



SIMULACE DODÁVEK POHONNÝCH HMOT V ROZSÁHLÝCH POTRUBNÍCH SÍTÍCH

SIMULATION OF FUEL DELIVERIES IN LARGE-SCALE PIPELINE NETWORKS

*Vladimír Hanta*¹, *Jaroslav Poživil*²

¹Faculty of Chemical Engineering ICHT Prague, Department of Computing and Control Engineering, Praha, Czech Republic, e-mail: hantav@vscht.cz

²Faculty of Chemical Engineering ICHT Prague, Department of Computing and Control Engineering, Praha, Czech Republic, e-mail: pozivilj@vscht.cz

Abstrakt: Speciální typem dopravy surovin a produktů je potrubní doprava. Používá se hlavně na přepravu tekutých nebo plyných médií, zejména pohonných hmot. Exaktní matematické modely jsou pro simulaci dodávek pohonných hmot složité a obtížně použitelné. 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. Simulační model rozsáhlé potrubní sítě pro modelování přepravy pohonných hmot z rafinérií do distribučních skladů byl vytvořen z těchto prvků: potrubní větve, vstupní body pro vstup pohonných hmot do systému potrubní sítě, sklady pohonných hmot a armaturní uzly. Po zadání seznamu dodávek se pro každou dodávku vypočetla optimální potrubní cesta a provedla se vizualizace simulované dodávky pohonných hmot. Všechny výpočty, simulace a vizualizace byly prováděny v prostředí simulačního systému Witness 2007.

Klíčové slová: distribuční logistika, potrubní sítě, optimální potrubní cesta, modelování a simulace, simulační systém Witness

Abstract: Pipeline transport is a special type of raw materials and products transportation. It is used mainly for transport of fluids and gases, especially fuels. Exact mathematical models are for simulation of fuel deliveries too complicated and applied with difficulties. Moreover, these models are for real application too detailed. For most economic and operating calculations in real networks, assumptions of plug and laminar flow and qualified guesses of flow velocity are sufficient. Simulation model of large-scale pipeline network for modelling transportation of fuels from oil refineries to distribution stores was created from the following elements: pipe branches, input nodes of pipeline system, fuel storages and valve nodes. After placing orders the optimum pipeline route was calculated for each order and visualization of the simulated fuel delivery performed. All calculations, simulation experiments and their visualization were performed in Witness 2007 simulation system.

Key words: distribution logistics, pipeline networks, optimum pipeline route, modelling and simulation, simulation system Witness

1 ÚVOD

Doprava surovin, meziproduktů 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 plyných médií: ropa, zemní plyn, pohonné hmoty, voda (pitná, užitková a odpadní), chemické produkty a meziprodukty. 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, plyných a kapalných médií včetně vodních suspenzí pevných materiálů jsou důležité prvky nejen logistických, ale i technologických systémů. Používají se na přepravu meziproduktů 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, hvězdná, ... rozvodná nebo svodná atd.).

1 INTRODUCTION

Transport of raw materials, intermediates and products from manufacturers to customers belongs among the basic elements of every logistic system. A special type of transportation is pipeline transport. It is widely used for transport of fluid or gas materials: oil, natural gas, water (drinking, service and waste), chemical products and intermediates. This way of transportation is also used for transport of powder materials or water slurries of solid materials.

Main advantages of pipeline transport are high reliability, possibility of continual uninterrupted operation, greenness in relation to environment, strong security transported materials against outer effects and thefts, and the like. Disadvantages of pipeline transport are high investments costs and strong specialization on transported materials. Distribution networks in which pipeline transport is carried out belong to static distribution networks. Another characteristic feature of pipeline transport is the fact that pipes have triple function: it is simultaneously transport container, transport mean and transport route.

