



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

**ALGORITMY ŘÍZENÍ VE VÝROBĚ
A ROZVODU TEPLA - VÝPOČTOVÝ
SOFTWARE PRO SIMULACI PROVOZU
ZOKRUHOVANÝCH TEPELNÝCH SÍTÍ**

disertační práce

**CONTROL ALGORITHMS IN HEAT
GENERATION AND DISTRIBUTION -
SOFTWARE FOR SIMULATION OF CIRCLE
HEAT NETWORKS OPERATION**

Doctoral Thesis

autor: *Ing. Michal PRINC*
školitel: *prof. Ing. Jaroslav BALÁTĚ, DrSc.*
studijní obor: *Technická kybernetika*
rok: *2006*

Děkuji mému školiteli prof. Jaroslavovi Balátěmu z Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za vedení mého doktorského studia, jeho odborné konzultace, cenné rady a pomoc při vypracování této disertační práce.

Zároveň děkuji zástupcům teplárenské společnosti United Energy, a.s. Most-Komořany za odborné informace z teplárenské praxe a za poskytnutí rozsáhlého množství provozních dat, která jsem mohl v této práci analyzovat a která mi umožnila demonstrovat praktické použití vzniklé aplikace.

Předkládaná práce byla také podporována grantovým projektem GAČR č. 101/01/0345 „Řídicí algoritmy vyšší úrovně pro řízení rozlehlých teplárenských soustav s vlivem na snižování cen energií a zlepšování životního prostředí“ a dále grantem Fondu rozvoje vysokých škol č. MŠMT G1 68/2001 „Vývoj výpočtového programu pro simulaci provozu tepelných sítí.“

Speciální poděkování patří také mé ženě Lence za obětavost a všestrannou podporu.

Ing. Michal Princ

Rožnov pod Radhoštěm, duben 2006

ABSTRAKT

Předkládaná disertační práce se zabývá modelováním a simulací tlakových, průtokových a teplotních poměrů v zokruhovaných tepelných sítích soustav centralizovaného zásobování teplem (SCZT). Předmětem práce bylo vytvoření výpočtového programu, který by umožnil na základě stanovených parametrů potrubní sítě, definovaných výkonů zdrojů a potřeb odběrů spotřebitelů určit rozložení tlaků, průtoků a teplot podél jednotlivých potrubí. Uvedený program lze aplikovat na jakoukoliv potrubní síť s jedním či více zdroji tepla, kde teplotonosným médiem je pára nebo horká voda.

Pro výpočet hmotnostních toků v jednotlivých větvích zokruhované tepelné sítě je použita metoda tzv. okruhových průtoků. Jedná se o analogii metody elektrických smyček používané v elektrotechnice. Elektrickému proudu zde odpovídá hmotnostní tok, napětí odpovídá tlak a elektrickému odporu odpovídá odpor hydraulický. Jestliže aplikujeme na definovanou síť 1. a 2. Kirchhoffův zákon, získáme soustavu nelineárních algebraických rovnic, jejímž řešením jsou sledované veličiny.

Uvedené výpočty mají svůj praktický význam nejenom při projekci rozvodných sítí, ale především při samotném provozu. Možnost simulace poměrů v síti pro různé výkony zdrojů nebo různé odběry spotřebitelů může být pro dispečery v teplárnách velmi užitečná. Z dosažených výsledků lze vysledovat jaké parametry bude mít proudící medium v různých místech potrubní sítě, jaký je smysl proudění v jednotlivých větvích a také jaké budou teplotní a tlakové ztráty v potrubích pro zadané odběry. Je možno také porovnávat hodnoty jednotlivých veličin v různých místech potrubní sítě a určit tak oblasti, v nichž nabývají svých mezních hodnot. V neposlední řadě lze s pomocí tohoto produktu řešit simulaci hydraulických a teplotních poměrů při eventuelním odpojování nebo připojování nového

spotřebitele a také při různých provozních stavech z hlediska odběrů v průběhu ročního období.

Součástí práce je i prezentace výsledků statických a dynamických simulací, jež byly pomocí vzniklého software provedeny. Jedná se o aplikaci uvedeného programu na dvě konkrétní tepelné sítě:

- Elektrárna Bohunice - Leopoldov, Hlohovec
- Litoměřice

ABSTRACT

The dissertation deals with the modeling and the simulation of hydraulic and heat proportions in district heating (DH) circle heat networks. To create a complex computational program for pressure, flow and temperature ratio simulations in heat networks was the main goal. The software calculates pressures, flows and temperatures in particular places in the network, then pressure and heat losses in particular pipelines. The calculation runs based on the defined network parameters, source delivery and consumer's demands. It can be applied to circle and radial heat supply networks with one or more heat sources, where steam or hot water as a heat-carrier medium can be used.

There was used the method of so called circle flow for calculating the mass flow in separate branches of circle piping system. It is an analogy of the method of loop current, which is used in electrotechnics. The mass flow corresponds here to the electric current, the pressure corresponds to the voltage and the hydraulic resistance corresponds to the electric resistance. If we apply the 1st

and 2nd Kirchhoff's Law to the defined heat network, we obtain the system of non-linear algebraic equations that are solved by means of numeric methods.

The stated calculations have their practical importance not only for planning of heat networks but above all in the operation itself. The possibility to simulate the proportions in the network for various operating conditions i.e. for various output of sources or for various loads of consumers and also monitoring time behaviour at changes of operating conditions is very useful for dispatchers in power and heating plants.

A key part of the dissertation is focused on results of static and dynamic simulations, which were made using the created software. It deals with the analysis of hydraulic and heat relations in the following real heat networks:

- DH Power Plant Bohunice - Leopoldov, Hlohovec (Slovak Republic)
- DH Litoměřice (Czech Republic)

Obsah

ABSTRAKT.....	3
ABSTRACT	4
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1 ÚVOD.....	16
2 STRUČNÝ PŘEHLED SOUČASNÉ SITUACE V PŘEDMĚTNÉ PROBLEMATICE	20
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	25
4 MATEMATICKO – FYZIKÁLNÍ ANALÝZA TEPELNÝCH SÍTÍ	26
4.1 Popis hydraulických poměrů v potrubním systému	26
4.2 Popis teplotních poměrů v potrubním systému.....	33
5 VÝPOČTOVÉ PRINCIPY	37
5.1 Princip výpočtu hydraulických poměrů	37
5.1.1 Metoda okruhových průtoků	37
5.1.2 Rozbor tepelné sítě z hlediska topologické struktury	43
5.1.3 Popis fází výpočtu hydraulických poměrů	49
5.2 Princip výpočtu teplotních poměrů	52
5.3 Stanovení průměrného dopravního zpoždění v tepelné síti a určení polohy referenčního bodu	55
5.4 Princip algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí ...	60
6 POPIS VYTVOŘENÉHO VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU PRO SIMULACI PROVOZU ZOKRUHOVANÝCH TEPELNÝCH SÍTÍ - SIMTS.....	63
6.1 Položka „Soubor“	65
6.2 Položka „Editace“	71

6.3 Položka „Výsledky“	73
6.4 Položka „Výsledky – Graf – Dynamika“	80
7 HLAVNÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	84
7.1 Využití při operativním řízení dodávky tepla horkovodem.....	84
7.2 Využití při optimalizaci provozu teplotárných soustav s více zdroji tepla.....	93
7.3 Další možnosti využití	97
8 REALIZOVANÉ VÝPOČTY PRO REÁLNÉ TEPLÁRENSKÉ SOUSTAVY	100
8.1 SCZT EBO - Leopoldov, Hlohovec.....	100
8.1.1 Výsledky výpočtu statických poměrů ve větvích.....	103
8.1.2 Výsledky výpočtu statických poměrů v uzlech	106
8.2 SCZT Litoměřice	109
8.2.1 Výsledky výpočtu statických poměrů ve větvích.....	113
8.2.2 Výsledky výpočtu statických poměrů v uzlech	117
8.2.3 Korekce a filtrace měřených dat	126
8.2.4 Topné charakteristiky	127
8.2.5 Analýza závislosti průměrného dopravního zpoždění a polohy referenčního bodu horkovodní sítě na čase.....	136
8.2.6 Dynamické simulace s výpočtovým programem SIMTS	140
9 ZHODNOCENÍ	147
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	149
SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ	153
CURRICULUM VITAE	157

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Rozdíl mezi klasickou kondenzační elektrárnou a teplárnou s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla.....	16
Obr. 2	Jednotlivé články teplárenských soustav.....	17
Obr. 3	Ukázka původní verze programu Stat v OS MS DOS – zadávání vstupních hodnot.....	21
Obr. 4	Ukázka původní verze programu Stat v OS MS DOS – prezentace výsledků	21
Obr. 5	Porovnání výsledků výpočtu ρ_s na mezi sytosti páry.....	31
Obr. 6	Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry	32
Obr. 7	Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry	32
Obr. 8	Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry	33
Obr. 9	Schéma jednoduché sítě.....	37
Obr. 10	Blokové schéma algoritmu MOP	42
Obr. 11	Blokové schéma algoritmu pro určení vektoru U	45
Obr. 12	Blokové schéma algoritmu pro určení incidenční matice B ..	48
Obr. 13	Celkové blokové schéma algoritmu pro určení hydraulických poměrů.....	51
Obr. 14	Blokové schéma algoritmu pro určení teplot.....	54
Obr. 15	Blokové schéma algoritmu pro určení polohy referenční bodu tepelné sítě	58
Obr. 16	Blokové schéma algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí.....	62
Obr. 17	Úvodní okno programu.....	64
Obr. 18	Standardní dialogové okno pro výběr vstupního datového souboru.....	65
Obr. 19	Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě textového souboru	68
Obr. 20	Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě xls souboru.....	69
Obr. 21	E/R (Entity/Relationship) diagram datové struktury	69
Obr. 22	Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě databázového mdb souboru.....	70
Obr. 23	Úvodní editační okno pro zadávání obecných parametrů potrubní sítě	72
Obr. 24	Editační okno pro zadávání parametrů jednotlivých větví sítě.....	72
Obr. 25	Editační okno pro zadávání parametrů jednotlivých uzlů sítě.....	73
Obr. 26	Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky - Tabulka	73
Obr. 27	Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů v tabelární formě – větve	75
Obr. 28	Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů v tabelární formě - uzly	75
Obr. 29	Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky – Graf – Statika	76

Obr. 30	Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů v grafické formě	77
Obr. 31	Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky – Výstup	78
Obr. 32	Ukázka uložení výsledků výpočtu statických poměrů v xls souboru	78
Obr. 33	Ukázka uložení výsledků výpočtu statických poměrů v txt souboru	79
Obr. 34	Ukázka způsobu uložení vstupních dat (aktualizovaných hodnot v daných časových okamžicích) pro účely sledování dynamiky horkovodní sítě	81
Obr. 35	Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky – Graf – Dynamika	82
Obr. 36	Vzhled obrazovky po vybrání jedné z položek v menu <i>Výsledky – Graf – Dynamika</i>	83
Obr. 37	Ukázka grafického zobrazení časových průběhů teploty ve vybraných uzlech 0, 6, 15	83
Obr. 38	Možné začlenění simulačního modulu do řídicího systému ..	86
Obr. 39	Algoritmus kvalitativně-quantitativního způsobu řízení výkonu horkovodu s horkovodními kotli jako zdroji tepla	87
Obr. 40	Ukázka idealizovaného průběhu topné charakteristiky	90
Obr. 41	Ukázka reálné topné charakteristiky zpracované z naměřených dat	90
Obr. 42	Využití programu SIMTS pro řízení dodávky tepelné energie do zokruhované horkovodní sítě v reálném čase	92
Obr. 43	Původní schéma SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	101
Obr. 44	Upravené schéma SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	101
Obr. 45	Statické poměry v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	103
Obr. 46	Vypočítané průtoky v jednotlivých větvích (1-33) SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	104
Obr. 47	Detail průtokových poměrů ve vybraných větvích 2-33	104
Obr. 48	Vypočítané rychlosti media v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	105
Obr. 49	Vypočítané tlakové ztráty v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	105
Obr. 50	Statické poměry v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	106
Obr. 51	Vypočítané hodnoty tlaku v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	107
Obr. 52	Vypočítané hodnoty teplot v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec	107
Obr. 53	Tlakový diagram přívodního potrubí EBO – Leopoldov, Hlohovec	108
Obr. 54	Výchozí přehledové schéma SCZT Litoměřice	109
Obr. 55	Popisové schéma tepelné sítě Litoměřice s očíslováním větví a uzlů	110

Obr. 56	Statické poměry v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice (část 1)	113
Obr. 57	Statické poměry v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice (část 2)	114
Obr. 58	Vypočtené průtoky v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice	115
Obr. 59	Vypočtené rychlosti media v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice	115
Obr. 60	Vypočtené tlakové ztráty v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice	116
Obr. 61	Statické poměry v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice (část 1)	117
Obr. 62	Statické poměry v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice (část 2)	118
Obr. 63	Vypočtené hodnoty teplot v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice	119
Obr. 64	Vypočtené hodnoty tlaků v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice	119
Obr. 65	Vypočtené hodnoty tlaků v relaci s výškovými poměry	121
Obr. 66	Tlakový diagram části horkovodní soustavy Litoměřice	122
Obr. 67	Grafické znázornění polohy referenčního bodu v horkovodní síti	123
Obr. 68	Hodnoty tlaků vypočtené pomocí programu SIMTS v relaci s hodnotami poskytnutými United Energy, a.s.	125
Obr. 69	Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 11. 12. 2003	137
Obr. 70	Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 27. 1. 2004	138
Obr. 71	Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 29. 8. 2003	139
Obr. 72	Dynamická simulace tlakových poměrů v okolí hydraulicky nejvzdálenějšího odběratele pro dny 3. - 5. 12. 2003	143
Obr. 73	Dynamická simulace průtokových poměrů ve větvích č. 1 a 57 pro dny 3. - 5. 12. 2003	144
Obr. 74	Dynamická simulace teplotních poměrů v uzlech č. 1, 2, 4, 6, 8, 9 a 11 pro dny 3. - 5. 12. 2003	145
Obr. 75	Dynamická simulace – velikost průměrného dopravního zpoždění pro dny 3. - 5. 12. 2003	146

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Výškové rozdíly jednotlivých uzlů SCZT Litoměřice vzhledem ke zdroji	120
Tab. 2	Výsledky statických výpočtů pro den 11. 12. 2003	137
Tab. 3	Výsledky statických výpočtů pro den 27. 1. 2004	138
Tab. 4	Výsledky statických výpočtů pro den 29. 8. 2003	139

SEZNAM SYMBOLŮ

symbol ***jednotka*** ***význam***

$\sum \xi$	[-]	součet koeficientů vnitřních odporů v uvažovaném úseku potrubí
λ	[-]	součinitel tření
ρ	[kg.m ⁻³]	měrná hmotnost proudící tekutiny
ρ_1	[kg.m ⁻³]	měrná hmotnost proudící tekutiny na začátku potrubí
ρ_2	[kg.m ⁻³]	měrná hmotnost proudící tekutiny na konci potrubí
ρ_s	[kg.m ⁻³]	střední hodnota měrné hmotnosti páry v úseku potrubí
λ_{iz}	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti izolace
λ_{tr}	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí
λ_z	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti půdy
α_v	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla na vnější straně potrubí
α_u	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně potrubí
$\Delta\vartheta$	[°C]	teplotní spád
η_c	[-]	účinnost čerpacího agregátu
at_z	[Pa]	absolutní tlak na prahu zdroje ve výchozím uzlu
b_{disp}^{ZDROJE}	[Kč/GJ]	dispečerský poměrný přírůstek nákladů zdroje pro výrobu jednotky tepla

symbol jednotka význam

b_{DOD}^{ZDROJE}	[-]	poměrný přírůstek spotřeby tepelného výkonu v palivu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W]
$b_{E,DOD}^{ZDROJE}$	[-]	poměrný přírůstek vyráběného elektrického výkonu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W] (u teplárny)
$b_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE}$	[-]	poměrný přírůstek spotřeby elektrického výkonu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W] (u výtopeny)
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita proudícího media
c _{PAL}	[Kč/GJ]	průměrná cena paliva potřebného pro výrobu jednotky tepla
c _E ^{DOD}	[Kč/GJ]	cena vyrobené jednotky elektrické energie dodané do elektrizační sítě (prodej elektřiny u tepláren),
c _E ^{SPOTŘ}	[Kč/GJ]	cena spotřebované jednotky elektrické energie odebírané z elektrizační sítě (nákup elektřiny u výtopen),
d	[m]	vnitřní průměr potrubí
d _{iz}	[m]	vnější průměr izolace
d _{iz}	[m]	vnější průměr izolace
d _u	[m]	vnitřní průměr potrubí
d _v	[m]	vnější průměr potrubí
e	[-]	váhový koeficient

symbol jednotka význam

ϵ_{s_1}	[Pa]	zvolená přesnost výpočtu tlakové difference okruhů
ϵ_{s_2}	[%]	zvolená přesnost výpočtu tlaku v uzlech
E_{Td}	[h]	průměrné dopravní zpoždění
h	[m]	hloubka uložení potrubí
Δh	[m]	výškový rozdíl mezi počátečním a koncovým průřezem potrubí
h_1	[m]	vertikální vzdálenost počátečního průřezu potrubí od zvolené horizontální úrovně
h_2	[m]	vertikální vzdálenost koncového průřezu potrubí od zvolené horizontální úrovně
H_i	[Pa]	činný tlak v i-té větvi
k	[m]	absolutní drsnost vnitřního povrchu potrubí
L	[m]	délka rovných částí potrubí
M, M_v	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok tekutiny potrubím
M_1	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok v 1. větvi,
M_2	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok v 2. větvi
n	[-]	počet odběratelů
p_1	[Pa]	statický tlak proudící tekutiny na začátku potrubí
p_2	[Pa]	statický tlak proudící tekutiny na konci potrubí
p_s	[Pa]	střední hodnota tlaku syté páry v uvažovaném úseku potrubí
Δp	[Pa]	tlaková ztráta v uvažovaném úseku potrubí
Δp_z	[Pa.m ⁻¹]	tlaková ztráta připadající na 1 m potrubí

symbol jednotka význam

$p_j^{(n)}$	[Pa]	tlak v j-tém uzlu při n-té vnější iteraci
$p_j^{(n+1)}$	[Pa]	tlak v j-tém uzlu při (n+1)-ní vnější iteraci
P_T	[W]	tepelný výkon horkovodu
$P_{\check{c}}$	[kW]	čerpací práce
$P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)}$	[MW]	množství dodávané tepelné energie z i-tého tepelného zdroje
\dot{Q}_{z1}	[W]	tepelná ztráta při nadpovrchovém uložení potrubí
\dot{Q}_{z2}	[W]	tepelná ztráta při podpovrchovém uložení potrubí
$Q(i)$	[t/h]	odběr jednotlivých odběratelů
$Q_{(zdroje)}$	[t/h]	celkový výkon zdroje (zdrojů zařazených do společné sítě)
R	$[m^2s^{-2}K^{-1}]$	plynová konstanta páry v potrubí
r	$[Pa \cdot s^2 \cdot kg^{-2}]$	hydraulický odpor potrubí
r_i	$[Pa \cdot s^2 \cdot kg^{-2}]$	hydraulický odpor i-té větve
s_{iz}	[m]	tloušťka izolace
s	[h]	směrodatná odchylka dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů
S	$[m^2]$	průtočný průřez potrubí
t_v	$[^{\circ}C]$	teplota okolního vzduchu (venkovní teplota)
t_u	$[^{\circ}C]$	teplota teplotonosného media
t_{uk}	$[^{\circ}C]$	teplota proudícího media na konci uvažovaného úseku potrubí

symbol jednotka význam

t_{uz}	[°C]	teplota proudícího media na začátku uvažovaného úseku potrubí
t_{uk1}	[°C]	teplota media přitékajícího z 1. větve
t_{uk2}	[°C]	teplota media přitékajícího z 2. větve
t_z	[°C]	teplota půdy
T_d	[h]	dopravní zpoždění jednotlivého spotřebitele od zdroje
T_s	[K]	střední teplota páry v úseku potrubí
U_L	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	délkový koeficient prostupu tepla
v	[%]	variční koeficient vyhodnocený při statistické analýze dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů
w	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění
w_1	[m.s ⁻¹]	rychlost proudící tekutiny na začátku potrubí
w_2	[m.s ⁻¹]	rychlost proudící tekutiny na konci potrubí

