

Vladimír STRAKOŠ\*

## OPTIMALIZACE INŽENÝRSKÝCH SÍTÍ

### OPTIMIZATION OF ENGINEERING NETWORKS

#### Abstrakt

Tento článek se zabývá návrhem, provozem a řízením dopravy v inženýrských sítích s využitím moderních prostředků výpočetní techniky. Základem tohoto příspěvku je to, že máme k dispozici vlastní dobrý program GRAFSIT (Kolomazník) který můžeme využívat jak pro návrh větví inženýrských sítí, tak parametry zdrojů a s využitím dalších možností programu do jisté míry optimalizovat provoz v těchto sítích a to všech typů, t.zn. elektrického rozvodu, vodovodního nebo plynového rozvodu odpadní kanalizace apod.. Závažnost této problematiky vyplývá hlavně ze současné situace, kdy život člověka ve městech a i na vesnicích závisí na provozu několika inženýrských sítí. V takovém případě je optimalizace provozu i uložení sítí do terénu velmi významná z mnoha důvodů. Příspěvek je motivován programem GRAFSIT, který byl na technické universitě zpracován v rámci výzkumných prací při výborné spolupráci pracovníků institutu ekonomiky a systémů řízení a katedry matematiky a deskriptivní geometrie. Vzhledem k tomu že tento návrh vznikl při řešení výzkumných úkolů na institutu v poslední době, nebylo možné připojit žádný praktický příklad.

#### Abstract

This article deals with the proposal, operation and control of transport in engineering networks with the utilization of modern means of computer technique. The basis of this contribution is the fact that we have for disposal our own good program GRAFSIT (Kolomazník) which we can utilize both for the proposal of engineering networks branches and for parameters of sources and with the utilization of further program possibilities we can, to a certain extent, optimize the operation in these networks, and namely networks of all types, i.e. electrical distribution, water main or gas distributions systems, systems of waste canalization etc. The importance of these problems follows mainly from the existing situation when the man's life in towns but also in the countryside depends on operation of several engineering networks. In such a case the optimization of the operation but also the location of the networks in the terrain is very important for many reasons. The contribution is motivated by the program GRAFSIT which was worked out in Technical University in the framework of research works in cooperation of the workers of the Institute of Economics and Management Systems and Department of mathematics and descriptive geometry.

**Key words:** modelling, GRAFSIT, networks.

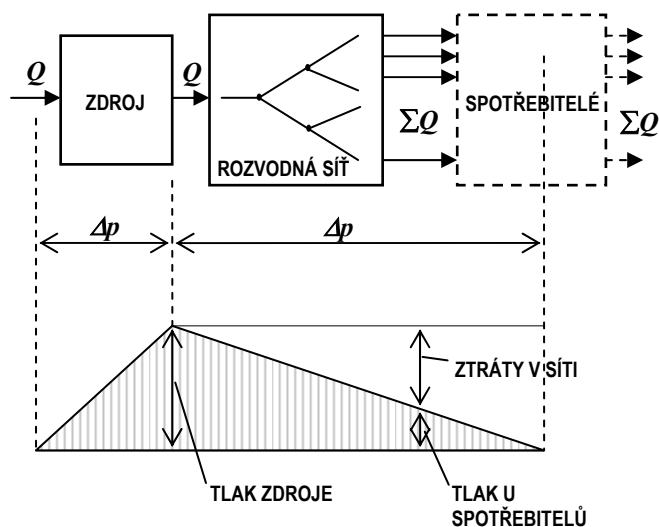
#### Úvod

Potrubní a elektrické rozvody jsou základem existence člověka ve městech. Jejich projektování je značně složité a náročné na zkušenosti projektanta, zvláště když by se měly zohlednit minimální nároky na provoz těchto rozvodů a stanic, které dopravují do těchto rozvodů příslušné medium jako a př. plyn, vodu, teplou vodu, vodu pro topení, elektrickou energii apod. Dnešní výpočetní technika dovoluje řešit řadu problémů spojených s takovým návrhem. V tomto příspěvku je upozornění na možnosti využívání výpočetní techniky při projekci inženýrských sítí, při jejich rekonstrukci, při rozšiřování sítí a nebo při její redukci na menší počet