2 PIPELINE NETWORKS

Pipeline networks for transportation of powder, gas and liquid materials including water slurries of solid materials are important elements of both logistical and technological systems. They are used for transportation of intermediates inside enterprises for shorter distances (local networks) and for transportation of raw materials and products for long distances. For increase in reliability, they are usually built as circled networks. They are able to perform the transport between two arbitrary nodes using at least two independent branches. It is possible to create a whole range of formal types pipeline networks (line direct or indirect,

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. 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 kontinuity, 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 nutně 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 při návrhových výpočtech, pro modelování 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,

circular, star-shaped, distribution or conduct, etc.).

The structure of circled pipeline networks is usually described by means of an undirected graph. Every branch of the network is given by the flow rate q_j and pressure difference Δp_j . The Bernoulli equation $q_j = K \Delta p_j^\alpha$ is valid for it; the exponent α depends on both compressibility of the flowing medium and flow type and coefficient K on both flow rate and local resistances. The medium in the branch flows in pressure difference direction. Creating a mathematical model of the pipeline network having m branches and n nodes a set of $2m$ independent equations for unknown flow rates q_j and pressure differences Δp_j can be set up. Each of n nodes is described by continuity equation, but only $(n - 1)$ of these equations are independent. To describe the network completely it is necessary to set up $k = 2m - (n - 1 + m) = m - n + 1$ additional independent equations. These equations can be obtained with help of a spanning tree of the network graph. Every spanning tree of the graph has $n - 1$ edges, remaining $m - n + 1$ edges do not belong to the spanning tree. All the edges not belonging to the spanning tree are completed with edges of the spanning tree into a circuit. This completion is always unique. Creating a set of $m - n + 1$ independent circuits gives independent equations needed for complete mathematical model of the pipeline network. The model is necessary to complete with equation for calculation of both the coefficient K and exponent α . These equations are often empirical and they are applicable for specific flow conditions only. Such a mathematical model can be used usually for design calculations. For modelling of pipeline network operation is more suitable to create a simulation model and required pieces of information to obtain by means of simulation experiments.

4. armaturní uzly.

Ve vstupních bodech se přečerpávají 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 sklady pohonných hmot. Operace čerpání pro uzly se sklady může probíhat dvojnásobným 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 a objemem,
3. nádrže *Tank* pro sklady pohonných hmot charakterizované celkovým objemem, počátečním množstvím a počátečním druhem skladovaného média.

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.

3 SIMULATION MODEL OF A PIPELINE NETWORK

Simulation model of a large-scale pipeline network for modelling of fuel transport from refineries to stores and from stores to output nodes for distributor consists of the following elements:

1. pipeline branches,
2. input nodes of pipeline network system,
3. fuel stores,
4. armature nodes (valves and fittings).

Fuel deliveries are pumped from refineries into pipeline network system at input nodes. There are two types of the pipeline network nodes: armature nodes without storage capacity (only branching of pipelines or changes of pipe diameter) and fuel storages. Pumping operations for nodes with storage capacity can run by different ways: either the medium is pumped into storages of the node or the node serves as a transit one and the medium is pumped through the node into stores of another node. Considering the history of pipeline network system, most branches are two-way but some branches are one-way only. The storages in nodes are either specialized in storing of a certain type of fuels or universal. In universal storages can be stored arbitrary type of fuels but always the only one, fuels cannot be blended.

The following basic continuous simulation elements were used in the simulation model:

1. elements of the *Fluid* type for different fuels (especially diesel oil NM and petrol BA),
2. elements of the *Pipe* type for branches of the pipeline network described by flow rate and capacity,
3. elements of the *Tank* type for fuel storages described by capacity, initial volume and initial fluid type.

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 větve vytvářela dvojici opačně orientovaných hran, zatímco jednosměrná větve pouze jedinou hranu.