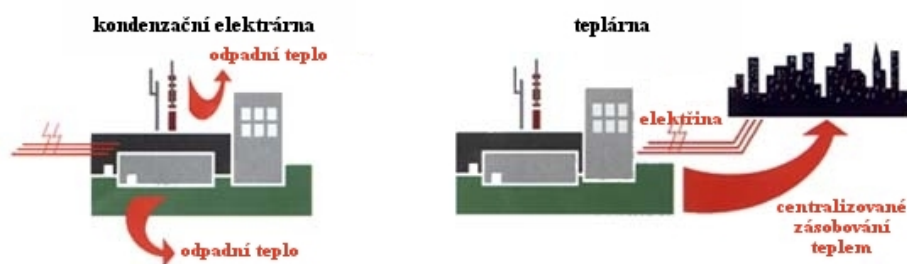
V textové části jsou dále použity tyto zkratky:

MOP	metoda okruhových průtoků
SCZT	soustava centralizovaného zásobování teplem
CHP	Combined Heat and Power Generation
DH	District Heating

1 ÚVOD

Předmětem mého doktorského studia ve studijním programu „Chemické a procesní inženýrství“, oboru „Technická kybernetika“ bylo studium algoritmů řízení ve výrobě a rozvodu tepelné energie. Tematicky spadá předkládaná disertační práce do oblasti teplárenství, které je nedílnou a významnou součástí energetického sektoru hospodářství. Jako prostředek k úspornému využívání primárních paliv a energií přináší nemalé efekty v oblasti ekonomiky i ochrany životního prostředí a může přispívat k životní úrovni a spokojenosti obyvatelstva. Vzhledem ke stále rostoucím cenám energií proto neustále nabývá na významu.

Podstata teplárenství spočívá v kombinované výrobě elektřiny a tepla (Combined Heat and Power – CHP), což je proces přeměny energie, při kterém se současně produkuje elektřina a užitečné teplo. Zatímco v klasické kondenzační elektrárně dochází pouze k výrobě elektřiny a odpadní teplo je mařeno v chladicích věžích, v teplárenství je odpadního tepla využíváno a dálkově se jím zásobují odběratelé (Obr. 1). Tím je zajištěno racionální využívání primárních energetických zdrojů.



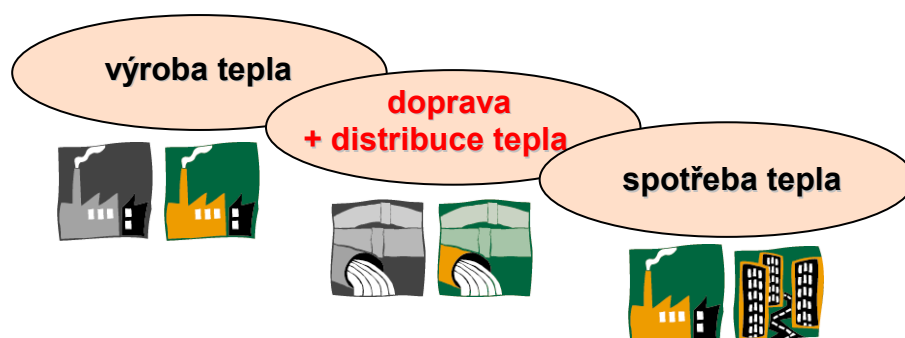
Obr. 1 Rozdíl mezi klasickou kondenzační elektrárnou a teplárnou s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla

Zásobování teplem je možno definovat jako uspokojování potřeb tepla pro vytápění, větrání, klimatizaci, ohřev teplé užitkové vody a pro

technologické účely. V porovnání s lokálním vytápěním má centralizované zásobování teplem (District Heating) řadu významných výhod, např.:

- vykazuje lepší energetickou účinnost
- umožňuje využívání horších druhů paliv
- zlepšuje čistotu ovzduší, neboť jednak zmenšuje celkovou spotřebu paliva a také umožňuje ve velkých centralizovaných zdrojích uplatnit všechny moderní metody boje s exhalacemi
- zlepšuje hygienu a dává větší komfort spotřebitelům, apod.

Z hlediska systémového přístupu můžeme chápat teplárenské soustavy jako technologické řetězce skládající se ze tří základních článků, jak je naznačeno na Obr. 2:



Obr. 2 Jednotlivé články teplárenských soustav

Ve své disertační práci se soustředuji na druhý článek tohoto technologického řetězce, a sice na rozvodné tepelné sítě, které jsou prostředkem pro dopravu a distribuci tepelné energie směrem od výrobce (teplárny, elektrárny, výtopny) ke koncovému spotřebiteli (obytné jednotky, občanská vybavenost, průmyslový odběr, přípravny teplé užitkové vody). Kromě jednoduchých radiálních sítí se v praxi velmi často vyskytují složitější zokruhované tepelné sítě, jak parní tak horkovodní, které mohou zahrnovat několik tepelných zdrojů a velké množství odběratelů. Provoz a řízení takových teplárenských systémů je komplikovaná činnost, obzvláště v případě rozsáhlých

zokruhovaných sítí. K tomu, aby takové soustavy bylo možno efektivně řídit, je nejprve nutné co nejlépe poznat jejich vlastnosti a chování v různých provozních situacích.

Pro tyto účely bylo vhodné pracovat na vývoji výpočtového programu sloužícího pro simulaci statických a dynamických vlastností zokruhovaných tepelných sítí. Konkrétně vznikl software, jenž umožňuje pro obecně strukturalizovanou tepelnou síť vypočítávat parametry teplotního média (teplota, tlak, průtok,...) v definovaných místech tepelné sítě, a to při různých výkonech kooperujících zdrojů a různých odběrech jednotlivých konzumentů.

Uvažovaná práce spadá do koncepce řešení „Návrhu řízení rozlehlých teplotenských soustav“, který je dlouhodobě řešen pod vedením školitele a který byl v letech 2001 – 2003 finančně podporován Grantovou agenturou České republiky (Grant č. 101/01/0345 - „Cost Effective and Environmental Operation of District Heating Systems by means of Advanced Control Algorithms“). Současně byla práce na vývoji samotného výpočtového programu pro simulaci provozu tepelných sítí podporována také Fondem rozvoje vysokých škol (MŠMT G1 68/2001). Zájem o výsledky projeví energetické podniky, navázána je perspektivní spolupráce s United Energy, a. s. Most - Komořany, Elektrárnou Hodonín, Teplárnou Otrokovice a Teplárnou Olomouc.

Práce je rozdělena do 9 kapitol, přičemž teoretické základy jsou podány v kapitolách 4, 5 a dosažené výsledky a výstupy disertační práce jsou popsány v kapitolách 6, 7 a především v odstavci 8. V první teoretické kapitole (č.4) jsou položeny základy matematicko-fyzikální analýzy potřebné pro statické řešení hydraulických a teplotních vlastností tepelných sítí včetně popisu zavedených zjednodušujících předpokladů. V druhé teoretické kapitole (č.5) je dále naznačen způsob výpočtu hydraulických poměrů pomocí metody

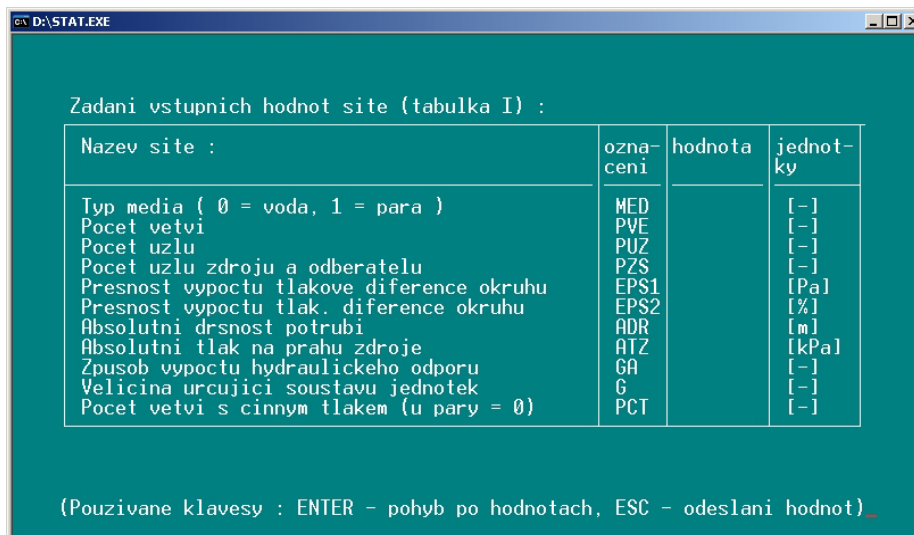
okruhových průtoků, způsob výpočtu teplotních poměrů, popis algoritmu pro určení polohy referenčního bodu a také popis algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí. Podrobným popisem vzniklého výpočtového programu pro simulaci provozu zokruhovaných tepelných sítí se zabývá kapitola 6, přičemž rozbor hlavních možností jeho využití je uveden v následující kapitole 7. S popisem výsledků dosažených při aplikaci uvedeného programu na dvě konkrétní tepelné sítě pak seznamuje kapitola 8. Jedná se o aplikaci výpočtů na SCZT EBO - Leopoldov, Hlohovec a SCZT Litoměřice (SCZT značí soustavu centralizovaného zásobování teplem).

2 STRUČNÝ PŘEHLED SOUČASNÉ SITUACE V PŘEDMĚTNÉ PROBLEMATICE

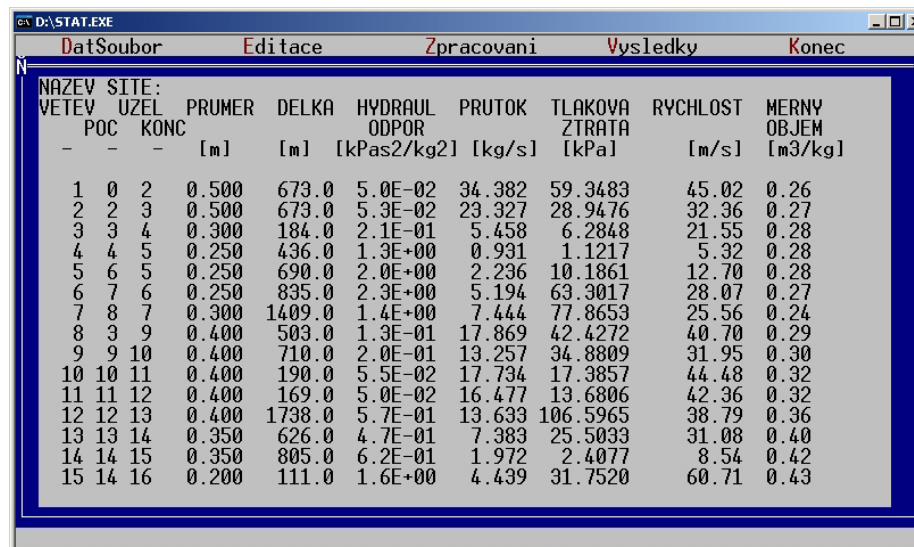
Realizace výpočetního programu vychází z výsledků několikaletého pracovního úsilí, které bylo započato již roku 1980. VUT v Brně tehdy převzalo od EGÚ Praha (od Ing. Pavla Kratochvíla, CSc.) jádro programu pro výpočet hydraulických poměrů v tepelných sítích metodou okruhových průtoků [21] a Josefa Šnajdar ve své diplomové práci pod vedením prof. Balátě poprvé řešil statické poměry v brněnské zokruhované tepelné síti. Tématika byla v letech 1982 – 1992 dále rozpracovávána v diplomových pracích vedených prof. Balátě a Ing. Beránkem, přičemž pozornost byla soustředěna především na úpravy a přepisy programu do nově vznikajících programovacích jazyků, které vyžadovala výpočetní technika ve své době (Fortran apod.). Na FT ve Zlíně poprvé řešila danou problematiku Koutná [20], na jejíž diplomovou práci jsem v roce 1999 navázal.

Práci jsem převzal ve stádiu, kdy existovala verze pro MS DOS (viz Obr. 3, 4). Zacházení s programem bylo značně uživatelsky nepohodlné a vyskytovala se v něm spousta chyb. Mým přínosem bylo přepracování staré verze programu do nové podoby, běžící pod OS Windows. Program jsem rozšířil o výpočty teplotních poměrů v sítích, které doposud chyběly. Dále byl program doplněn o výpočet dopravních zpoždění a navržena metodika hledání polohy referenčního bodu horkovodní sítě, což ve výsledku umožňuje sledovat dynamiku těchto tepelných sítí. Toho je možné využít při řízení dodávky tepla jak je popsáno v kapitole 7.1. Vedle využití v řízení byly navrženy a popsány i principy, které využívají vzniklého nástroje v optimalizaci provozu teplárenských soustav s více zdroji tepla (viz kapitola 7.2). Nemalým zásahem do programu byly také

úpravy možností v zadávání a správě vstupních dat, jakož i možnosti prezentace a uchovávání dosažených výsledků – vedle původního textového souboru bylo umožněno uchovávat vstupní data i výsledky výpočtů v dnes již standardních formátech aplikace MS Excel (*.xls) a MS Access (*.mdb).



Obr. 3 Ukázka původní verze programu Stat v OS MS DOS –
 zadávání vstupních hodnot



Obr. 4 Ukázka původní verze programu Stat v OS MS DOS –
 prezentace výsledků

Při zpracovávání literární rešerše, týkající se předmětné problematiky, jsem se seznámil s pracemi několika autorů, pocházejících převážně ze severovýchodních zemí. V těchto zemích jako je Dánsko, Švédsko či Norsko je dálkové vytápění velmi rozšířené a na velmi vysoké úrovni, což je jistě spojeno s širokou podporou tohoto oboru. Za těchto podmínek pak vzniká dobré zázemí pro výzkum, vývoj a implementaci nových přístupů a řešení. Publikovány byly nejenom práce popisující přímo modelování a simulace chování tepelných sítí [24], [40], ale také práce týkající se zjednodušování a agregace dynamických simulačních modelů tepelných sítí [23], [24], optimalizace provozu teplárenských soustav s využitím výše zmíněných modelů [7], [41], či práce popisující využití vytvořených modelů pro nově navrhované strategie řízení teplárenské soustavy jako celku [40]. Z výše uvedeného výčtu mě zaujaly především práce [7], [40], ve kterých se autoři věnují modelování tepelných sítí a popisují své způsoby výpočtu sledovaných ukazatelů (průtoky, tlaky, teploty). V [7] je např. využívána metoda uzlů (node method), při níž je tepelná síť reprezentována počtem uzlů, jejich spojeními a přiřazenými technickými informacemi jako je tepelná kapacita a průměry potrubí. Podstatou této metody je sledovat, jak dlouho je množství vody, které ve sledovaný okamžik přitéká do uzlu, na cestě z předchozího uzlu. Ve [40] je popsána metodika výpočtu neznámých průtoků v síti s využitím Kirchhoffových zákonů a teorie grafů. Lze konstatovat, že svým přístupem založeným na využití analogie proudění teplotního média s analogií elektrického proudu je tato práce blízká metodě okruhových průtoků, popsané v této disertaci. Rozdílný je ovšem způsob řešení soustavy rovnic vzniklých aplikací 1. a 2. Kirchhoffova zákona. Společným rysem všech výše uvedených referencí je soustředěnost pouze na horkovodní systémy bez zaměření na parní rozvody, což je dáno tím, že jsou v severovýchodních zemích nejvíce rozšířeny právě horkovodní systémy.