---

\* Prof. Ing., DrSc., Institut ekonomiky a systémů řízení, HGF VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15,  
708 33 Ostrava-Poruba, e-mail: vladimir.strakos@vsb.cz

větví. V následujícím textu začneme úvahy od počátku jako bychom navrhovali nový rozvod např. plynu a přitom budeme využívat program, kterým vytvoříme model statických vlastností navrhovaného systému.



Obr. 1: Zdroj-sít-spotřeba

Základem všech úvah v tomto článku je známa autorova redukce takových systémů na tři podsystémy a to je podle obr. 1 zdroj – síť – spotřeba. Pojem „zdroj“ autor používá pro kompresorové stanice plynu, čerpací stanice vody, výměňkové stanice pro rozvod tepla ale i pro důležitou rozvodnu el. energie apod. Pojem síť používá pro rozvodné nebo i sběrné sítě potrubní, kanalizační nebo kabelové.

Pro návrh ale i pro provoz takového systému jsou samozřejmě významné statické vlastnosti jednotlivých prvků. Samozřejmě jsou významné i dynamické vlastnosti, ale pro náš pohled na IS kde uvažujeme v časové dekompozici nikoliv řízení v reálném čase, ale operativní a taktické řízení je možno dynamické vlastnosti zanedbat.

Návrh a řízení zdroje a sítě je v působnosti dodavatele a to je v tomto případě náš objekt, zatímco spotřeba je věcí spotřebitelů, což je pro řízení IS vlastně, v názvosloví automatizace, poruchová veličina.

## Životnost navrhovaného zařízení

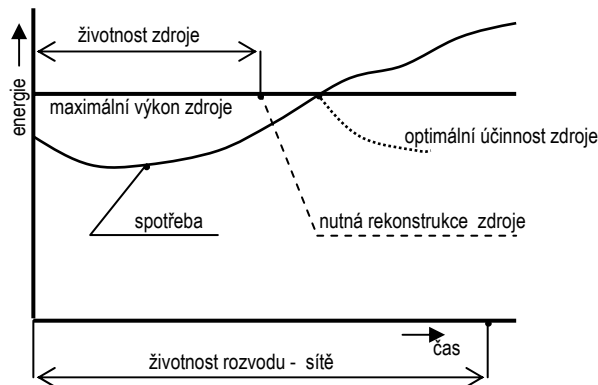
Při návrhu nové IS, při jejím rozšiřování nebo při rekonstrukci je ze systémového hlediska začít podle obr. 1. Nejprve analyzujeme vlastnosti spotřebičů a pak vlastnosti zdrojů. Základním kritériem pro volbu struktury rozvodu od zdrojů ke spotřebitelům je rozložení zdrojů a rozložení míst spotřeby. Místem spotřeby přitom myslím skupinu domů, sídliště, větší podnik apod. Rozložení těchto míst v mapě je základním hlediskem a prvním krokem který se musí udělat a také se samozřejmě dělá:

- Do mapy oblasti zakreslíme místa zdrojů (na př. místa napojení na stávající rozvod, výměňková stanice apod.) a místa spotřeby kde se bude teplo, voda, plyn, nebo energie využívat. Pro objasnění našich úvah budeme v dalším textu uvažovat 3 zdroje a 3 místa spotřeby, což může být např. při napojení městečka na rozvod vysokého napětí ve třech místech.
- Rozmístění zdrojů a míst spotřeby převedeme také do katastrální mapy. Nejlépe jako samostatnou mapovou vrstvu v některém programu GIS.