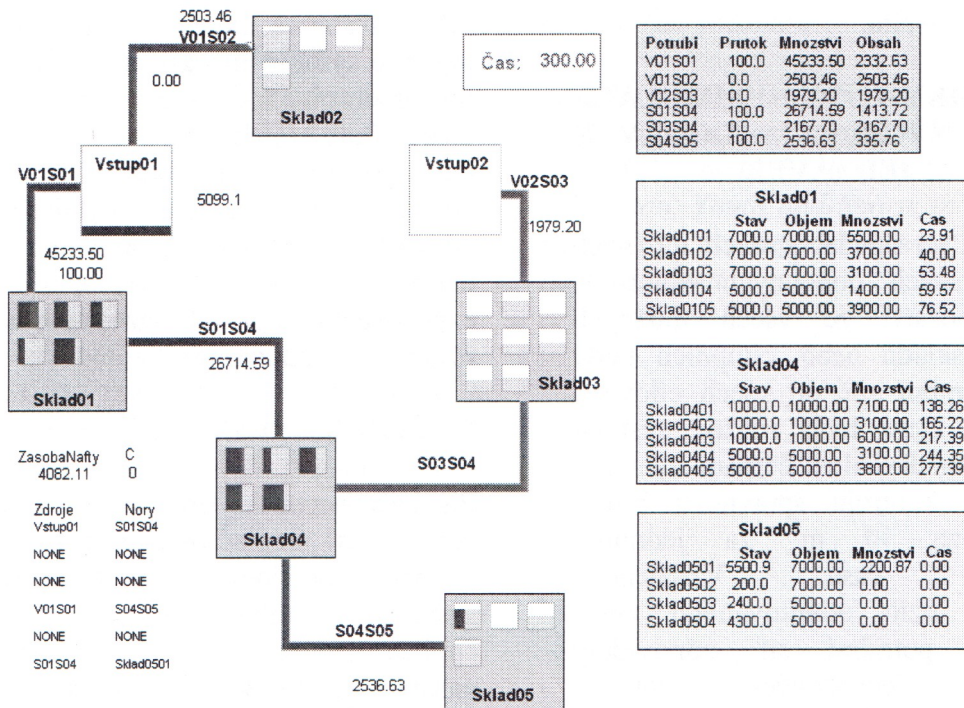
Při optimalizaci optimální cesty pro čerpání byla optimální cesta transformována z orientovaného grafu do potrubní sítě na optimální potrubní cestu. Přitom se určila i orientace toku v potrubí. V simulačním prvku *Pipe* není směr toku určen vstupním a výstupním pravidlem, ale znaménkem průtoku. Po nalezení 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 (Obr. 2).

4 SYNTHESIS OF THE OPTIMUM ROUTE FOR FUEL DELIVERY PUMPING

Functionality of the created model of the pipeline network was tested on the problem of finding and synthesis of the shortest route for pumping of 12 fuel deliveries between suitable combinations of nodes. Every delivery was defined by the following items: source node, target node, fuel type and transported fuel quantity. The optimum routes were calculated by means of modified Dijkstra algorithm. The algorithm is based on creating of root trees for the shortest routes. For graphs with non-negative edge lengths, which is always valid for graphs described real pipeline networks, the computational complexity can be estimated as quadratic depending of the number of graph nodes. Therefore, it belongs to quick algorithms. Its computational complexity can be improved more by use of suitable data structures, but it pays only for extensive graphs containing more than 100 nodes. However, this is not the case of real pipeline networks for fuel transportation. Considering the fact that some branches of the network are one-way, the pipeline network must be described by means of directed graph. The two-way branches created in it a pair of reversely oriented edges while the one-way branches one edge only.

During optimization of pumping the optimum route was transformed from directed graph into pipeline network as the optimum pipeline route. At the same time the direction of flow in pipeline was determined. In the simulation element *Pipe* direction of flow is not determined by input and output rules but by the sign of flow. After finding serial numbers of pipes the names of all pipes creating the shortest sequence of pipes – the optimum pipeline route for realization of the order were put together. Thereafter these names were inserted into variables *PipeIn* and *PipeOut* of the *Name* type. The name variables are

used in the input rules *Connect with PipeIn_k* and in the output rules *Connect with PipeOut_k* for all pipelines creating the optimal pipeline route according to the following scheme (Fig. 2).