Vedle prací pocházejících z Evropy jsem při rešeršní činnosti narazil také na některé práce čínských autorů, např.:

Tian Zi-Ping, Bao Fu-Min, Real time simulation in computer for oversize heat network. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, vol.34, no.4, p.486-90.

Zhang Zhijun, Xu Xiangdong, Study and application of heat network optimal monitoring systems. *Journal of Tsinghua University*, 1999, vol.39, no.3, p.53-55.

Podle anotací se čínští autoři zabývají velmi podobným tématem, ovšem nebylo možné porovnat jejich přístupy k řešení dané problematiky vzhledem k absenci plných verzí článků ve světových databázích a vzhledem k jazykové bariéře (články jsou psány v čínštině). Uvedené reference však dokladují, že sledovaná problematika je aktuální v celosvětovém měřítku a je žádoucí se jí v dnešní době zabývat.

Simulací statických a dynamických vlastností tepelných sítí se zabývaly také některé disertační práce vypracované na VŠB-TU v Ostravě. Velmi podobné téma zpracoval Kolomazník [18], který se ovšem nesoustředil na tepelné sítě, ale svou pozornost věnoval zkoumání vlastností sítí v širokém slova smyslu (rozvody vody, elektřiny, plynu, kanalizace, ústřední vytápění, větrání,...). Jeho výpočtový nástroj, který ve svém jádře využívá tzv. „metody kritické cesty“ je určen obecně pro jakékoliv zokruhované sítě, ve své práci se však autor soustředil především na elektrické a větrné sítě v dolech.

Možný přístup k modelování energetických sítí a simulaci jejich chování přináší práce Macháčka [26], jenž využívá grafové modely a teorii grafů. Přesto, že se zde zmiňuje o modelování tepelných sítí, výsledky práce byly aplikovány pouze na elektrizační soustavu,

konkrétně na reálnou síť VVN. Při modelování tepelných sítí lze také využívat teorii stochastických sítí, jak je naznačeno v práci [19].

Vedle teoretických prací z oblasti modelování potrubních systémů [3], [11], [13], [28], [30] jsem při studiu používal příslušné české normy [12] a literaturu, týkající se popisu teplárenských soustav [25], [32], [39].

S jednoduchými, víceméně orientačními výpočty statických poměrů v tepelných sítích jsem se setkal i při návštěvách v teplárenských podnicích. Z hlediska softwarového použití je zajímavý přístup pracovníků v United Energy, a. s., Most - Komořany, kteří danou problematiku řeší dostupnými nástroji kancelářského programu Excel. Samotné mapování všech potřebných parametrů rozvodné sítě nutných pro výpočet je však velmi náročné, což podstatně stěžuje práci na vývoji samotného softwarového nástroje. I když byly v některých podnicích řešeny dílčí výpočty, v této navrhované šíři takový výpočtový nástroj chybí a může se stát vhodným předmětem pro energetické závody.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V následujícím odstavci chci připomenout cíle mé disertační práce, jak byly výtčeny v tezích, schválených komisí státní doktorské zkoušky ve Zlíně dne 22.6.2001.

- Vytvoření *komplexního výpočtového programu pro simulaci tlakových, průtokových a teplotních poměrů v rozvodných tepelných sítích soustav centralizovaného zásobování teplem. Ten by kromě kalkulace statických poměrů také umožňoval sledovat dynamiku těchto sítí, tzn. průběhy sledovaných veličin v čase.* Konkrétně jde o výpočet tlakových a tepelných ztrát v jednotlivých potrubích a o výpočet tlaků, hmotnostních toků, teplot a jejich časových průběhů v jednotlivých místech obecně strukturalizované zokruhované tepelné sítě. Aplikovat bude možné na jakoukoliv radiální i zokruhovanou potrubní síť s jedním či více zdroji tepla, kde teplonosným médiem je pára nebo horká voda.
- Ošetřit výpočtový program pro práci na databázové úrovni tak, aby bylo možno jednoduše a přehledně vkládat vstupní data pro výpočet a aby byl zajištěn snadný přístup k dosaženým výsledkům.
- Doplnit program o sadu příslušných teplotních tabulek, podprogramy pro převod jednotek, příp. pro další doplňující výpočty z teplotní praxe usnadňující práci s touto aplikací.
- Využít program pro řízení tepelných sítí.

V rámci diskuse bylo konstatováno, že téma disertace je velmi aktuální a pro praxi prospěšné. V zápise bylo také poznačeno, že zvolené cíle jsou však velmi náročné a že by bylo vhodné je v průběhu řešení redukovat. Přesto jsem postupoval tak, aby byly výtčené cíle dodrženy. Pouze přepisování teplotních tabulek do vzniklého programu jsem se vyhnul a všechny materiály v elektronické formě jsem soustředil v jeden archiv.

4 MATEMATICKO – FYZIKÁLNÍ ANALÝZA TEPELNÝCH SÍTÍ

4.1 Popis hydraulických poměrů v potrubním systému

Hydraulické (tlakové a průtokové) poměry v potrubních sítích jsou ovlivňovány změnou tlakové, polohové, pohybové, vnitřní energie proudícího teplotního média a velikostí práce spotřebované na překonání hydraulických odporů při průtoku média potrubím. Při stanovování hydraulických poměrů je zapotřebí rozdělit potrubní síť na úseky s neproměnným průřezem, v nichž se hmotnostní tok tekutiny nemění. Za těchto předpokladů jsou změny vnitřní energie proudící tekutiny všeobecně zanedbatelně malé a pro každý takový úsek potrubí (větev sítě) pak můžeme psát obecnou *Bernoulliho rovnici* ve tvaru

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho_1 + h_1 g \rho_1 = p_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho_2 + h_2 g \rho_2 + \Delta p, \quad (1)$$

- kde p_1, p_2 [Pa] je statický tlak proudící tekutiny na začátku a na konci uvažovaného úseku potrubí,
 w_1, w_2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - rychlost proudící tekutiny na začátku a na konci uvažovaného úseku potrubí,
 ρ_1, ρ_2 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - měrná hmotnost proudící tekutiny na začátku a na konci uvažovaného úseku potrubí,
 h_1, h_2 [m] - vertikální vzdálenost počátečního a koncového průřezu uvažovaného úseku potrubí od zvolené horizontální úrovně,
 Δp [Pa] - tlaková ztráta v uvažovaném úseku potrubí.

V rovnici (1) můžeme zavést následující zjednodušení. Dynamický tlak $\frac{w^2 \rho}{2}$ lze zanedbat, neboť má ve srovnání se statickým tlakem velmi malou hodnotu (2-5% při průtoku plynů a 0,1% při průtoku kapalin). Hydrostatický tlak h_{gp} se prakticky uplatňuje jen u tekutin s velkou měrnou hmotností a při větších výškových rozdílech, a proto lze v případě páry taktéž zanedbat. Za těchto předpokladů způsobuje změnu tlakové energie pouze práce spotřebovaná k překonání hydraulických odporů v potrubí a tlakové poměry můžeme vyjádřit vzorcem

$$p_1 = p_2 + \Delta p. \quad (2)$$

kde p_1, p_2 [Pa] je statický tlak proudící tekutiny na začátku a na konci uvažovaného úseku potrubí,
 Δp [Pa] - tlaková ztráta v uvažovaném úseku potrubí.

Při výpočtu hydraulických poměrů v horkovodních sítích však vliv potenciální energie nemůžeme zanedbat a proto musíme k výpočtu užít následujícího vzorce

$$p_1 = p_2 + \Delta p \pm \Delta h g \rho_s, \quad (3)$$

kde Δh [m] je výškový rozdíl mezi počátečním a koncovým průřezem uvažovaného úseku potrubí,
 ρ_s [kg.m⁻³] - střední měrná hmotnost v uvažovaném úseku potrubí.

Prakticky se ve výpočtech tlakových poměrů postupuje tak, že se nejprve provede výpočet pro vodorovné potrubí a teprve potom se ve výpočtu zohlední vliv hydrostatického tlaku.

Tlakovou ztrátu Δp vznikající při průchodu tekutiny kruhovým potrubím je možno vypočítat podle vztahu

$$\Delta p = \frac{\lambda L}{d} \frac{\rho}{2} w^2 + \sum \xi w^2 \frac{\rho}{2}, \quad (4)$$

kde λ [-] je součinitel tření,
 w [m.s⁻¹] - rychlost proudící tekutiny,
 ρ [kg.m⁻³] - měrná hmotnost proudící tekutiny,
 L [m] - délka rovných částí potrubí,
 d [m] - vnitřní průměr potrubí,
 $\sum \xi$ [-] - součet koeficientů vnitřních odporů
v uvažovaném úseku potrubí.

V předcházející rovnici vystupují dvě významné veličiny, a sice rychlost proudící tekutiny w a součinitel tření λ . Rychlost proudění tekutiny v uvažovaném úseku potrubí w můžeme vyjádřit z rovnice kontinuity

$$w = \frac{M}{S\rho} = \frac{4M}{\pi d^2 \rho}, \quad (5)$$

kde M [kg.s⁻¹] je hmotnostní tok tekutiny potrubím,
 S [m²] - průtočný průřez potrubí.

Součinitel tření λ závisí na Reynoldsově čísle a na relativní drsnosti vnitřního povrchu potrubí

$$\lambda = f\left(Re, \frac{k}{d}\right) = f\left(\frac{wd}{\nu}, \frac{k}{d}\right), \quad (6)$$

kde ν [m².s⁻¹] je kinematická viskozita proudící tekutiny,
 k [m] - absolutní drsnost vnitřního povrchu potrubí.

Při turbulentním proudění se však vliv Reynoldsova čísla na velikost tření zmenšuje a při zcela turbulentním proudění drsnými trubkami mizí. Velikost součinitele tření λ tedy bude záviset pouze na

relativní drsnosti vnitřních stěn potrubí a můžeme ji vypočítat podle následujícího vztahu, viz [34]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(3,72 \frac{d}{k} \right) \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\left(2 \log \left(3,72 \frac{d}{k} \right) \right)^2}. \quad (7)$$

V převážné většině případů vyskytujících se v praxi, zejména u tepelných sítí, lze počítat pro jednotlivá potrubí s touto konstantností. Dosazením vztahu (5) a (7) do rovnice (4) obdržíme po úpravě výraz pro tlakovou ztrátu ve tvaru

$$\Delta p = \left(\frac{8L}{\pi^2 d^5 \rho \left(2 \log \left(3,72 \frac{d}{k} \right) \right)^2} + \frac{8 \sum \xi}{\pi^2 d^4 \rho} \right) M^2 = r M^2, \quad (8)$$

kde r [Pa.s².kg⁻²] je hydraulický odpor potrubí.

Proudí-li potrubím kapalina, lze předpokládat, že hodnota její měrné hmotnosti je stálá, neboť kapaliny jsou prakticky nestlačitelné. Hydraulický odpor r lze pak pro jednotlivá potrubí považovat za konstantní. V případě stlačitelných tekutin, a tedy i páry, může být však hodnota měrné hmotnosti ρ v jednotlivých místech potrubí různá což ovlivní i velikost hydraulického odporu v daném potrubí. K řešení stavové rovnice $\rho = \rho(p, T)$ se používají celosvětově uznávané rovnice prof. Jůzy [15], podle nichž jsou sestaveny tabulky a diagramy vodních par platné v energetice. Pro výpočet tepelně energetických zařízení je možno použít také vztahy publikované Rivnikem [33]. Tyto vztahy byly samostatně sestaveny pro různé oblasti parametrů – pro přehřátou páru, vodu a pro vodu a páru ve stavu sytosti. Pro oblast vodní páry v rozsahu provozních parametrů tepelných sítí lze podle Rivnika uplatnit následující vztah

$$\rho_s = \frac{l}{\frac{R \cdot y}{p_s \cdot 10^6} + A_0 + p_s \cdot A_1}, \quad (9)$$

kde ρ_s [kg.m⁻³] je střední hodnota měrné hmotnosti páry v úseku potrubí ($\rho_s = (\rho_1 + \rho_2) / 2$),

p_s [Pa] - střední hodnota tlaku páry v úseku potrubí ($p_s = (p_1 + p_2) / 2$),

T_s [K] - střední teplota páry v úseku potrubí,

$y = T_s / 1000$,

$A_1 = 0,0000056084 - 0,0000025993/y^8 - 0,000000012604/y^{16}$,

$A_0 = 0,0003237 + 0,00025 \cdot y - 0,0011354/y^2 - 0,0004381/(y - 0,21)^2$,

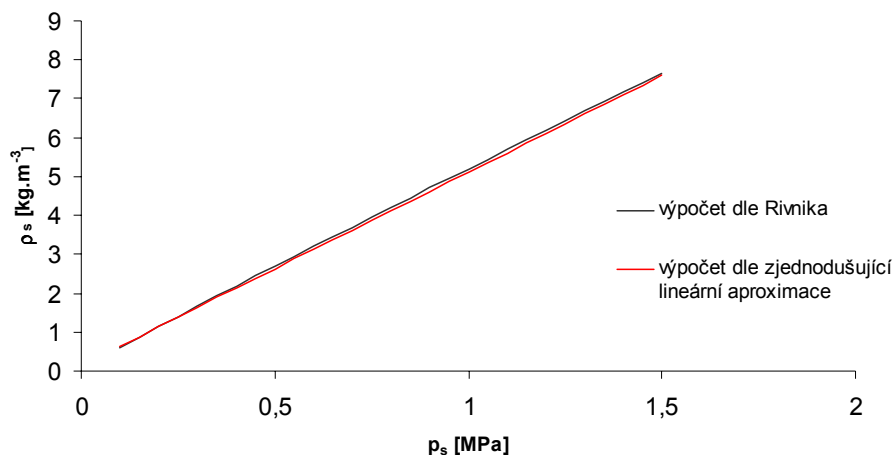
$R = 0,46151$.

Pro zjednodušení byl pro řešení praktických úloh v oblasti syté vodní páry odvozen následující jednoduchý lineární vztah, aproximující řešení stavové rovnice $\rho = \rho(p, T)$ v příslušném rozsahu parametrů

$$\rho_s = 0,146 + 4,967 \cdot 10^6 p_s. \quad (10)$$

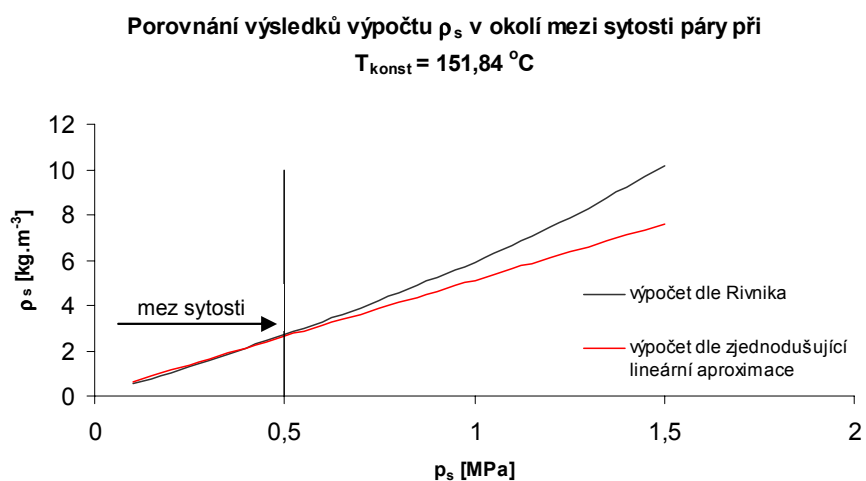
Při porovnání zjednodušující lineární aproximace (10) s výpočtem dle vztahu (9) lze konstatovat, že v oblasti syté vodní páry vykazuje lineární aproximace spolehlivé výsledky s rozdíly mezi vypočítanými hodnotami menšími než 2,5 %. Porovnání výsledků výpočtu ρ_s na mezi sytosti páry v rozmezí tlaků 0,1 – 1,5 MPa ($T = 99,61 - 198,3$ °C) demonstruje následující graf.

Porovnání výsledků výpočtu ρ_s na mezi sytosti páry

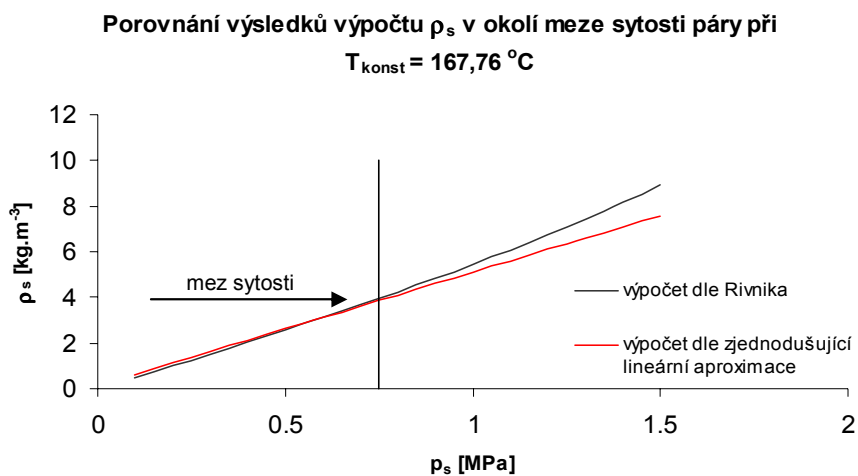


Obr. 5 Porovnání výsledků výpočtu ρ_s na mezi sytosti páry

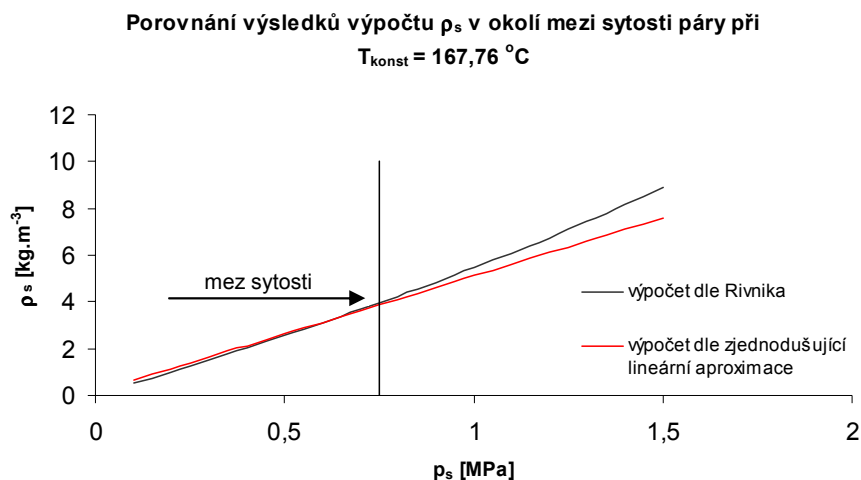
Mimo porovnání výsledků výpočtu na mezi sytosti páry jsem provedl porovnání výsledků v okolí meze sytosti, jak je zobrazeno na Obr. 6, 7, 8. Je patrné, že zavedená lineární aproximace podává nejpřesnější výsledky v oblasti mírně přehřáté páry, což je dáno tím, že právě přehřátá pára je použita v tepelných sítích jako teponosné medium. Uvedené srovnání tedy opodstatňuje oprávněnost použití zvolené aproximace popsané v rovnici (10).