Když jsme si vytvořili přehled o rozmístění zdrojů, tak dalším krokem je stanovení kapacity zdrojů, a to jak hodinovou kapacitu v době realizace, tak dlouhodobou perspektivu minimálně na dobu životnosti použitých zařízení, což jsou výměňkové stanice, kompresory plynu, potrubí apod. Dále určíme také perspektivu růstu nebo poklesu spotřeby spotřebitelů jako např. možnosti rozšiřování výroby, změny technologie, inovace výrobků apod.

Takovýmto způsobem dostaneme jako výsledek významný graf na př. podle obr. 2 ze kterého snadno vidíme kdy pravděpodobně energie ze zdrojů (zdroje) nestačí pokrýt spotřebu a kdy budeme muset řešit jak se budeme dále postupovat. Rekonstrukci zdroje nebo jednoduše omezením dodávky spotřebitelům bez náhrady vzniklého rozdílu.

Na základě těchto úvah získáme, s určitou pravděpodobností, životnost navrhovaného nebo projektovaného zařízení a můžeme postupovat dále.



Obr. 2: Charakteristické veličiny pro provoz inženýrských sítí

## Volba sítě

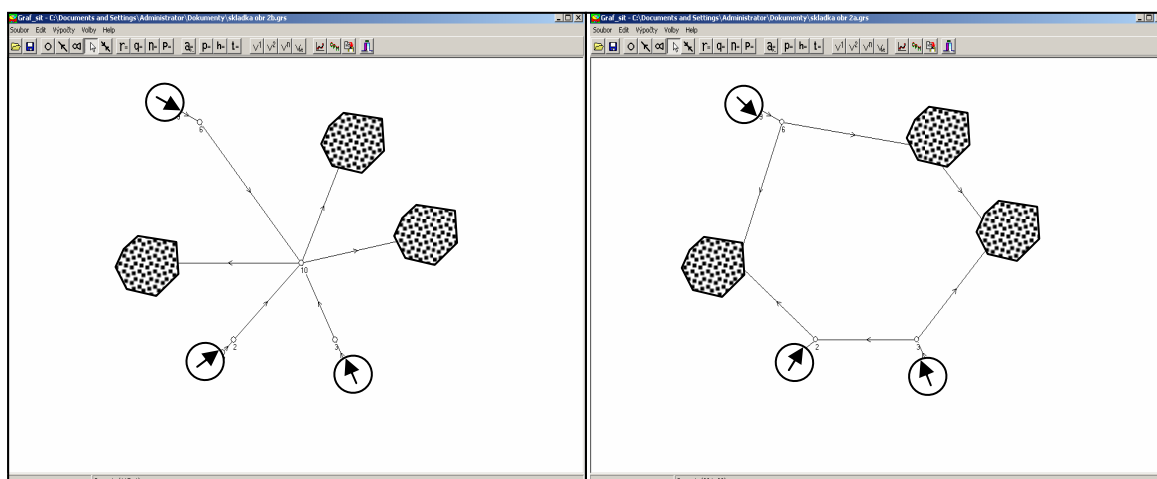
Známe-li zdroje a místa spotřeby můžeme navrhnout potrubní nebo kabelovou síť která bude spojovat místa zdrojů s místy spotřeby. Ať již navrhujeme nový rozvod v sídlišti, nebo rozšíření staršího rozvodu bude vhodné navrhnout několik variant sítí, a to, v první fázi bez ohledu na katastrální mapy tzn., bez ohledu na řešení problému s majiteli pozemků apod. Na obr. 3. je příklad takových variant vytvořených s využitím programu GRAFSIT vytvořeným na VŠB-TU Ostrava [1].

Tímto rozhodnutím začíná řešení optimalizační úlohy se dvěma kritérii, a to :

- minimální náklady na provoz a přepravu energie,
- minimální náklady na výstavbu systému.

Sklobení těchto dvou kritérií není jednoduchou záležitostí. Začneme nejprve řešením minimálních nákladů na přepravu plynu.