Obr. 1 Simulační model jednoduché potrubní sítě
Fig. 1 Simulation model of a simple pipeline network

k	$PipeIn_k$	$PipeOut_k$
1	Source	Pipe ₁
2	Pipe ₁	Pipe ₂

n	Pipe _{$n-1$}	Sink

Obr. 2 Formy dopravních reťazcov v síti FV
Fig. 2 The forms of transport chains in the FV network

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.

During the synthesis of the optimal pipeline route, it is also checked if the delivery is realizable. The conditions necessary for realization of a delivery are the following:

1. sufficient quantity of fuel is available in the source store or input node of pipeline network system,
2. creating the free pipeline route is possible,
3. in the target store there is either a tank for the same type of fuel with sufficient storage room or an empty universal tank.

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.

5 VÝSLEDKY SIMULACE POSTUPNÝCH DODÁVEK PODLE OBJEDNÁVEK

Plán čerpání se skládal z všech možných dodávek různých pohonných hmot ve stejném množství ze všech možných zdrojových skladů nebo vstupních bodů 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 m^3 za jednotku simulačního času. Vzdálenosti jednotlivých uzlů orientovaného grafu popisujícího potrubní síť odpovídaly parametrům jednotlivých potrubí. Výsledky simulačních experimentů byly v úplném souladu s výsledky numerických výpočtů.

6 ZÁVĚRY

Potrubní síť 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

5 RESULTS OF SIMULATION OF SUCCESSIVE SUPPLIES ACCORDING TO ORDERS

Plan of pumping consisted of deliveries of different fuels in the same quantity from selected source stores or input nodes of pipeline system into selected target stores for which pipeline routes were possible to create. Rate of pumping was set to 10 m^3 in the simulation time unit. Distances of nodes of the graph describing the pipeline network correspond to the parameters of the real pipelines. Results of simulation experiments are in full agreement with the results of calculations.

6 CONCLUSIONS

Pipeline networks for transportation of continuous media belong to important elements both logistical and technological systems. Mathematical models are applicable only with difficulties particularly because of problems with determination of parameters of both pipelines and flowing media. Besides, these models are for practical application too detailed. For most economic and operating calculations of real pipeline networks, assumptions of plug and laminar flow and qualified guesses of flow velocity are sufficient. The described simulation model of the pipeline network and simulation experiments with it prove that Witness 2007 simulation program and its continuous elements are a suitable tool for modelling of such systems. For calculation of the shortest pipeline routes among graph nodes, a complicated graph algorithm is applied. Implementation of complex abstract algorithms is proved possible in Witness simulation program with poor means of its WCL language (data structures, control commands). However, it is recommendable to debug and verify algorithms in more suitable surroundings. That is why all graph algorithms were prepared in MATLAB computing system.

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.

Výsledky simulačních experimentů ukázaly plnou shodu s výsledky numerických výpočtů. 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. Určité problémy se objevily v souvislosti s vizualizací toku média v rozsáhlé síti, protože rozsáhlé sítě již vyžadují možnost zobrazovat potrubí i s diagonální orientací, ne pouze vertikální a/nebo horizontální.

PODĚKOVÁNÍ

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

Results of simulation experiments are in the full agreement with the results of numerical calculations. In the large-scale pipeline networks it is necessary to use the push medium. The pipeline system in inactive state and with no pumping is filled up with this medium.

ACKNOWLEDGMENTS

The work has been supported by the fund No MSM 6046137306 of Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic. This support is very gratefully acknowledged.

Literatúra / References

- [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

Recenzia/Review: *prof. Ing. Dušan Malindžák, CSc.*