potrubí – optimální potrubní cestu pro uskutečnění dodávky. Tato jména pak byla dosazena do proměnných *PipeIn* a *PipeOut* typu *Name* uvedených ve vstupním pravidle *Connect with PipeIn_k* a výstupním pravidle *Connect with PipeOut_k* potrubí tvořících optimální potrubní cestu podle schématu:

k	<i>PipeIn_k</i>	<i>PipeOut_k</i>
1	<i>Zdroj</i>	<i>Roura₁</i>
2	<i>Roura₁</i>	<i>Roura₂</i>

n	<i>Roura_{n-1}</i>	<i>Cil</i>

Při syntéze optimální potrubní cesty se také ověřovalo, zda dodávku lze uskutečnit. Dodávku bylo možné uskutečnit, jestliže:

1. ve zdrojovém skladu nebo vstupním bodě potrubní sítě bylo k dispozici dostatečné množství potřebného druhu pohonných hmot,
2. bylo možné vytvořit volnou potrubní cestu,
3. v cílovém skladu existovala nádrž se stejným druhem pohonné hmoty a dostatečnou skladovací kapacitou nebo prázdná univerzální nádrž.

Úseky potrubí, které tvořily optimální potrubní cestu pro aktuální dodávku, byly pro syntézu optimální potrubní cesty pro další dodávku zablokovány systematickým přidělováním a odebíráním pracovních sil. Každý úsek potrubí mělo k dispozici svou vlastní pracovní sílu. Přehled optimálních cest a optimálních potrubních cest je uveden v tabulce Tab. 4.

Tab. 4. Přehled optimálních cest a optimálních potrubních cest pro 12 možných dodávek

Pořadí	Zdroj	Cíl	Hrany		Vzdálenost	Potrubí			
1	1	4	1	2	4	309,0	Pipeab	Pipebc	Pipecd
2	3	2	3			87,0	Pipebc	—	—
3	4	1	-1			10 000,0	—	—	—
4	1	2	1			126,0	Pipeab	—	—
5	3	4	4			96,0	Pipecd	—	—
6	2	4	2	4		183,0	Pipebc	Pipecd	—
7	4	3	6			96,0	Pipecd	—	—
8	3	1	-1			10 000,0	—	—	—
9	2	3	2			87,0	Pipebc	—	—
10	2	1	-1			10 000,0	—	—	—
11	4	2	5			115,0	Pipedb	—	—
12	1	3	1	2		213,0	Pipeab	Pipebc	—

5 Výsledky simulace postupných dodávek podle objednávek

Plán čerpání se skládal z celkem 12 dodávek různých pohonných hmot ve stejném množství ze všech možných zdrojových skladů nebo jediného vstupního bodu systému potrubní sítě do všech cílových skladů, pro které bylo možné sestavit potrubní cestu. Rychlost čerpání byla pro jednoduchou kontrolu správnosti řešení stanovena na 10 m³ za jednotku simulačního času. Kapacity všech potrubí byly stejné a měly hodnotu 100 m³. Vzdálenosti jednotlivých uzlů orientovaného grafu popisujícího potrubní síť nesouvisely s parametry jednotlivých potrubí a používaly se pouze pro výpočet nejkratších cest v orientovaném grafu. Přehled výsledků simulace plánu čerpání je uveden v tabulce Tab. 5. Výsledky simulačních experimentů byly v úplném souladu s výsledky numerických výpočtů.

6 Závěry

Potrubní sítě pro přepravu spojitých médií patří mezi důležité prvky technologických i logistických systémů. Matematické modely jsou obtížně použitelné zejména pro problémy související s výpočty nebo odhady parametrů potrubí a proudícího média. Navíc tyto modely jsou pro praktické použití příliš podrobné, pro většinu ekonomických a provozních výpočtů u reálných sítí stačí předpoklady pístového toku a laminárního proudění a kvalifikované odhady rychlosti proudění.

Vytvořený model jednoduché potrubní sítě a s ním spojené simulační experimenty prokázaly, že prostředí simulačního programu Witness a jeho spojitě prvky jsou vhodným nástrojem pro modelování těchto systémů. K výpočtu nejkratších potrubních cest mezi uzly grafu byl použit relativně složitý grafový algoritmus. Ukázalo se, že i s poměrně chudými prostředky jazyka WCL (datové struktury, řídicí příkazy) je možné implementovat v tomto prostředí i složité abstraktní algoritmy. Naproti tomu je vhodné použít algoritmy předem odladit a ověřit ve

výpočetně vhodnějším prostředí. Pro ladění všech použitých grafových algoritmů byl použit výpočetní systém MATLAB.

Tab. 5. Výsledky simulace plánu čerpání

Zdroj	Cíl	Druh	Množství	Začátek	Konec
Ina	NMd01	NM	100	0	40
BAc01	BAb01	BA	100	40	60
PLd01	Ina	PL	100	60	60
Ina	UNb01	BN	100	60	80
NMc01	NMd01	NM	100	80	100
PLb01	PLd01	PL	100	100	130
NMd01	NMc01	NM	100	130	150
BAc01	Ina	BA	100	150	150
UNb01	UNc01	BN	100	150	170
BAb01	Ina	BA	100	170	170
PLd01	PLb01	PL	100	170	200
Ina	BAc01	BA	100	200	220

Výsledky simulačních experimentů ukázaly plnou shodu s výsledky numerických výpočtů. Určité problémy se objevily v souvislosti s vizualizací toku média v rozsáhlé síti, protože rozsáhlé sítě již vyžadují možnost zobrazovat potrubí i se šikmou orientací, ne pouze vertikální a/nebo horizontální. Dále v rozsáhlých sítích se musí k přepravě používat tlačné médium, tedy potrubní síť, pokud je v klidu a neprobíhá v ní žádné čerpání, je naplněna tímto médiem. Simulační prvek *Pipe* nemá na rozdíl od nádrží *Tank* možnost definovat počáteční objem média, navíc akci *Move* nelze pro potrubí použít.

Poděkování

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

Literatura

1. Demel J.: Grafy a jejich aplikace. Academia, Praha 2001.
2. Heinrich J.: Vlastnosti tekutin. Alfa, Bratislava 1980.
3. Peredo C. H. et al.: Learning Witness. Lanner Group. Houston, Texas, USA, 1998.
4. Potužák K.: Doprava a rozvod plynů. Skriptum VŠCHT Praha. SNTL, Praha 1981.
5. Robinson S.: Successful Simulation. A Practical Approach to Simulation Projects. McGraw-Hill, London 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