Podle variant rozvodu plynu které jsme zvolili jako např. v obr. 3 a podle požadavků na to jaký tlak nebo napětí se požaduje v koncových bodech sítě a také podle kapacity zdrojů, zvolíme, nebo od výrobců zjistíme (zatím předběžně) charakteristiky zdrojů a ty použijeme v modelu rozvodu. Podle předpokládaného denního odběrového diagramu vybereme nejnepříznivější situaci tzn. když součet spotřeb jednotlivých zdrojů je největší. Pokud takové množství energie ze zdrojů máme k dispozici tak pokračujeme volbou průměrů potrubí kanálů nebo kabelů.



Obr. 3: Dva příklady volby sítě se třemi zdroji a třemi místy spotřeby

Průměr potrubí nebo kabelů určíme buď ze zkušeností, podle norem, nebo podle literatury a to tak, že zvolíme větší průměry a ty potom v průběhu simulace optimalizujeme. Jakmile zvolíme průměry potrubí, tak

odhadneme množství proudící v těchto větvích a podle informací od výrobců odhadneme tlak u zdrojů a tím můžeme vypočítat přibližné odpory větví které použijeme pro vytvoření modelu.

Odpory větví zadáme do sítě a programem GRAFSIT provedeme v každé variantě první výpočet rozdělení množství do větví v sítích. Po zhodnocení výsledků postupujeme tak, že na každé síti uděláme několik variant (to vyžaduje určitou zkušenost s řešením sítí) a vybereme tu, která nejlépe odpovídá našim představám, což ještě není ani náhodou optimální řešení.

Dalším krokem je opět práce s modelem, a to upřesnění požadovaného množství které chceme dodávat z jednotlivých zdrojů. To provedeme metodou CPM (Critical Path Method) což opět řešíme programem GRAFSIT [2]. Touto metodou – výpočtem určíme přesné odpory všech větví a z těchto odporů vypočteme zpětně průměry potrubí nebo kabelů a podle výrobce potrubí zvolíme vhodný průměr a u potrubí samozřejmě tloušťku stěny, ale ani to ještě není konečný návrh průměru potrubí nebo kabelů které pro rozvod použijeme.

Nyní se opět vrátíme k programu GRAFSIT a k vybrané síti do které teď již vložíme upřesněné odpory vypočtené podle předchozích kroků. Provedeme výpočet, zkontrolujeme zda ve větvích proudí potřebné „množství“, a jaká je tlaková nebo napěťová ztráta  $\Delta p$  v každé větvi. Toto je vidět na obr. 4 a takto můžeme vypočítat ztráty energie vznikající prouděním plynu v každé větvi, což je ztrátová energie:

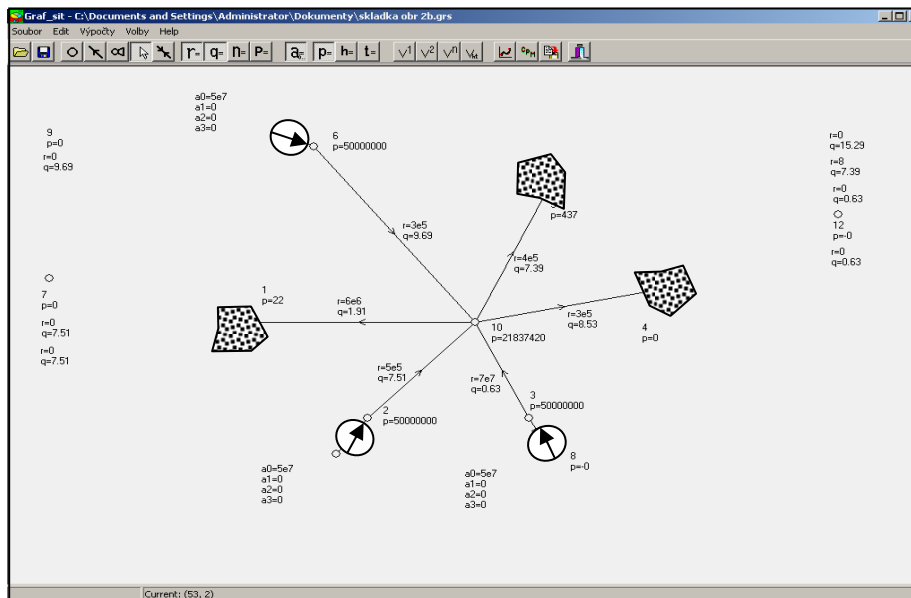
$$E_{ztr} = k \cdot \Delta p \cdot Q \quad [kWh; Pa; kg.s^{-1} \text{ nebo } V;A],$$

kde:

$k$  ... koeficient zahrnující použití vhodných jednotek,

$\Delta p$  .. tlaková nebo napěťová ztráta ve větvi,

$Q$  ... proudící množství.



Obr. 4: Tak vypadá řešení s tlaky zdrojů, tlaky v uzlech, odpory větví a průtoky ve větvích

Celkové ztráty energie potřebné pro rozvod energie ke spotřebitelům, což je zahrnuto také v příkonu zdrojů potřebného na přepravu energie, jsou pak dány součtem ztrát energií v jednotlivých větvích  $E_{i,ztr}$  a ztráty ve zdroji  $E_{z,zdr}$

$$E_{zdr,celk} = E_{z,zdr} + \sum E_{i,ztr} \quad [kWh].$$

Tato ztrátová energie a tedy náklady na provoz za jeden týden při průměrné spotřebě plynu u odběratelů budou

$$N_{zt} = 7.24 \cdot E_{zdr,celk} \cdot C_{el} \quad [Kč; kWh; Kč.kWh^{-1}],$$

kde

$N_{zt}$  ... hodinové náklady na el. energii potřebné pro dopravu,

$C_{el}$  ... cena za 1 kWh el. energie.

Nyní můžeme simulovat různé provozní situace tzn. zvyšovat nebo snižovat tlak u jednotlivých zdrojů a vypočítávat celkové náklady na provoz, zvyšovat a snižovat množství odebírané spotřebiteli a určovat tak

nejvhodnější – optimální parametry zdrojů pro provoz sítě. To znamená kolik energie by měly jednotlivé zdroje dodávat, aby v síti byly nejmenší ztráty a to nejenom v době zahájení provozu, ale i dlouhodobě.

Ted' již známe potřebné parametry zdrojů a nyní můžeme vybrat vhodné zdroje a to podle informací od dodavatelů. Taktó zjistíme provozní náklady  $N_p$  na provoz zdrojů a ty připočteme k nákladům na provoz sítě, takže celkové náklady na jednotku energie *zatím* budou