Obr. 6 Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry



Obr. 7 Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry



Obr. 8 Porovnání výsledků výpočtu ρ_s v okolí meze sytosti páry

Při určování hydraulických poměrů jsou tedy zavedena tato zjednodušení:

- a) neuvažuje se dynamický tlak,
- b) hydrostatický tlak je uvažován pouze při výpočtech v horkovodních systémech,
- c) předpokládá se, že proudění probíhá za dokonale vyvinuté turbulence,
- d) závislost $\rho = \rho(p, T)$ je u páry aproximována lineárním vztahem (10); u vody se uvažuje, že $\rho = \text{konst.}$

4.2 Popis teplotních poměrů v potrubním systému

Tepelné ztráty potrubí jsou dány prostupem tepla z teplotního média přes stěnu trubky a tepelnou izolaci do okolního prostředí, v němž se potrubí nachází. Pro **potrubí uložené nadpovrchově** lze určit tepelnou ztrátu z následující rovnice [36]

$$\dot{Q}_{zl} = \frac{\pi L(t_u - t_v)}{\frac{1}{\alpha_u d_u} + \frac{1}{2\lambda_{tr}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_v + 2s_{iz}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v (d_v + 2s_{iz})}}, \quad (11)$$

- kde
- L [m] je délka rovných částí potrubí,
 - d_v [m] - vnější průměr potrubí,
 - d_u [m] - vnitřní průměr potrubí,
 - s_{iz} [m] - tloušťka izolace,
 - t_v [°C] - teplota okolního vzduchu,
 - t_u [°C] - teplota teplotonosného media,
 - λ_{tr} [W.m⁻¹.K⁻¹] - součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí,
 - λ_{iz} [W.m⁻¹.K⁻¹] - součinitel tepelné vodivosti izolace,
 - α_v [W.m⁻².K⁻¹] - součinitel přestupu tepla na vnější straně potrubí,
 - α_u [W.m⁻².K⁻¹] - součinitel přestupu tepla na vnitřní straně potrubí,
 - \dot{Q}_{zl} [W] - tepelná ztráta při nadpovrchovém uložení potrubí.

Protože 1. a 2. člen jmenovatele rovnice (11) jsou proti 3. a 4. členu menší řádově 10² až 10⁴ krát, lze je zanedbat a celou rovnici tak zjednodušit na tvar

$$\dot{Q}_{zl} \doteq \frac{\pi L(t_u - t_v)}{\frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_v + 2s_{iz}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v (d_v + 2s_{iz})}} = \frac{\pi L(t_u - t_v)}{\frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{iz}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v d_{iz}}}, \quad (12)$$

- kde $d_{iz} = d_v + 2s_{iz}$ [m] je vnější průměr izolace.

Prakticky toto zjednodušení znamená, že přestup tepla na vnitřní straně potrubí a vedení tepla v kovové stěně potrubí jsou zanedbatelné údaje vzhledem ke ztrátám vzniklým vedením tepla

v izolačním materiálu a přestupem tepla do okolí na vnější straně potrubí.

Tepelné ztráty izolovaného **potrubí uloženého podpovrchově** možno určit z rovnice

$$\dot{Q}_{z2} = \frac{\pi L (t_u - t_z)}{\frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{iz}}{d_v} + \frac{1}{2\lambda_z} \ln \frac{4h}{d_{iz}}}, \quad (13)$$

kde h [m] je hloubka uložení,
 λ_z [W.m⁻¹.K⁻¹] - součinitel tepelné vodivosti půdy,
 t_z [°C] - teplota půdy,
 \dot{Q}_{z2} [W] - tepelná ztráta při podpovrchovém uložení potrubí.

Podle [36] se teplota půdy mění s hloubkou h a venkovní teplotou vzduchu t_v podle vztahu

$$t_z = t_v + (11 - t_v) \frac{h}{h_0}, \quad (14)$$

který byl odvozen ze zkušenosti, že v hloubce $h_0 = 6$ až 8 m bývá teplota $t_{z0} = 11$ °C již nezávislá na venkovní teplotě vzduchu.

Česká norma ČSN EN ISO 12241 z roku 1998 [12] předkládá pro výpočet tepelné ztráty v potrubí vztah ve tvaru

$$|t_{uk} - t_v| = |t_{uz} - t_v| \cdot e^{-\frac{LU_L}{Mc}}, \quad (15)$$

kde U_L [W.m⁻¹.K⁻¹] je délkový koeficient prostupu tepla,
 c [J.kg⁻¹.K⁻¹] - měrná tepelná kapacita proudícího media,
 t_{uz} [°C] - teplota proudícího media na začátku uvažovaného úseku potrubí,
 t_{uk} [°C] - teplota proudícího media na konci uvažovaného úseku potrubí.

S použitím vztahu (15) lze na základě informace o teplotě na začátku uvažovaného úseku potrubí určit teplotu na konci tohoto potrubí. Jestliže budeme uvažovat nadpovrchově uložené potrubí, pak lze k výpočtu teplot v koncových bodech užít následující úpravu vztahu (15)

$$t_{uk} = t_v + |t_{uz} - t_v| \cdot e^{-\frac{LU_{L1}}{Mc}} \quad (16)$$

Při určování délkového koeficientu prostupu tepla U_{L1} je možné aplikovat zjednodušení ve smyslu rovnice (12), jak je naznačeno zde

$$U_{L1} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_u d_u} + \frac{1}{2\lambda_{tr}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_v + 2s}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v (d_v + 2s)}} \doteq \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{iz}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v d_{iz}}}, \quad (17)$$

tj. lze zanedbat tepelné ztráty vzniklé přestupem na vnitřní straně potrubí a vedením ve stěně potrubí.

U podpovrchově uložených potrubí lze pak analogicky odvodit následující vztahy, vycházející z rovnic (13), (14), (15)

$$t_{uk} = t_v + (II - t_v) \frac{h}{\delta} + |t_{uz} - t_v - (II - t_v) \frac{h}{\delta}| \cdot e^{-\frac{LU_{L2}}{Mc}}, \quad (18)$$

$$U_{L2} = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{iz}}{d_v} + \frac{1}{2\lambda_z} \ln \frac{4h}{d_{iz}}}. \quad (19)$$

Při určování teplotních poměrů jsou tedy zavedena tato zjednodušení:

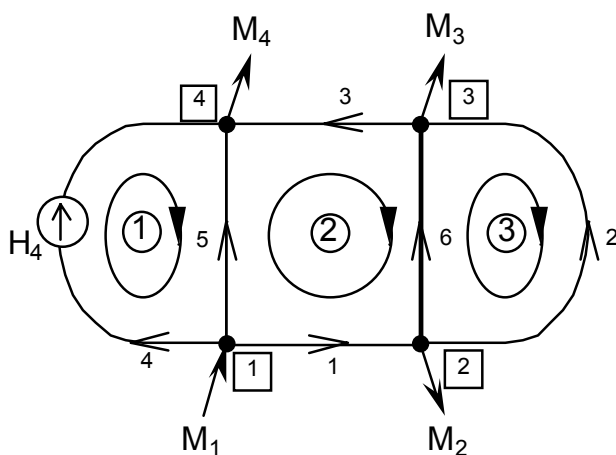
- a) ve výpočtu tepelných ztrát potrubí se neuvažují ztráty vzniklé přestupem tepla na vnitřní straně a ztráty vzniklé vedením tepla stěnou trubky,
- b) u proudícího media se předpokládá, že podél potrubí nenastává výměna tepla vedením,
- c) ze znalosti teploty ve výchozím zdroji tepla se postupně dají vypočítat teploty na koncích potrubí (větví), přičemž konec jednoho potrubí je vždy začátkem potrubí druhého.

5 VÝPOČTOVÉ PRINCIPY

5.1 Princip výpočtu hydraulických poměrů

5.1.1 Metoda okruhových průtoků

K výpočtu hmotnostních toků v jednotlivých větvích zokruhované i radiální potrubní soustavy lze s výhodou použít tzv. *metoda okruhových průtoků* (MOP). Jedná se o analogii *metody elektrických smyček* používané v elektrotechnice. Elektrickému proudu zde odpovídá hmotnostní tok, napětí odpovídá tlak a elektrickému odporu odpovídá odpor hydraulický. Jedná se o zjednodušený model neboť indukce a kapacity v něm uvažovány nejsou. Jestliže aplikujeme na definovanou síť 1. a 2. *Kirchhoffův zákon*, získáme soustavu nelineárních algebraických rovnic, jejímž řešením jsou sledované veličiny. Postup je znázorněn na jednoduché síti se čtyřmi uzly \underline{u} a šesti větvemi \underline{v} (viz Obr. 9).



Obr. 9 Schéma jednoduché sítě

Nejprve je nutné, tak jako u elektrických obvodů, zvolit směry proudění v jednotlivých větvích jak naznačují šipky. Dále označíme

neznámý hmotnostní tok tekutiny v i-té větvi symbolem x_i , odebírané/ dodávané množství tekutiny v j-tém uzlu symbolem M_j a činný tlak v i-té větvi H_i .

Z 1. Kirchhoffova zákona vyplývá, že součet všech průtočných množství pro určitý uzel je roven nule. Můžeme tedy psát následující bilanční rovnice:

$$\begin{array}{l} \text{uzel } \boxed{1} : \quad -x_1 - x_4 - x_5 + M_1 = 0, \\ \text{uzel } \boxed{2} : \quad x_1 - x_2 - x_6 - M_2 = 0, \\ \text{uzel } \boxed{3} : \quad x_2 - x_3 + x_6 - M_3 = 0. \end{array} \quad (20)$$

Obecně u sítí s \underline{u} uzly stačí sestavit pouze $\underline{u}-1$ rovnic, neboť poslední rovnice by byla lineární kombinací některých z předešlých rovnic. Dále můžeme pro každou větev vyjádřit tlakovou diferencii jako rozdíl mezi tlakovou ztrátou větve a činným tlakem v této větvi:

$$\Delta p_i = r_i |x_i| x_i - H_i, \quad (21)$$

kde r_i [Pa.s².kg⁻²] je hydraulický odpor i-té větve,

H_i [Pa] - činný tlak v i-té větvi (vřazené čerpadlo).

Z důvodu akceptování zvoleného smyslu proudění byla nahrazena druhá mocnina u průtočného množství x_i součinem absolutní hodnoty a skutečné hodnoty. S použitím vztahu (21) můžeme podle 2. Kirchhoffova zákona pro zvolené okruhy ①, ② a ③ (viz Obr. 9) psát tyto rovnice, popisující tlakové ztráty ve větvích jednotlivých okruhů:

$$\begin{array}{l} \text{okruh } \textcircled{1} \quad r_4 |x_4| x_4 - r_5 |x_5| x_5 - H_4 = 0, \\ \text{okruh } \textcircled{2} \quad -r_1 |x_1| x_1 - r_3 |x_3| x_3 + r_5 |x_5| x_5 - r_6 |x_6| x_6 = 0, \\ \text{okruh } \textcircled{3} \quad -r_2 |x_2| x_2 + r_6 |x_6| x_6 = 0. \end{array} \quad (22)$$

Aby metoda okruhových průtoků konvergovala ke správnému řešení, je nezbytné, aby vybraná soustava okruhů, pro které sestavujeme rovnice (22), byla soustava *okruhů hlavních*. V každém takovém hlavním okruhu řešené soustavy existuje nejméně jedna větev, která již nepatří žádnému jinému okruhu. Popis algoritmů

hledání hlavních okruhů sítě je blíže specifikován v následující kapitole 5.1.2.

Rovnice (20) představují soustavu $\underline{u}-1$ (tří) lineárních algebraických rovnic a rovnice (22) soustavu \underline{u} (tří) nelineárních algebraických rovnic, dohromady tedy \underline{v} (šest) rovnic, neboť pro každou síť platí $\underline{u} = \underline{v} - (\underline{u} - 1)$. Protože máme \underline{v} (šest) neznámých průtoků x_{1-6} ve větvích, je tato soustava řešitelná. K jejímu řešení použijeme Newtonovu iterační metodu, podle které jednotlivé rovnice nahradíme prvními dvěma členy Taylorova rozvoje. V obecném případě řešení nelineárních rovnic n -tého řádu přecházíme k postupnému řešení soustav lineárních rovnic typu

$$\frac{\mathcal{F}_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\mathcal{F}_i}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\mathcal{F}_i}{\partial x_3} \Delta x_3 + \dots + \frac{\mathcal{F}_i}{\partial x_v} \Delta x_v = \Delta f_i, \quad (23)$$

kde $f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$.

Zvolíme-li pro počáteční odhad neznámých hmotnostních toků označení $x_i^{(0)}$, pak bude mít naše soustava, tvořená rovnicemi (20) a (22) tvar

$$\begin{aligned} -x_1^{(0)} - x_4^{(0)} - x_5^{(0)} + M_1 &= \Delta M_1^{(0)}, & (24) \\ x_1^{(0)} - x_2^{(0)} - x_6^{(0)} - M_2 &= \Delta M_2^{(0)}, \\ x_2^{(0)} - x_3^{(0)} + x_6^{(0)} - M_3 &= \Delta M_3^{(0)}, \\ r_4(x_4^{(0)})^2 - r_5(x_5^{(0)})^2 - H_1 &= \Delta p_1^{(0)}, \\ -r_1(x_1^{(0)})^2 - r_3(x_3^{(0)})^2 + r_5(x_5^{(0)})^2 - r_6(x_6^{(0)})^2 &= \Delta p_2^{(0)}, \\ -r_2(x_2^{(0)})^2 + r_6(x_6^{(0)})^2 &= \Delta p_3^{(0)}, \end{aligned}$$

kde $\Delta M_1^{(0)}, \Delta M_2^{(0)}, \Delta M_3^{(0)}$ je nesoulad průtoků v uzlech 1-3,

$\Delta p_1^{(0)}, \Delta p_2^{(0)}, \Delta p_3^{(0)}$ - nesoulad tlakových diferencí v okruzích

1-3.

Zvolíme-li počáteční odhad $x_i^{(0)}$ tak, aby byla zachována hmotná bilance v uzlech a zachováme-li tuto bilanci i při přechodu od

n-té k (n+1)-ní iteraci, bude $\Delta M_1^{(0)} = \Delta M_2^{(0)} = \Delta M_3^{(0)} = 0$. Řešením soustavy (24) Newtonovou metodou dostaneme pro první přiblížení:

$$\begin{aligned} -\Delta x_1^{(1)} - \Delta x_4^{(1)} - \Delta x_5^{(1)} &= 0, & (25) \\ \Delta x_1^{(1)} - \Delta x_2^{(1)} - \Delta x_6^{(1)} &= 0, \\ \Delta x_2^{(1)} - \Delta x_3^{(1)} + \Delta x_6^{(1)} &= 0, \\ 2r_4 x_4^{(0)} \Delta x_4^{(1)} - 2r_5 x_5^{(0)} \Delta x_5^{(1)} &= \Delta p_1^{(0)}, \\ -2r_1 x_1^{(0)} \Delta x_1^{(1)} - 2r_3 x_3^{(0)} \Delta x_3^{(1)} + 2r_5 x_5^{(0)} \Delta x_5^{(1)} - 2r_6 x_6^{(0)} \Delta x_6^{(1)} &= \Delta p_2^{(0)}, \\ -2r_2 x_2^{(0)} \Delta x_2^{(1)} + 2r_6 x_6^{(0)} \Delta x_6^{(1)} &= \Delta p_3^{(0)}. \end{aligned}$$

Řešením této soustavy obdržíme přírůstky průtoků v jednotlivých větvích $\Delta x_1^{(n+1)}, \dots, \Delta x_6^{(n+1)}$ při přechodu od n-té k (n+1)-ní iteraci. Z nich se potom vypočítávají nové průtoky

$$x_i^{(n+1)} = x_i^{(n)} - \Delta x_i^{(n+1)} \text{ pro } i=1-6 \quad (26)$$

Hodnoty $x_i^{(n+1)}$ se použijí pro výpočet nových odchylek funkcí $\Delta p_i^{(n+1)}$, parciálních derivací a nových přírůstků průtoků $x_i^{(n+2)}$. Tento postup opakujeme dokud není splněna podmínka

$$|\Delta p_C^{(n+1)}| \leq \text{eps}_1 \text{ pro } c=1-3, \quad (27)$$

kde eps_1 [Pa] je předem zvolená přesnost výpočtu tlakové difference okruhů.

Použijeme-li ke zjednodušení výpočtů tzv. *Maxwellovy transformace*, známé z elektrotechniky, můžeme dosáhnout podstatného snížení řádu soustavy rovnic. Myslíme tím zavedení myšlených okruhových průtoků x'_c ($c = 1,2,3$) jimiž vyjádříme průtoky v jednotlivých větvích. Pro náš případ sítě z Obr. 9 bude platit:

$$\begin{aligned} x_1 &= -x'_2, \\ x_2 &= -x'_3, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned}x_3 &= -x'_2, \\x_4 &= +x'_1, \\x_5 &= -x'_1 + x'_2, \\x_6 &= -x'_2 + x'_3.\end{aligned}$$

Podobně můžeme vyjádřit přírůstky ve větvích Δx_i ($i = 1, 2, \dots, v$) pomocí přírůstků v okruzích $\Delta x'_c$ ($c = 1, 2, \dots, o$):

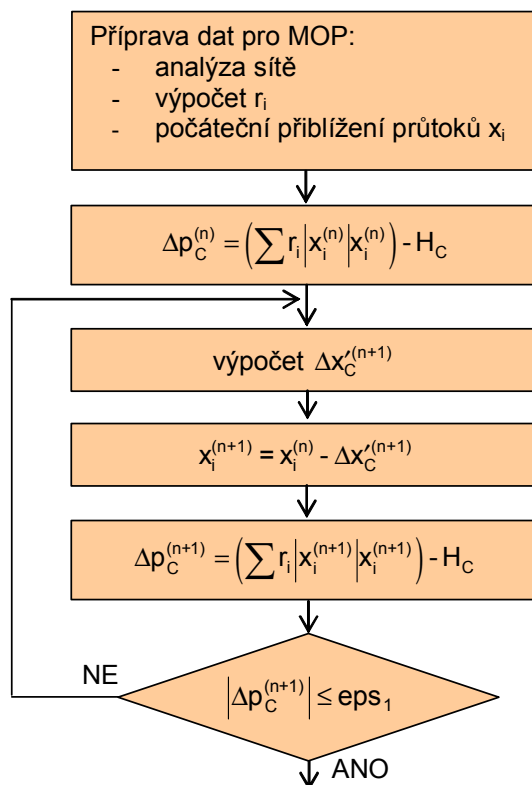
$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= -\Delta x'_2, \\ \Delta x_2 &= -\Delta x'_3, \\ \Delta x_3 &= -\Delta x'_2, \\ \Delta x_4 &= +\Delta x'_1, \\ \Delta x_5 &= -\Delta x'_1 + \Delta x'_2, \\ \Delta x_6 &= -\Delta x'_2 + \Delta x'_3.\end{aligned} \tag{29}$$

Dosadíme-li vztahy (29) do soustavy rovnic (25), dostaneme pro přechod od n -té k $(n+1)$ -ní iteraci po úpravě:

$$\begin{aligned}0 &= 0 \\ 0 &= 0 \\ 0 &= 0 \\ 2(r_4 x_4^{(n)} + r_5 x_5^{(n)}) \Delta x'_1{}^{(n+1)} - 2r_5 x_5^{(n)} \Delta x'_2{}^{(n+1)} &= \Delta p_1^{(n)}, \\ -2r_5 x_5^{(n)} \Delta x'_1{}^{(n+1)} + 2(r_1 x_1^{(n)} + r_3 x_3^{(n)} + r_5 x_5^{(n)} + r_6 x_6^{(n)}) \Delta x'_2{}^{(n+1)} - 2r_6 x_6^{(n)} \Delta x'_3{}^{(n+1)} &= \Delta p_2^{(n)}, \\ -2r_6 x_6^{(n)} \Delta x'_2{}^{(n+1)} + 2(r_2 x_2^{(n)} + r_6 x_6^{(n)}) \Delta x'_3{}^{(n+1)} &= \Delta p_3^{(n)}.\end{aligned} \tag{30}$$

Tím se nám redukuje počet neznámých ze šesti na tři, a současně i řád celé soustavy algebraických rovnic potřebných pro výpočet, což podstatně urychlí výpočet. Řešením takové soustavy lineárních rovnic získáme neznámé přírůstky okruhových průtoků $\Delta x'_c{}^{(n+1)}$ a z nich můžeme vypočítat opravené průtoky v jednotlivých větvích. Tento algoritmus končí splněním podmínky (27). Výsledná redukovaná soustava lineárních algebraických rovnic (30) je numericky řešena obecně známou Gauss-Seidlovou iterační metodou.

S ohledem na výše uvedený rozbor postupů můžeme algoritmus metody okruhových průtoků souhrnně popsat pomocí následujícího blokového schéma.



Obr. 10 Blokové schéma algoritmu MOP

Nejprve se podle počátečního přiblížení průtoků nebo předchozí iterace vypočítá odchylka tlakové ztráty v daném okruhu $\Delta p_C^{(n)}$. Pomocí Newtonovy metody se vypočítají jednotlivé přírůstky okruhového průtoku $\Delta x_C'^{(n+1)}$. Poté se stanoví nové průtoky pro všechny větve daného okruhu $x_i^{(n+1)}$, jimiž se opraví hodnoty odchylek tlakových ztrát. Iterace se opakují tak dlouho, dokud odchylky tlakových ztrát nejsou ve všech okruzích menší než zvolená přesnost eps_1 .

5.1.2 Rozbor tepelné sítě z hlediska topologické struktury

Výpočtu neznámých průtoků pomocí metody okruhových průtoků musí předcházet analýza topologické struktury tepelných sítí. Tuto topologickou strukturu lze do počítače zadávat ve formě matice \mathbf{A} typu v, u , kde v je počet větví sítě a u je počet uzlů této sítě. Prvky matice \mathbf{A} mají následující hodnoty:

$\mathbf{A}_{i,j} = 1$ má-li větev i počáteční uzel v uzlu j ,

$\mathbf{A}_{i,j} = -1$ má-li větev i koncový uzel v uzlu j ,

$\mathbf{A}_{i,j} = 0$ jestliže větev i neinciduje s uzlem j .

Pro náš případ sítě z Obr. 9 bude matice \mathbf{A} vypadat následovně:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 5 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array}$$

Tato matice se však zadává do počítače v jiné formě, a to ve tvaru vektoru čísel počátečních uzlů větví \mathbf{Q} a vektoru čísel koncových uzlů větví \mathbf{Z} . Oba vektory mají rozměr v a pro náš případ sítě z Obr. 9 budou vypadat následovně:

$$\mathbf{Q} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ \hline \end{array}$$

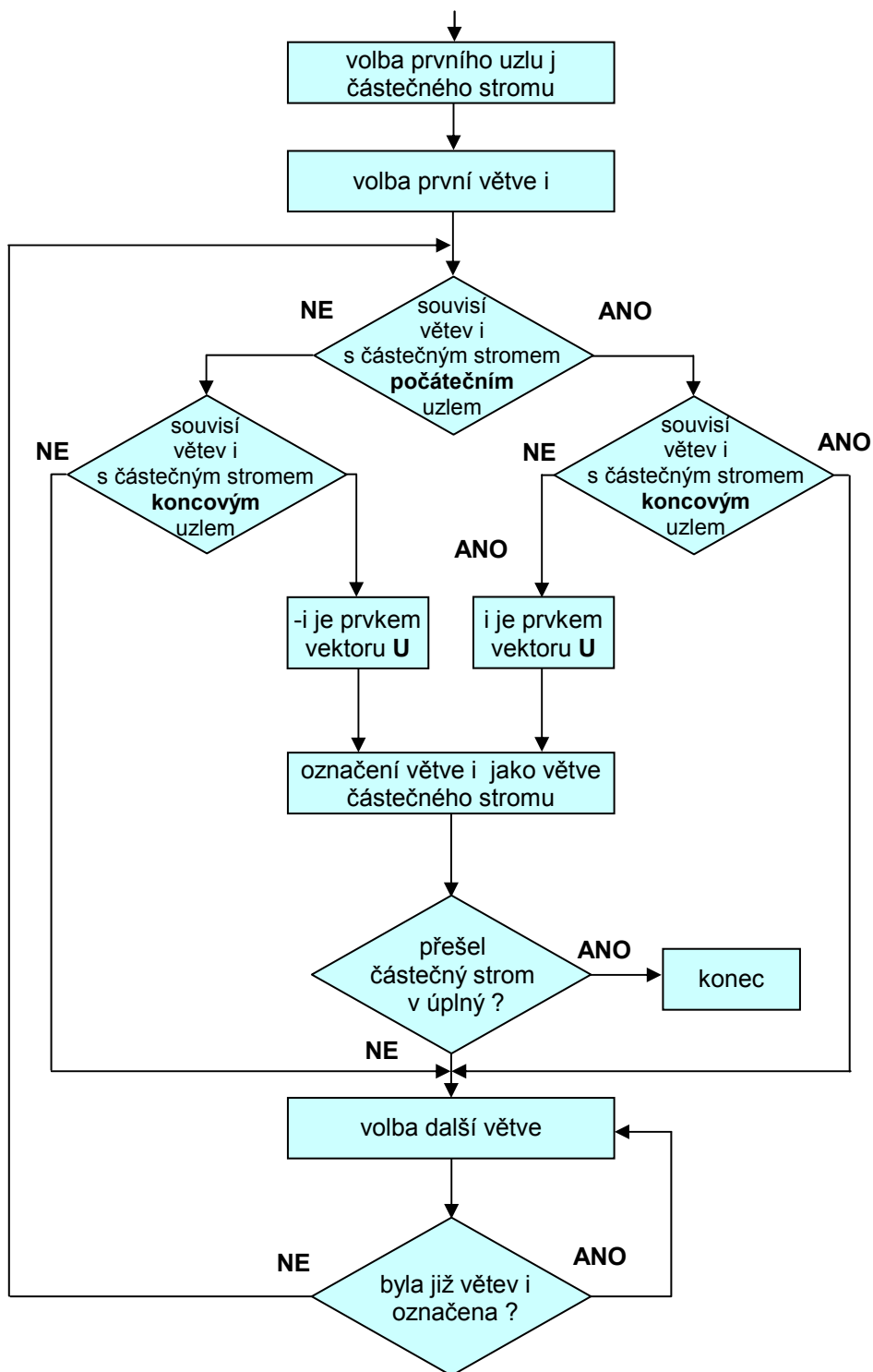
$$\mathbf{Z} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 3 & 4 & 4 & 4 & 3 \\ \hline \end{array}$$

Vektory \mathbf{Q} , \mathbf{Z} tedy jednoznačně určují topologickou strukturu zapojení tepelné sítě. Každému zapojení sítě odpovídá jediná kombinace vektorů \mathbf{Q} , \mathbf{Z} a naopak určité kombinaci vektorů \mathbf{Q} , \mathbf{Z} odpovídá jediné schéma zapojení sítě. Zadání vektorů \mathbf{Q} , \mathbf{Z} plně postačuje k sestavení ostatních vektorů potřebných pro další výpočty.

Aby metoda okruhových průtoků konvergovala ke správnému řešení, je nezbytné, aby vybraná soustava okruhů, pro které sestavujeme rovnice (22), byla soustava *okruhů hlavních*. V každém takovém hlavním okruhu řešené soustavy existuje nejméně jedna větev, která již nepatří žádnému jinému okruhu. Odstraněním těchto tzv. *nezávislých větví* vznikne radiální síť, tzv. *úplný graf stromu*. Abychom získali systém hlavních okruhů, je nutné úplný graf stromu nalézt.

Postup je takový, že se zvolí jeden uzel soustavy za výchozí (referenční uzel) a označí se číslem 0. Za referenční uzel můžeme zvolit kterýkoliv uzel sítě, zpravidla však volíme uzel hlavního zdroje. Zvolený referenční uzel se pak spojuje s ostatními uzly grafu zařazováním jednotlivých větví. Přitom se zařazují jen ty větve, které vytvářejí spojení mezi výchozím uzlem a některým dalším dosud nepřipojeným uzlem. V případě, že by se zařadila větev vedoucí k uzlu, který byl již dříve připojen, vznikl by uzavřený okruh. Taková větev se vypustí. Tak se postupně přiřazují jednotlivé větve, až vznikající graf (částečný strom) má všechny uzly spojené větvemi a přejde v úplný strom. Zbývající nepřipojené větve tvoří úplný systém nezávislých hlavních větví. Zařazováním těchto větví do úplného stromu pak vzniknou uzavřené okruhy, pro které sestavujeme předem zmíněné bilanční rovnice ve smyslu 2. Kirchhoffova zákona.

V počítači je reprezentován úplný strom vektorem **U**, který je tvořen čísly větví úplného stromu (se znaménkem) sestavených za sebou od referenčního uzlu ke koncovým uzlům stromu. Vektor **U** pak umožňuje vypočítávat tlaky v jednotlivých uzlech tepelné sítě postupným přičítáním nebo odečítáním tlakových ztrát a činných tlaků jednotlivých větví stromu. Algoritmus sestavení vektoru **U** je detailně popsán na Obr. 11.



Obr. 11 Blokové schéma algoritmu pro určení vektoru **U**

Pro náš případ sítě z Obr. 9 bude vektor \mathbf{U} vypadat velmi jednoduše:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

Pokud byla provedena analýza výskytu nezávislých větví a sestaven vektor úplného stromu \mathbf{U} , lze přistoupit k určení tzv. *incidenční matice okruhů a větví* \mathbf{B} , která udává příslušnost větví k okruhům. Tato matice je typu 0,v a její prvky mohou mít následující hodnoty:

$\mathbf{B}_{ci} = 1$ je-li větev i součástí okruhu c
 a orientace obou se shodují,

$\mathbf{B}_{ci} = -1$ je-li větev i součástí okruhu c
 a orientace obou je opačná,

$\mathbf{B}_{ci} = 0$ není-li větev i součástí okruhu c .

Pro náš případ sítě z Obr. 9 bude matice \mathbf{B} vypadat následovně:

$$\mathbf{B} = \begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

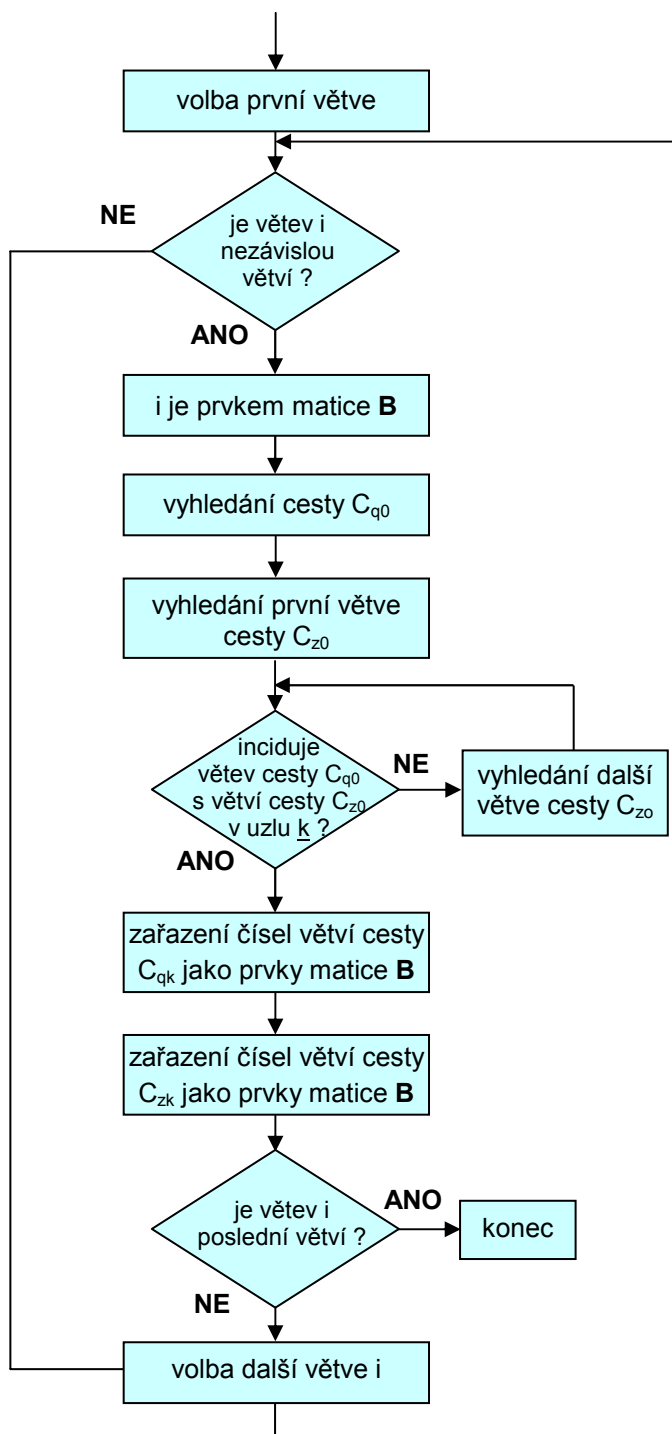
pozn: směr okruhu je dán orientací nezávislé větve.

Matice \mathbf{B} je však v počítači upravena do tvaru vektoru a pomocného vektoru \mathbf{PR} , který udává počet nenulových prvků původní matice \mathbf{B} , jak je naznačeno níže.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 4 & -5 & -1 & -3 & 5 & -6 & -2 & 6 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{PR} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

Při sestavování incidenční matice **B** se postupuje následovně: Zvolí se jedna větev z úplného systému nezávislých větví (nezařazených do vektoru **U**) za výchozí. Tím je zároveň zvolen jeden hlavní okruh, neboť vřazením této větve do úplného stromu vznikne právě jeden okruh. S využitím vektoru **U** se sestaví orientovaná cesta C_{q_0} od počátečního uzlu q zvolené nezávislé větve do referenčního (nulového) uzlu a a orientovaná cesta C_{z_0} od koncového uzlu z zvolené nezávislé větve do referenčního uzlu. Orientovanou cestou se rozumí vektor orientovaných větví úplného stromu, v němž prvním prvkem je větev, jejíž počáteční uzel je totožný s počátečním (koncovým) uzlem zvolené nezávislé větve, a posledním prvkem je větev, jejíž koncový uzel je totožný s referenčním uzlem. Orientace cesty nezávisí na původní orientaci větví. Číslo větví cest C_{q_0} a C_{z_0} s příslušnými znaménky od jejich počátku až k jejich prvnímu společnému uzlu k , tzn. cesty C_{q_k} a C_{z_k} spolu s číslem nezávislé větve, tvoří již prvky prvního řádku hledané matice **B**. Tento postup je aplikován pro všechny nezávislé větve. Blokové schéma popsaného algoritmu je na Obr. 12.