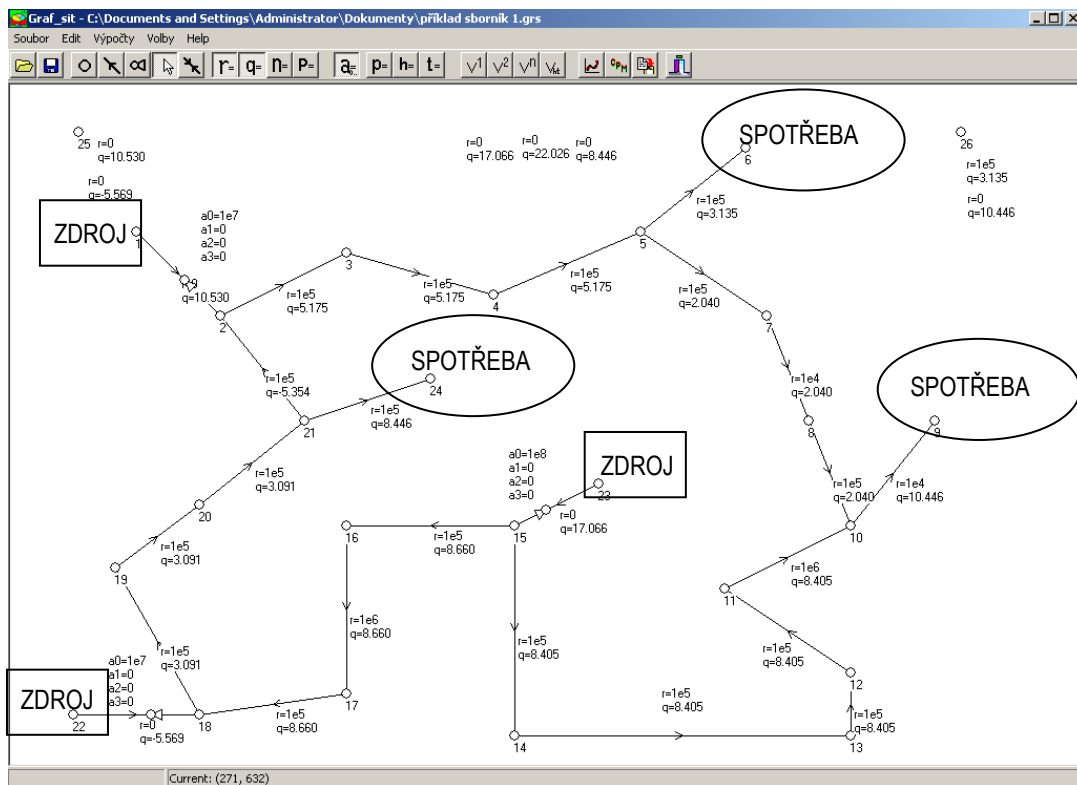
$$N_c = (N_{zs} + N_p) \cdot Q_c^{-1} \quad [\text{Kč}; \text{Kč.Nm}^{-3}],$$

ale to ještě není konečná a vůbec ne optimální hodnota.

## Návrh na uložení sítě do terénu

V předchozí části jsme určili všechny potřebné parametry pro optimální provoz sítě navržené v první fázi a uvažujeme, že to je síť se strukturou podle obr. 3 vpravo. Tuto síť však musíme uložit do terénu a pak její tvar v žádném případě nebude odpovídat. optimální síť podle původního návrhu, takže výsledky, které jsme doposud získali jsou optimální s hlediska provozu sítě, ale ne s hlediska minimalizace nákladů na uložení sítě do terénu.

Proto teď místa spotřeby a zdrojů zakreslíme do mapy terénu a podle různých hledisek vyplývajících z mapy pospojujeme podle toho jak předpokládáme že by mohly být větve uloženy do terénu. Tím se stane, že se větve rozdělí na několik sériových úseků a to tak, že jejich celkový odpor musí odpovídat celkovému odporu určenému v předchozí práci.



Obr. 5: Příklad řešení náhrady přímé větve větví upravenou podle možnosti výstavby