Obr. 12 Blokové schéma algoritmu pro určení incidenční matice B

5.1.3 Popis fází výpočtu hydraulických poměrů

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, vlastnímu výpočtu hydraulických vlastností předchází zpracování informací o topologické struktuře příslušné tepelné sítě. Ze zadaných vektorů \mathbf{Q} a \mathbf{Z} jsou postupně stanoveny vektory \mathbf{U} , \mathbf{B} , \mathbf{PR} , jež jednoznačně popisují úplný strom a systém hlavních okruhů.

Po této analýze struktury sítě následuje stanovení počátečních odhadů průtoků větvemi x [1..v], stanovení středního tlaku p_s [1..u], střední měrné hmotnosti ρ_s [1..u] a hydraulických odporů r [1..v]. Protože na začátku výpočtu ještě neznáme tlaky v jednotlivých místech sítě, předpokládáme střední tlak v celé síti stejný a roven

$$p_s = \frac{atz + 4 \cdot 10^5}{2}, \quad (31)$$

kde atz [Pa] je absolutní tlak na prahu zdroje ve výchozím uzlu.

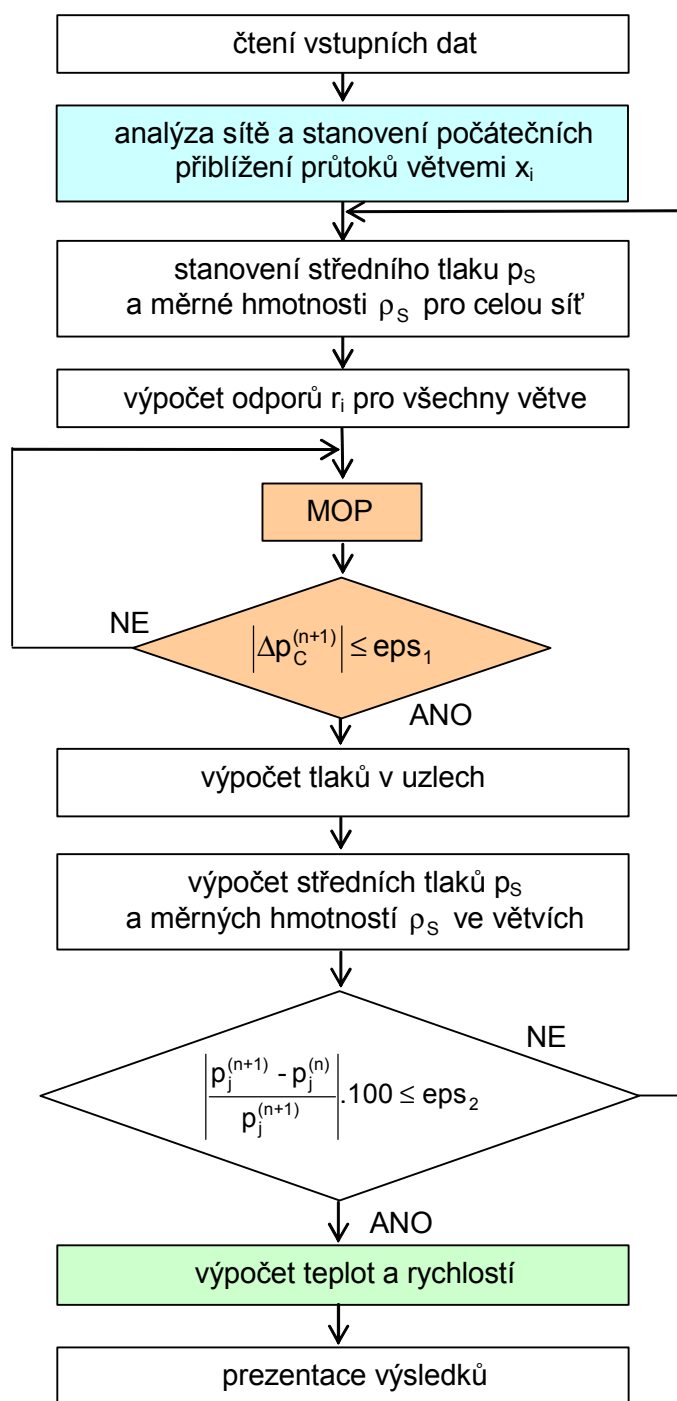
Samotný výpočet hydraulických poměrů probíhá ve dvou cyklech iterací. Ve vnitřním cyklu iterací se pomocí metody okruhových průtoků stanoví rozdělení průtoků na jednotlivé větve tepelné sítě a tlakové ztráty v těchto větvích. Tento cyklus popisuje Obr. 10 a je ukončen tehdy, je-li pro všechny okruhy splněna podmínka (27). Ve vnějším cyklu iterací se pak vypočítávají a postupně opravují tlaky v uzlech (u páry dle rovnice (2), u horké vody dle rovnice (3)) a podle nich měrné hmotnosti a hydraulické odpory větví. Protože voda je prakticky nestlačitelná, není nutné počítat se změnami měrné hmotnosti.

Vnější cyklus končí splněním podmínky:

$$\left| \frac{p_j^{(n+1)} - p_j^{(n)}}{p_j^{(n+1)}} \right| \cdot 100 \leq \text{eps}_2, \quad (32)$$

kde $p_j^{(n)}$ [Pa] je tlak v j-tém uzlu při n-té vnější iteraci,
 $p_j^{(n+1)}$ [Pa] - tlak v j-tém uzlu při (n+1)-ní vnější iteraci,
 eps_2 [%] - zvolená přesnost výpočtu tlaku v uzlech.

Při výpočtu tlaků v jednotlivých uzlech sítě se vychází z referenčního uzlu (zdroje), kde je tlak znám. Postupuje se po větvích stromu **U**, přičemž se odčítají tlakové ztráty v jednotlivých větvích. Tak postupně dostáváme hodnoty tlaku v jednotlivých uzlech. Úplné schéma výpočtů statických vlastností tepelných sítí je znázorněno na Obr. 13.



Obr. 13 Celkové blokové schéma algoritmu pro určení hydraulických poměrů

5.2 Princip výpočtu teplotních poměrů

Výpočet teplotních poměrů vychází ze znalosti tepelně izolačních parametrů potrubí, průtokových poměrů v síti a výchozí teploty ve zdroji (zdrojích) tepla. S využitím vztahů (16) (17) resp. (18) (19) se dají postupně vypočítat teploty na koncích potrubí (větví), přičemž konec jednoho potrubí je vždy začátkem potrubí druhého.

Při algoritmicizaci této úlohy v počítači byl zaveden pomocný vektor **pp** s proměnnou délkou, ve kterém se postupně uchovávají čísla větví, ke kterým se má výpočet postupně vracet. Na začátku jsou v **pp** uloženy všechny větve, které vycházejí ze zdroje (zdrojů). Poté se vždy vybere poslední prvek (větev) z **pp**, vypočítá se teplota v koncovém uzlu této aktuálně zpracovávané větve a v dalším kroku se následně poslední prvek (větev) vektoru **pp** nahradí čísly větví navazujících na koncový uzel aktuálně zpracovávané větve (viz Obr. 12). V tomto kroku algoritmu mohou nastat tyto situace:

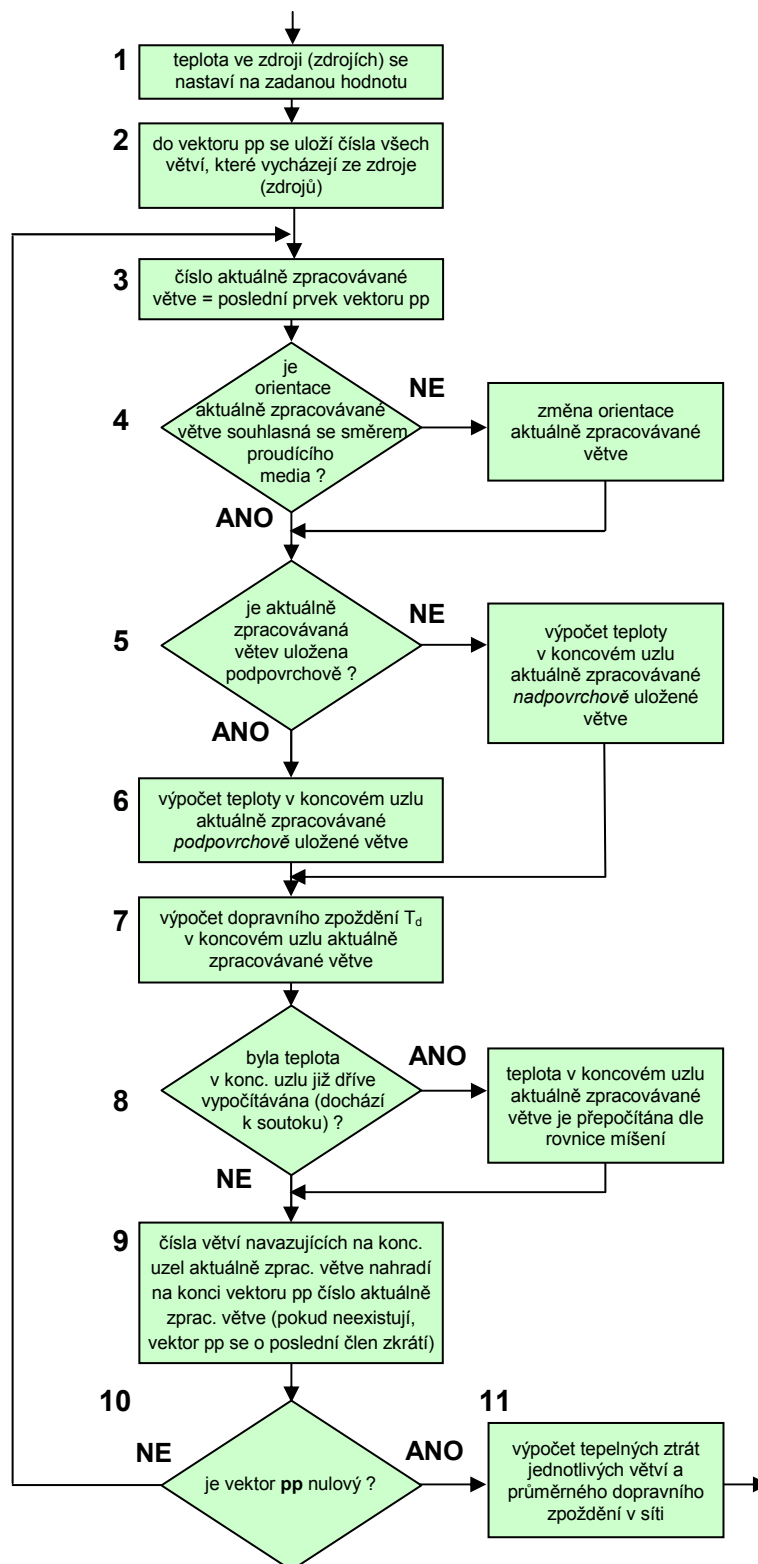
- a) síť se v koncovém uzlu aktuálně zpracovávané větve rozvětňuje – pak se poslední prvek vektoru **pp** nahradí čísly navazujících větví,
- b) na koncový uzel aktuálně zpracovávané větve navazuje další větev – pak se poslední prvek vektoru **pp** nahradí číslem navazující větve,
- c) na koncový uzel aktuálně zpracovávané větve již nenavazuje žádná další větev (může zde být odběratelské místo) – pak se poslední prvek vektoru **pp** pouze umaže a výpočet se vrací k větví, která je ve vektoru **pp** na předposledním místě.

Celý algoritmus se cyklicky opakuje dokud se neprojdou všechny větve sítě, tj. dokud vektor **pp** je nulový. Na konci tohoto cyklu se ze znalosti teplot v jednotlivých uzlech počítají tepelné ztráty v jednotlivých větvích. Tepelné ztráty je možno určit pomocí rovnic (12) resp. (13).

V uzlech, kde dochází k soutoku dvou a více větví, je algoritmus ošetřen tak, že je výsledná teplota počítána pomocí směšovací rovnice. Pro soutok ze dvou větví tedy platí:

$$t_{uk} = \frac{M_1 t_{uk1} + M_2 t_{uk2}}{M_1 + M_2}, \quad (33)$$

kde t_{uk} [°C] je vypočítaná teplota po smíšení dvou toků,
 t_{uk1} [°C] - teplota media přitékajícího z 1. větve,
 t_{uk2} [°C] - teplota media přitékajícího z 2. větve,
 M_1 [kg.s⁻¹] - hmotnostní tok v 1. větvi,
 M_2 [kg.s⁻¹] - hmotnostní tok v 2. větvi.



Obr. 14 Blokové schéma algoritmu pro určení teplot

5.3 Stanovení průměrného dopravního zpoždění v tepelné síti a určení polohy referenčního bodu

Z hlediska dynamiky je nutné, aby při výpočtu poměrů v horkovodních systémech program poskytoval také informaci o dopravních zpožděních v celé síti. Vzhledem k velkým vzdálenostem mezi zdroji a odběrateli totiž hraje dopravní zpoždění v dodávce tepla velmi významnou roli. Běžně se jeho hodnota může pohybovat řádově od několika minut až po několik hodin. Dopravní zpoždění v horkovodní síti je funkcí hmotnostního toku oběhové vody a je dáno vztahem

$$T_d = f(M) = \frac{L}{w} = \frac{L \cdot S \cdot \rho}{M} \quad (34)$$

kde M [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] je hmotnostní tok tekutiny potrubím,
 L [m] - délka potrubí,
 w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - rychlost proudění,
 S [m^2] - průtočný průřez potrubí,
 ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] - měrná hmotnost proudící tekutiny.

Velikost dopravního zpoždění u jednotlivých odběratelů tepla $T_{d(i)}$ je dána součtem dopravních zpoždění jednotlivých větví, kterými teplotné medium směrem od zdroje k příslušnému odběrateli protéká. Pro jeho určování lze s výhodou použít v předchozí kapitole popsaný algoritmus, využívající vektoru **pp**. Vedle teplot lze totiž v každém cyklu tohoto postupu stanovit také dopravní zpoždění v koncovém uzlu aktuálně zpracovávané větve, jak je popsáno na Obr. 14 (krok 7).

Pro účely řízení dodávky tepla je také žádoucí počítat hodnotu tzv. *průměrného dopravního zpoždění* E_{Td} . Tu zjistíme pomocí dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů tepla vynásobených jejich váhovými koeficienty, které jsou definovány v (36). Výpočet je obecně pro n odběratelů definován takto:

$$E_{Td} = \sum_{i=1}^n e_{(i)} \cdot T_{d(i)}, \text{ pro } (i = 1 \dots n), \quad (35)$$

kde E_{Td} [h] je průměrné dopravní zpoždění v síti,
 e [-] - váhový koeficient,
 T_d [h] - dopravní zpoždění jednotlivého spotřebitele od zdroje,

přičemž váhový koeficient příslušného odběratele lze vypočítat pomocí vztahu:

$$e_{(i)} = \frac{Q_{(i)}}{Q_{(ZDROJE)}}, \text{ pro } (i = 1 \dots n), \quad (36)$$

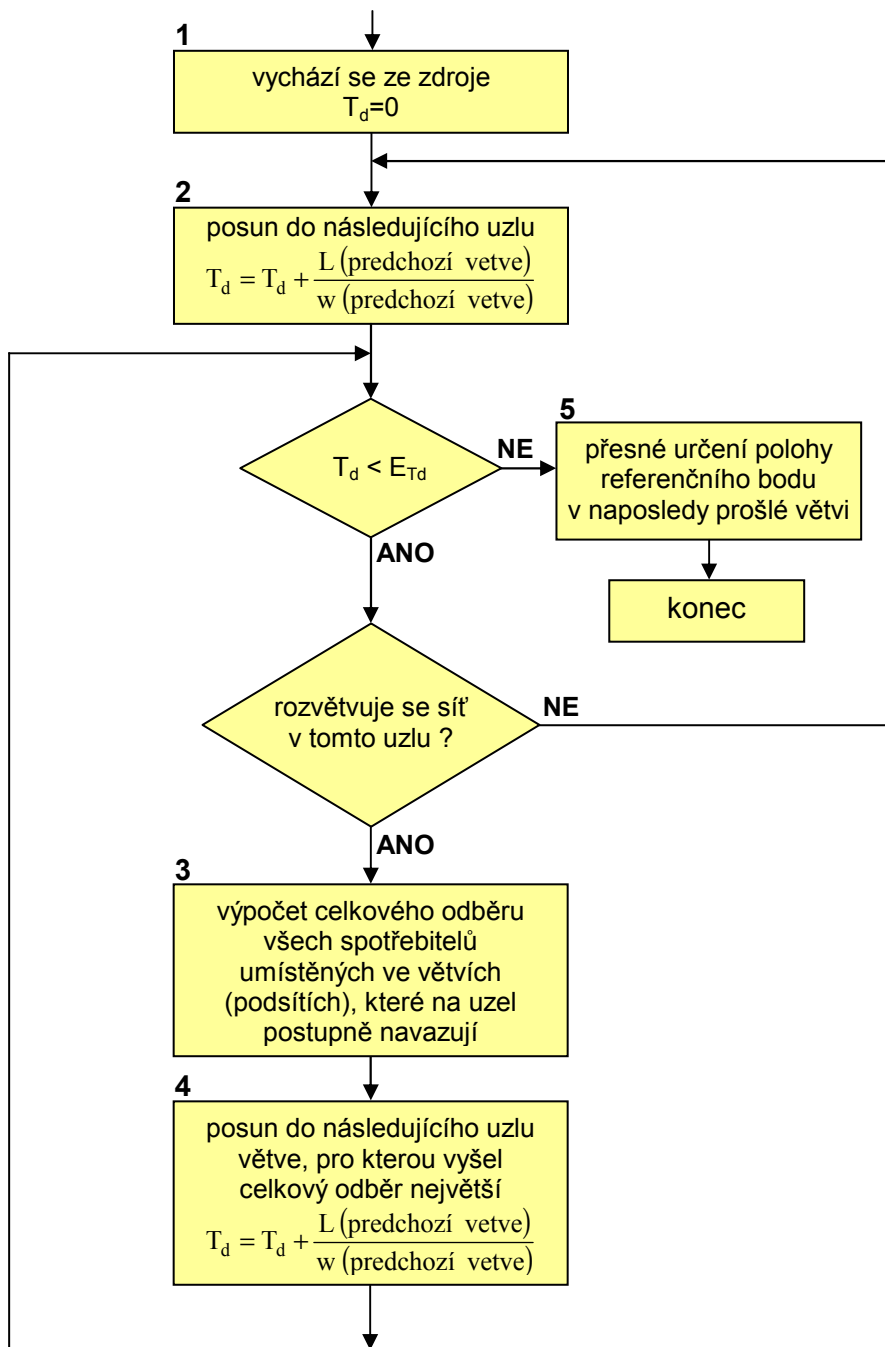
kde $Q_{(i)}$ [t/h] je odběr jednotlivých odběratelů,
 $Q_{(zdroje)}$ [t/h] - celkový výkon zdroje (zdrojů zařazených do společné sítě).

Hodnota průměrného dopravního zpoždění je podkladem pro určení tzv. *referenčního bodu tepelné sítě*. Tento bod, ve kterém je dopravní zpoždění od zdroje rovno právě průměrnému dopravnímu zpoždění vypočítanému podle (35), prakticky představuje určité místo v tepelné síti, na které můžeme pohlížet jako na soustředění všech odběratelů. Na základě vypočtené hodnoty průměrného dopravního zpoždění, známých hodnot rychlostí v jednotlivých větvích a příslušných délek potrubí lze stanovit polohu referenčního bodu

v síti. Jednoznačné určení polohy referenčního bodu popisuje Obr. 15 a lze jej charakterizovat následujícím postupem:

- vychází se ze zdroje (krok 1)
- posun do následujícího uzlu musí být vždy shodný se směrem proudícího média. Směr proudícího média lze zjistit z výpočtu statických parametrů, konkrétně průtoku média ve větvích tepelné sítě (krok 2)
- v každém uzlu, do kterého se dostaneme, je nutné zjistit, jestli daný uzel je počátečním uzlem pro více větví, tedy jestli se v tomto uzlu síť rozvětňuje. Pokud ne, lze pokračovat dále, pokud ano, je zapotřebí zjistit celkový odběr (resp. sumu) všech spotřebitelů umístěných ve větvích (podsítích), které na uzel postupně navazují. (krok 3)
- pokračuje se z uvažovaného uzlu tou větví, pro kterou vyšel celkový odběr největší, resp. tou větví, do které proudí větší hmotnostní tok (krok 4)
- tento postup se opakuje dokud je suma všech dopravních zpoždění (T_d) v již prošlých větvích menší než dříve stanovené průměrné dopravní zpoždění E_{T_d} . V okamžiku, kdy tato podmínka již není splněna, je zřejmé, že referenční bod se nachází v naposledy uvažované větvi a je třeba dopočítat jeho přesnou polohu. (krok 5)

Poznámka: Na tomto místě je vhodné upozornit na skutečnost, že je důležité odlišovat výrazy referenční bod a referenční uzel !



Obr. 15 Blokové schéma algoritmu pro určení polohy referenčního bodu tepelné sítě

Při stanovování referenčního bodu lze jako ukazatel rozlehlosti tepelné sítě použít směrodatnou odchylku s , resp. variační koeficient v , získaný při statistické analýze dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů. Tato statistická kritéria jsou v našem případě vypočítávána následovně:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{Td} - T_{d(i)})^2}, \quad (37)$$

$$v = \frac{s}{E_{Td}} \cdot 100\%, \quad (38)$$

kde s [h] je směrodatná odchylka dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů,
 v [%] je variační koeficient vyhodnocený při statistické analýze dopravních zpoždění jednotlivých odběratelů,
 n [-] je počet odběratelů.

Variační koeficient patří k charakteristikám relativní variability statistického souboru a udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru. Malý stupeň variability znamená malou vzájemnou různost hodnot jednotlivých dopravních zpoždění a tedy velkou podobnost těchto hodnot, což zároveň signalizuje, že vážený průměr je v tomto případě dobrou charakteristikou obecné výše hodnot dopravních zpoždění. Naopak vysoká variabilita značí velkou vzájemnou odlišnost, což zároveň signalizuje, že vážený průměr není dobrou charakteristikou obecné výše hodnot dopravních zpoždění [10]. Vzhledem k těmto zavedeným statistickým ukazatelům lze tedy prohlásit, že čím menší bude hodnota variačního koeficientu, tím bude větší soustředění odběratelů v síti, resp. čím větší bude hodnota tohoto koeficientu, tím větší bude rozptýlení odběratelů po síti. To dává přehled o rozlehlosti celé tepelné sítě a o míře opodstatněnosti hledání referenčního bodu.

5.4 Princip algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí

Jedním z vytčených cílů předkládané práce bylo zpracovat dynamiku předmětných tepelných sítí a rozšířit výpočtový program o možnosti sledování chování tepelných sítí v čase. Vzhledem k tomu, že parní sítě jsou v současné době užívány stále méně a že počas práce nebyla možnost studia a zpracování konkrétní parní soustavy (k dispozici byly jen popisy reálných horkovodních soustav), byla pozornost soustředěna pouze na sledování dynamiky dodávky tepla a teplotních poměrů v horkovodních systémech. V těchto sítích se také nejmarkantněji projevuje dopravní zpoždění, které má na dynamické chování celé soustavy značný vliv (viz odst. 5.3).

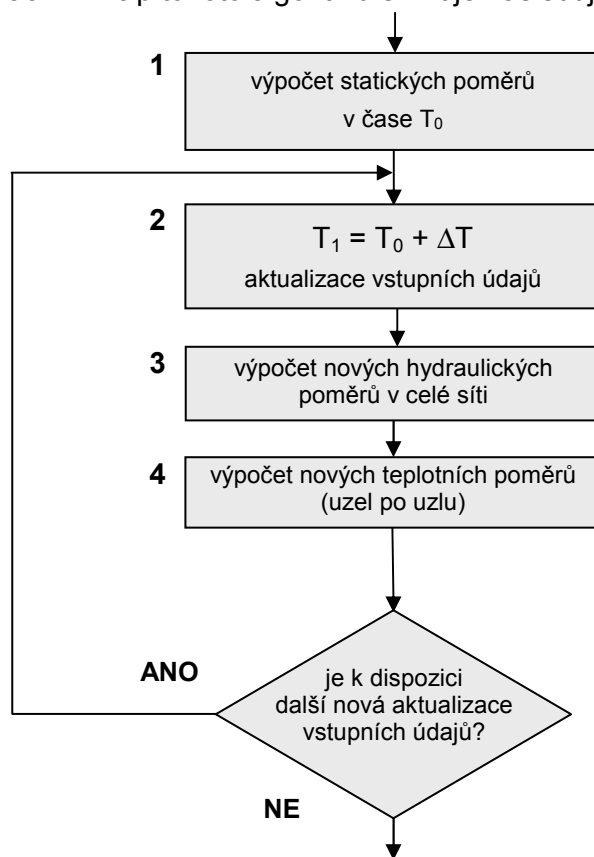
Při tvorbě algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí jsem vycházel z následujících předpokladů:

- Proudící horká voda je prakticky nestlačitelné medium a změny hydraulických poměrů se promítají v soustavě prakticky okamžitě, bez přechodových časů. Časová konstanta charakteristiky potrubí je zanedbávána, čímž se např. zvýšení tlaku na prahu zdroje okamžitě projevuje adekvátním zvýšením tlaků ve všech uzlech sítě.
- Změny teplotních poměrů v sítích jsou dány změnami teploty okolního vzduchu (venkovní teploty) a změnami teploty na výstupu ze zdrojů. Vzhledem k proměnným dopravním zpožděním mezi jednotlivými uzly se tyto teplotní změny promítají v soustavách s různými časovými odezvami.
- Vzhledem k poměrně velkým dopravním časům v sítích (řádově desítky až stovky minut) zřejmě nebude třeba klást velké požadavky na přesnost výpočtu – hodnota vzorkovací periody ΔT se může pohybovat v jednotkách až desítkách minut.

Za těchto předpokladů lze princip vytvořeného algoritmu popsat následujícími kroky:

- výpočet statických poměrů v tepelné síti pro určení počátečního rozdělení teplot v jednotlivých uzlech sítě v čase T_0 (krok 1)
- posun o jednu vzorkovací periodu vpřed do času $T_1 = T_0 + \Delta T$, aktualizace odebíraných výkonů u všech spotřebitelů, aktualizace teploty na prahu zdroje (zdrojů) a aktualizace venkovní teploty (krok 2)
- výpočet nových hydraulických poměrů, kterým se určí nové rozložení průtoků, rychlostí a dopravních zpoždění v celé síti (lze užít statický model vzhledem k praktické nestlačitelnosti vody a při zanedbání časové konstanty charakteristiky potrubí) (krok 3)
- v návaznosti na výpočet hydraulických poměrů se odděleně stanoví nové teplotní poměry v horkovodní síti, a to následujícím způsobem. Nejprve se pro každý uzel sítě určí odpovídající bod/body, ve kterých se proudící hmota nacházela v předchozím vzorkovacím čase. K jejich určení je nutné znát aktualizovaná dopravní zpoždění v jednotlivých větvích a topologii sítě. Více než jeden bod se hledá v případech, kdy do sledovaného uzlu přitéká medium z více směrů a dochází k soutoku. Prakticky si lze tuto úlohu představit jako hledání míst, která jsou od příslušného uzlu proti proudu „vzdálená o vzorkovací periodu“, tj. dopravní zpoždění mezi těmito body a příslušným uzlem je rovno právě periodě vzorkování. Po stanovení těchto míst se určí, jakou teplotu měla proudící hmota v těchto bodech v předchozím vzorkovacím čase. K tomu využijeme údaje o předchozím rozložení teplot a údaje o délkách jednotlivých potrubních úseků. Pokud již známe teploty v bodech, ve kterých se hmota nacházela v předchozím vzorkovacím čase, lze již lehce dopočítat, jakou teplotu bude mít medium v příslušných uzlech sítě na konci vzorkovací periody.

K tomu se dá využít postupu již popsaného na Obr. 14, pouze s tím rozdílem, že se nevychází ze zdroje, ale z příslušných nalezených bodů, a neprochází se celá síť, ale pouze její podmnožina zahrnující úseky mezi nalezenými body a odpovídajícím uzlem. Tento nový výpočet teplotních poměrů je již ovlivněn novými aktualizovanými průtokovými poměry a novou aktualizovanou hodnotou venkovní teploty. Nutno podotknout, že po celou vzorkovací periodu je na prahu zdroje již uvažována nová aktualizovaná hodnota teploty, která odráží kvalitativní řízení dodávky tepla ze zdroje. Celý algoritmus pokračuje krokem 2 a dále se cyklicky opakuje tolikrát, kolik je k dispozici nových aktualizací. Princip tohoto algoritmu shrnuje následující obrázek.



Obr. 16 Blokové schéma algoritmu pro sledování dynamiky horkovodních sítí

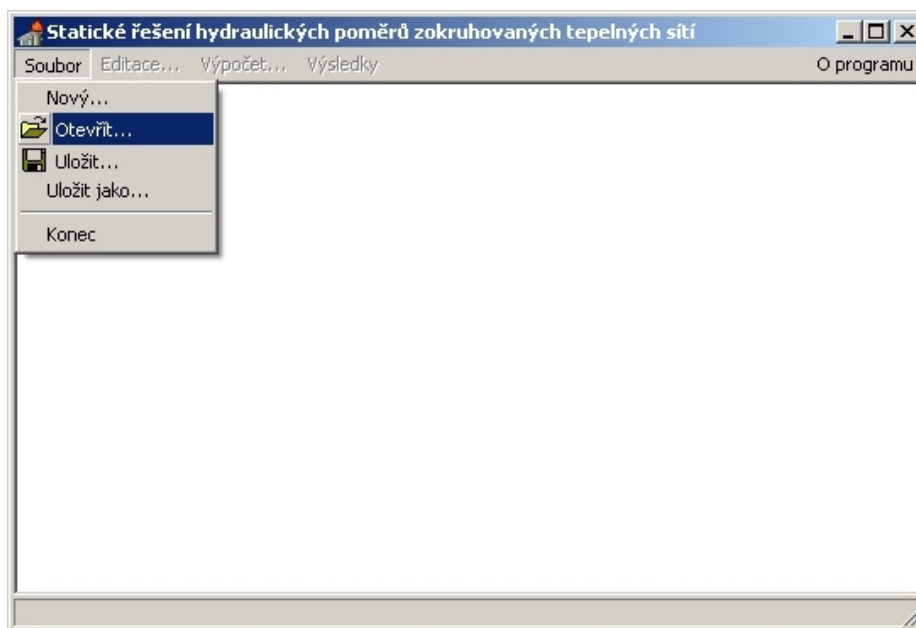
6 POPIS VYTVOŘENÉHO VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU PRO SIMULACI PROVOZU ZOKRUHOVANÝCH TEPELNÝCH SÍTÍ - SIMTS

Nově vzniklý výpočtový program pro simulaci hydraulických a teplotních poměrů v tepelných sítí nazvaný SIMTS byl vytvořen v programovacím prostředí Delphi 6 od firmy Borland. Delphi jako vizuálně orientovaný vývojový prostředek nové generace ke tvorbě robustních, uživatelsky přívětivých aplikací v současnosti představuje jeden z nejmodernějších prostředků pro tvorbu programů. Základem programování je objektová verze jazyka Pascal (Objekt Pascal), jež je následníkem proslulého Turbo Pascalu, doplněná o pokročilé koncepte programování. Pomocí Delphi a v něm zabudovaných objektů lze jednoduchou formou a v relativně krátkém čase vytvářet efektní, uživatelsky velmi příjemné aplikace. Díky těmto vlastnostem a díky kompatibilitě s Turbo Pascalem, bylo rozhodnuto využít k tvorbě programu právě tento vývojový nástroj.

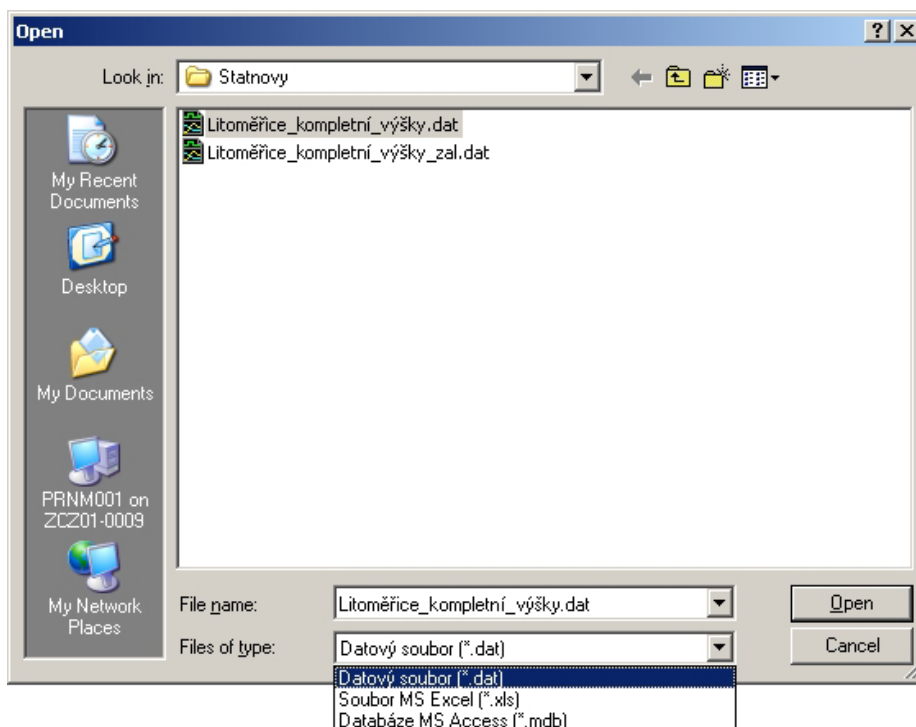
Většina naprogramovaných procedur a funkcí slouží k ošetření práce uživatele se samotným programem (práce s daty, zobrazování a tisk výsledů,...), přičemž k vlastním výpočtům je použito pouze následujících 5 procedur. První z nich je procedura VEKTOR, ve které se určuje topologická struktura sítě, tzn. sestavení úplného stromu grafu (viz kapitola 5.1.2) podle zadaných vektorů počátečních a koncových uzlů větví. Samotný výpočet statických vlastností se provádí v procedurách VODA nebo PÁRA podle typu teplotnosné látky zadané ve vstupním souboru. Protože při metodě okruhových průtoků musíme zachovat hmotnou bilanci v uzlech, předpokládáme na počátku nulový průtok v nezávislých větvích. V obou procedurách probíhá výpočet ve dvou cyklech iterací jak je popsáno v kapitole

5.1.3. U parních sítí lze výškové rozdíly zanedbat, naopak u vodních sítí má rozdíl nadmořských výšek mezi zdrojem a spotřebitelem značný vliv, a to díky zhruba 1000x větší měrné hmotnosti vody vzhledem k páře. Tyto skutečnosti jsou ve výpočtech zohledněny a proto procedura VODA uvažuje i tlakovou ztrátu vlivem převýšení a umožňuje také vřazovat do větví činné tlaky. Procedura TEPLO zajišťuje ve smyslu kapitol 5.2, 5.3 výpočet tepelných poměrů a dopravních zpoždění v předmětných sítích. Poslední volanou procedurou je DYNAMIKA, v níž jsou realizované dynamické výpočty, viz. kapitola 5.4.