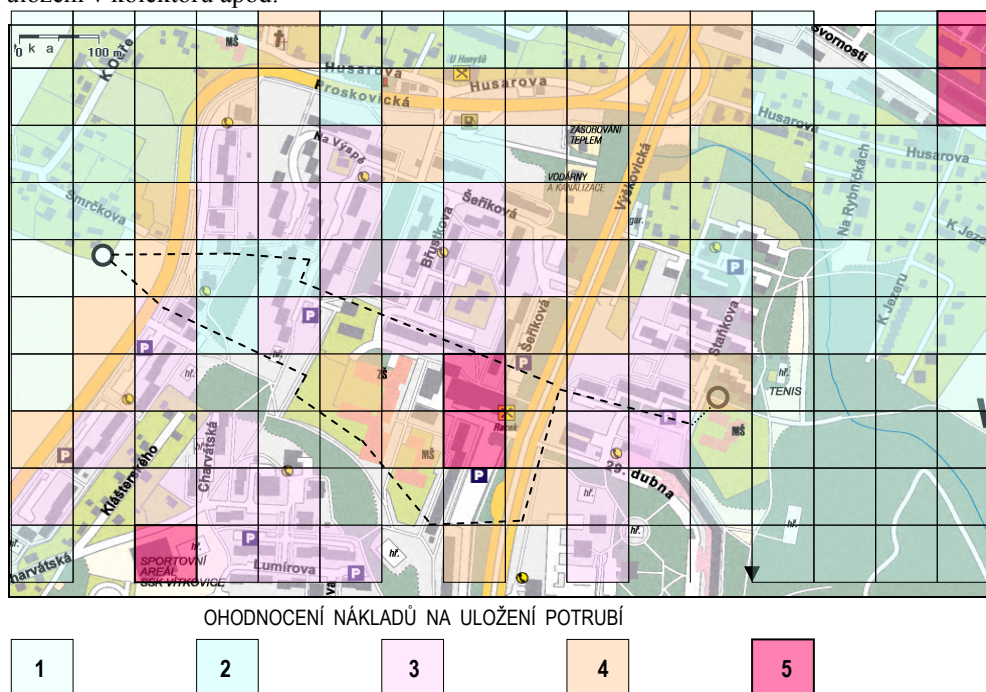
Opět pracujeme pomocí programu GRAFSIT [3] a redukuje větve na skutečný tvar v terénu jak je naznačeno jako příklad na obr. 5. Tzn. odpor větve rozložíme na několik sériových odporů o celkově stejném výsledném odporu, ale již ne o stejném průřezu jaký jsme používali předtím kdy jsme skutečnou délku větve neznali. Tím se nám proti našim výchozím předpokladům změní nejen délka větve ale tím i rychlosti proudění a tudíž i odpory stejně dlouhých úseků. Tuto úlohu můžeme řešit dvojím způsobem. Buď necháme v této větví stejný průměr jako byl navržen a pomocí programu zkontrolujeme jestli takový zásah nemá podstatný vliv na poměry v síti, což bude téměř vždy a nebo v některém úseku změním průměr potřebí což opět vyřešíme programem GRAFSIT. Výsledkem tedy bude síť uložena do mapy terénu s optimálními provozními náklady, ale zatím jsem neřešili náklady na uložení větví do skutečného terénu a proto pokračujeme dále.

## Volba trasy větví sítě v terénu

Podle předchozího postupu jsme zakreslili do mapy trasy potrubí které jsme určili, a to optimálně z hlediska spotřeby energie, optimálně hlediska spotřeby energie jsme navrhli zdroje a suboptimálně jsme zvolili průměry potrubí. Toto však není konečný závěr a znovu musíme začít s řešením další optimalizační úlohy, a to je volba uložení trasy – větví – potrubí do terénu vzhledem k minimalizaci nákladů na uložení.

V takovém případě postupujeme tak, že z literatury nebo z dřívějších projektů zjistíme náklady na uložení potrubí do:

1. výkopu u silnice nebo v ulici,
2. výkopu ve volném terénu,
3. při přechodu přes řeku, potok (vodoteč),
4. při křížování jiného vedení inženýrské sítě,
5. při uložení na povrchu ve volném terénu,
6. pro uložení v kolektoru apod.



Obr. 6: Příklad dvou možností uložení potrubí v terénu

Náklady na uložení závisí na tom, jak náročným územím trasa prochází. Do míst ohodnocených číslem 5 není možné potrubí uložit.

Pokud takové náklady známe, tak na mapu prostoru umístíme zdroje a spotřebiče (místa spotřeby) a na mapu transponujeme pravidelnou čtvercovou síť o vhodné velikosti hran. Např. v terénu zvolíme čtverce 10x10m. Podle mapy a sítě přiřadíme čtvercům náklady na uložení potrubí z jedné strany na druhou anebo z jednoho rohu do druhého jak je to naznačeno na příkladu v obr. 6.

Takto získáme čtvercovou síť ohodnocenou náklady na uložení potrubí do jednotlivých čtverců. Pak vhodnou metodou vyhledáme spojení zdrojů a míst spotřeby po čtvercích s minimálními náklady. Jako jedna z velmi vhodných metod pro řešení takové úlohy jsou genetické algoritmy (úloha obchodního cestujícího). Získáme výsledek, kterým bude struktura sítě která bude vyžadovat pro propojení zdrojů a míst spotřeby minimální náklady. Z předchozích simulací známe jaký průměr potrubí se musí ve větvích sítě použít, aby náklady na provoz sítě byly minimální. Vzhledem k tomu, že délky spojení jednotlivých míst se pravděpodobně budou lišit od předchozích záměrů, tak vzniknou rozdíly v trasách určených

- optimalizaci sítě podle minimálních nákladů na energii a
- optimalizaci sítě podle minimálních nákladů na uložení trasy.

Rozdíly mezi takto získanými trasami musíme řešit podle situace v terénu jak bylo naznačeno v předchozích částech a to i s ohledem na majetnické vztahy a jiné překážky jako např. rodinný domek, zahrada,

kde majitel nedovolí položit potrubí apod. Samozřejmě že se tím optimální řešení ke kterému jsme pracně dospěli dřívějšími pracemi poněkud naruší, ale máme již zpracován model a na něm zjistíme jak velká bude odchylka od optimálního řešení a rozhodneme, zda je zanedbatelná, nebo budeme hledat výše popsaným způsobem lepší řešení.

Po těchto úpravách získáme nejvhodnější strukturu sítě, nejvhodnější průměry potrubí nebo průřezy kabelů a můžeme zvolit nejvhodnější parametry zdroje které splní naše požadavky na rozvod příslušné „energie“.

## Závěr

V této části je popsán postup při optimalizaci inženýrských sítí s hlediska rozvodu energií od zdrojů do míst spotřeby tak, abychom mohli využít moderní metody současné vědy a prostředky výpočetní techniky. Jako v případě všech softwarových produktů je nezbytné porozumět vlastnostem tohoto programu a možnostem které je možné jeho pomocí řešit. Protože je tento program používán ve výuce studentů již několik let, tak bylo odstraněno mnoho nepřesností a tak je možné se s programem seznámit a pracovat pomocí Demo verze která je k dispozici na internetové adrese <http://vsb.hgf.cz/grafsit>.

Výše zmíněný program GRAFSIT umožňuje řešit velmi snadno jak elektrický rozvod tak i rozvod plynu, vody, rozvod tepla a to včetně tepelných ztrát a kvality izolace a nakonec i kanalizaci.

## Literatura

- [1] Strakoš, V., Kolomazník, I.: Modelling and Mine Power Networks Control. In *ICAMC'98, Vysoké tatry, Slovenská republika, ISBN 80-7099-367-7, 1998, s. 507-510.*
- [2] Kolomazník, I.: A Graphic Program for the Solving of Energy Networks. In *Mineral Raw Materials and Mining Activity of the 21<sup>st</sup> Centur, VŠB-TU Ostrava, Česká republika, ISBN 80-7078-854-2, 1998, s. 405-409.*
- [3] Strakoš, V., Kolomazník, I.: Modelling of Energetic Nets in Mines. In *Internatrion symposium ICAMC'2000, Tampere, Finsko, ISBN 951-22-5615-0, 2000, s. 47 – 56.*

## Summary

In this article the procedure in optimization of engineering networks is described, and namely from the viewpoint of the power distribution from the sources to the consumption points in such a way so that we could make use of modern method of the existing science and means of computer technique. As in case of all software products it is necessary to understand the characteristics of this program and possibilities which can be solved with the help of it. Because of the fact that this program has been utilized in teaching of students already for several years many inaccuracies have been removed and so it is possible to make acquaintance with this program and work with the help of Demo version which is for disposal on the Internet address <http://vsb.hgf.cz/grafsit>.

The above mentioned program GRAFSIT enables to solve very easily both the electrical distribution and the gas, water distribution, distribution of heat as well, and namely including heat losses and quality of insulation and, finally, also the canalization.

Recenzent: Prof. Ing. Karol Kostúr, CSc., Fakulta BERG, TU Košice