Po spuštění programu (viz Obr. 17) se v horní části obrazovky objeví hlavní menu, které obsahuje několik položek. Aktivovat lze pouze ty nabídky, do kterých lze vstoupit. Jednotlivé nabídky se aktivují najetím kurzoru myši na příslušnou nabídku a zmáčknutím levého tlačítka myši nebo pomocí funkční klávesy F10 a kurzorových kláves (šipek). Přítomnost kurzoru ve funkčním obdélníčku je signalizována změnou jeho barvy.



Obr. 17 Úvodní okno programu



Obr. 18 Standardní dialogové okno pro výběr vstupního datového souboru

6.1 Položka „Soubor“

První položkou hlavního menu je funkce *Soubor*, zajišťující práci s datovými soubory. Po spuštění programu je to jediná položka hlavního menu, která je aktivní. Obsahuje jednoduché podmenu, pomocí jehož položek můžeme načítat a ukládat datové zdroje pro výpočet. Konkrétně lze načítat a uchovávat vstupní data popisující síť v následujících formátech, zvolených vzhledem k jejich značnému rozšíření v praxi (viz Obr. 18):

- *.dat - ve formě jednoduchého textového souboru,
- *.xls - ve formátu sešitu aplikace Microsoft Excel,
- *.mdb - ve formátu databáze Microsoft Access.

Protože výpočet hydraulických a teplotních poměrů se provádí na základě definovaných parametrů potrubní sítě, definovaných

výkonů zdrojů a odběrů spotřebitelů, je nutné jako vstupní hodnoty zadat následující parametry:

- pro každou větev: vnější a vnitřní průměr potrubí, délka potrubí, tloušťku izolace, tepelnou vodivost izolace, součet koeficientů místních odporů, absolutní drsnost potrubí, teplotu okolního vzduchu a v případě podpovrchového uložení jeho hloubku,
- pro každý uzel: dodávané/ odebírané množství teplonosného média, výškový rozdíl vzhledem ke zdroji,
- pro zdroj tepla: teplotu a absolutní tlak na prahu zdroje v referenčním uzlu.

Vstupní data ve formě textového souboru (*.dat) mají následující strukturu:

POZN

MED, PVE, PUZ, PZS, PVP, EPS1, EPS2, ADR, ATZ, GA, PCT, TR,
TOV

Q [1...PVE]

Z [1...PVE]

D [1...PVE]

DD [1...PVE]

TLIZ [1...PVE]

L [1...PVE]

LAMIZ [1...PVE]

CVPOD [1...PVP]

H [1...PVP]

F [1...PVE]

V [1...PZS]

W [1...PZS]

VYS [1...PUZ]

CV [1...PCT]

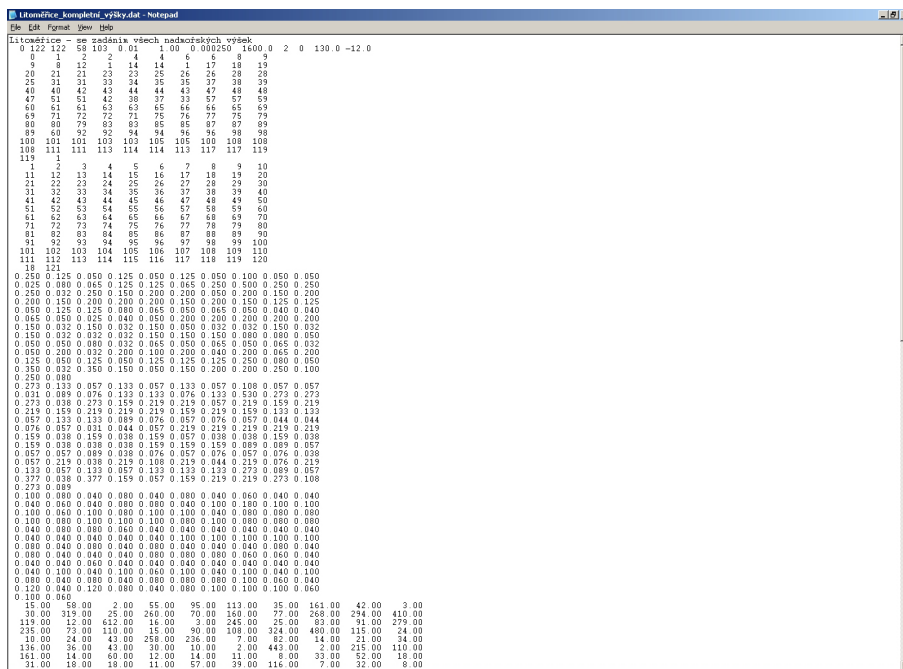
CITL [1...PCT]

Význam jednotlivých proměnných je následující:

POZN	uživatelská poznámka (např. specifikace datového souboru)
MED	typ media: pára=1, voda=0
PVE	počet větví
PUZ	počet uzlů
PZS	počet uzlů zdrojů a odběratelů
PVP	počet větví podpovrchových
EPS1	požadovaná přesnost výpočtu tlakové difference [kPa]
EPS2	přesnost výpočtu tlaků v uzlech [%]
ADR	absolutní drsnost potrubí [m]
ATZ	absolutní tlak ve zdroji [kPa]
GA	způsob výpočtu hydraulického odporu: GA=1: program počítá s nulovými místními odpory ve všech větvích GA=2: pro každou větev se zadává součet koeficientů místních odporů (armatury, oblouky, odbočky, clony,...)
PCT	počet větví s činným tlakem (u páry je 0)
TR	teplota ve zdroji (referenční) [°C]
TOV	teplota okolního vzduchu [°C]
Q	vektor počátečních uzlů jednotlivých větví
Z	vektor koncových uzlů jednotlivých větví
D	vektor vnitřních průměrů potrubí [m]
DD	vektor vnějších průměrů potrubí [m]
TLIZ	vektor tloušťek izolací [m]
L	vektor délek potrubí [m]
LAMIZ	vektor tepelných vodivostí izolace [W/mK]
CVPOD	vektor čísel větví uložených podpovrchově
H	hloubky uložení [m]
F	pro GA=2 vektor součtů koeficientů místních odporů
V	vektor uzlů zdrojů a spotřebičů
W	vektor výkonů zdrojů (-) a odběrů spotřebitelů (+) [t/h]

- VYS vektor rozdílů nadmořských výšek mezi referenčním zdrojem a jednotlivými uzly tepelné sítě [m]
- CV vektor čísel větví s činným tlakem
- CITL vektor hodnot činných tlaků [kPa]

Ukázka způsobu uložení vstupních údajů (parametrů sítě) ve formě textového souboru je na následujícím Obr. 19.



Obr. 19 Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě textového souboru

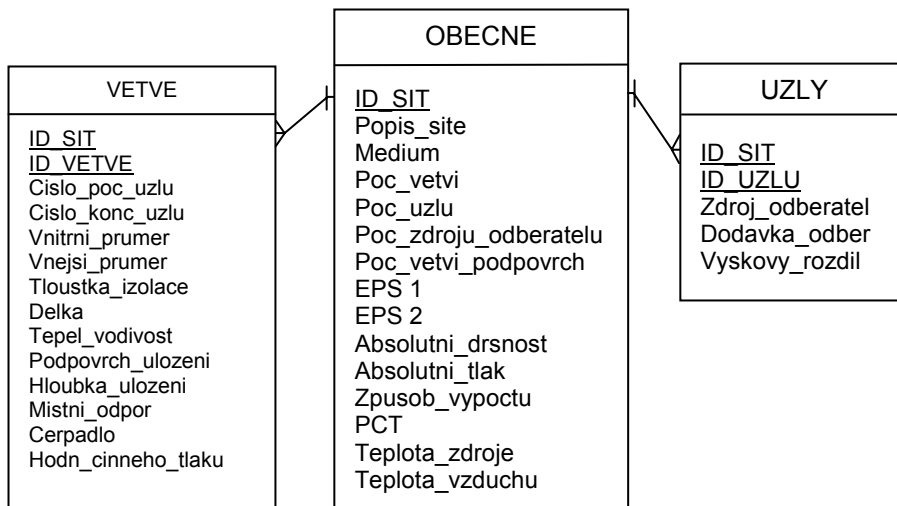
Ukázka způsobu uložení vstupních údajů (parametrů sítě) ve formě xls souboru je na Obr. 20. Jednotlivé listy sešitu Excel obsahují údaje o:

- a) obecných vlastnostech tepelné sítě (list „obecné“)
- b) vlastnostech všech větví sítě (list „větve“)
- c) vlastnostech všech uzlů sítě (list „uzly“)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	číslo větve	počáteční uzel	koncový uzel	vnitřní průměr (m)	vnější průměr (m)	tloušťka izolace (m)	délka větve (m)	tepelná vodivost izol. (W/mK)	podpovrchové větve (1=ANO)	hloubka uložení (m)	koef. místního odporu (-)	větve s činným tlakem (1=ANO)	hodnoty činných tlaků (Pa)	
1	1	0	1	0,25	0,273	0,1	15	0,09			0,2			
2	2	1	2	0,125	0,133	0,08	58	0,09			2,4			
3	3	2	3	0,05	0,057	0,04	2	0,09			5,7			
4	4	2	4	0,125	0,133	0,08	55	0,09			0,3			
5	5	4	5	0,05	0,057	0,04	95	0,09			5,8			
6	6	4	6	0,125	0,133	0,08	113	0,09			0			
7	7	6	7	0,05	0,057	0,04	35	0,09			5,8			
8	8	6	8	0,1	0,108	0,06	161	0,09			0,8			
9	9	8	9	0,05	0,057	0,04	42	0,09			5,8			
10	10	9	10	0,05	0,057	0,04	31	0,09			5,7			
11	10	9	10	0,05	0,057	0,04	31	0,09			5,6			
12	11	9	11	0,025	0,031	0,04	30	0,09			0,3			
13	12	8	12	0,08	0,089	0,06	319	0,09			6,3			
14	13	12	13	0,065	0,076	0,04	25	0,09			4,1			
15	14	1	14	0,125	0,133	0,08	260	0,09			10,1			
16	15	14	15	0,125	0,133	0,08	70	0,09			8			
17	16	14	16	0,065	0,076	0,04	160	0,09			1,8			
18	17	1	17	0,25	0,133	0,1	77	0,09			4,8			
19	18	17	18	0,5	0,53	0,18	268	0,09			8,4			
20	19	18	19	0,25	0,273	0,1	294	0,09	1	2	11,4			
21	20	19	20	0,25	0,273	0,1	410	0,09	1	2	7,5			
22	21	20	21	0,25	0,273	0,1	119	0,09	1	2	5,6			
23	22	21	22	0,032	0,038	0,06	12	0,09	1	2	5,7			
24	23	21	23	0,25	0,273	0,1	612	0,09	1	2	8,1			
25	24	23	24	0,15	0,159	0,08	16	0,09	1	2	0,3			
26	25	23	25	0,2	0,219	0,1	31	0,09	1	2	13,9			
27	26	25	26	0,2	0,219	0,1	245	0,09	1	2	6,3			
28	27	26	27	0,05	0,057	0,04	25	0,09	1	2	5,9			
29	28	26	28	0,2	0,219	0,08	83	0,09	1	2	10,3			
30	29	28	29	0,15	0,159	0,08	91	0,09	1	2	18,9			
31	30	28	30	0,2	0,219	0,08	279	0,09	1	2	6,3			
32	31	28	31	0,2	0,219	0,1	735	0,09	1	2				

Obr. 20 Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě xls souboru

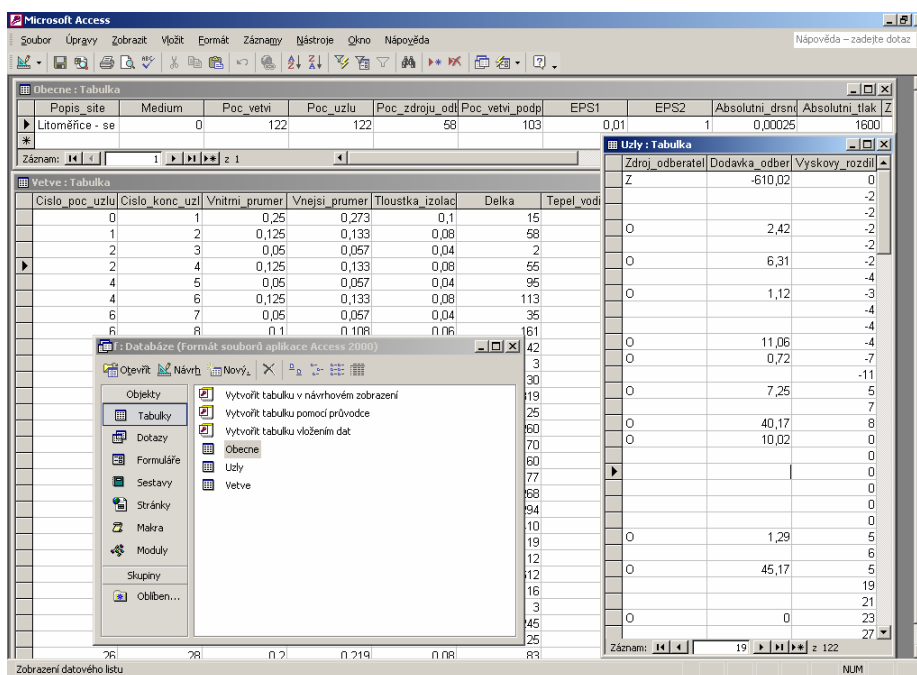
Stejně jako jsou u xls souborů vstupní údaje logicky rozděleny do 3 listů, při ukládání do mdb databáze se vytvářejí 3 tabulky. Struktura tabulek samotné databáze a jejich vzájemné vazby jsou naznačeny na Obr. 21.



Obr. 21 E/R (Entity/Relationship) diagram datové struktury

Z uvedeného schéma vyplývá, že ukládání dat je rozděleno do tří tabulek: „OBEČNE“, „VETVE“ a „UZLY“, přičemž tabulka „VETVE“ zahrnuje tolik záznamů, kolik je v popisované síti větví a tabulka „UZLY“ obsahuje tolik záznamů, kolik je v popisované síti uzlů. Atributy v jednotlivých tabulkách jsou patrné z E/R diagramu na Obr. 21.

Návrh databáze je koncipován tak, aby bylo možné uchovávat v jediném mdb souboru (databázi) data popisující i několik provozních variant (z hlediska výše odběrů a dodávky tepelné energie), což je zajištěno vložením primárního klíče ID_SIT. Ukázka databáze v mdb je na následujícím Obr. 22.



Obr. 22 Ukázka způsobu uložení vstupních dat ve formě databázového mdb souboru

6.2 Položka „Editace“

Kliknutím na položku *Editace*, se otevře nové editační okno s dialogovým panelem. Ten je rozdělen do tří stránek umožňujících snadné a přehledné zadávání a upravování vstupních dat. Na první stránce se zadávají obecné parametry potrubní sítě, na druhé stránce údaje vztahující se k jednotlivým větvím a na třetí stránce data týkající se jednotlivých uzlů sítě (viz Obr. 23, 24, 25).

Pozn.: Vstupní data lze při zachování odpovídajícího formátu připravit i v prostředích MS Excel nebo MS Access a pak načíst do programu. Tento přístup vychází z předpokladu, že u každé teplárenské soustavy existuje ukládání a archivace měřených dat právě v podobě xls nebo mdb souboru, případně ve formátu, který lze lehce zkonvertovat na tyto běžně používané standardy. Za těchto předpokladů pak již stačí tato vstupní data uspořádat do podoby, v které je možné je načíst do vytvořeného programu (viz předchozí obr. s ukázkou vstupních souborů).

Pro ukončení editace vstupních dat se použije tlačítko *OK*, které je umístěno na všech třech záložkách a po jehož odkliknutí jsou data připravena k výpočtu. Samotné výpočty jsou odstartovány po kliknutí na položku *Výpočet* v hlavním menu.

Editační okno

Obecné Větve Uzly

Název sítě Litoměřice - se zadáním vš

Počet větví 122 Počet uzlů 122

Počet větví uložených podpovrchově 103

Počet uzlů zdrojů a odběratelů 58

Absolutní tlak na prahu zdroje [kPa] 1600

Přesnost výpočtu tlak. difference okruhu [kPa] 0,01

Přesnost výpočtu tlaku v uzlech [%] 1

Absolutní drsnost potrubí [m] 0,00025

Teplota v referenčním uzlu [oC] 130

Teplota okolního vzduchu [oC] -12

Typ média

Pára

Voda

Způsob výp. hydraul. odporu

Nulové místní odpory

Zadávat pro každou větev

Počet větví s činným tlakem 0

OK

Obr. 23 Úvodní editační okno pro zadávání obecných parametrů potrubní sítě

Editační okno

Obecné Větve Uzly

Počáteční uzel 17

Konečný uzel 18

Vnitřní průměr potrubí [m] 0,5

Vnější průměr potrubí [m] 0,53

Tloušťka izolace [m] 0,18

Délka potrubí [m] 268

Tepel. vodivost izol. [W/mK] 0,09

Součet koef. místn. odporu 4,8

Hloubka uložení [m]

Činný tlak [Pa]

větev 18/122

Předchozí větev

Další větev

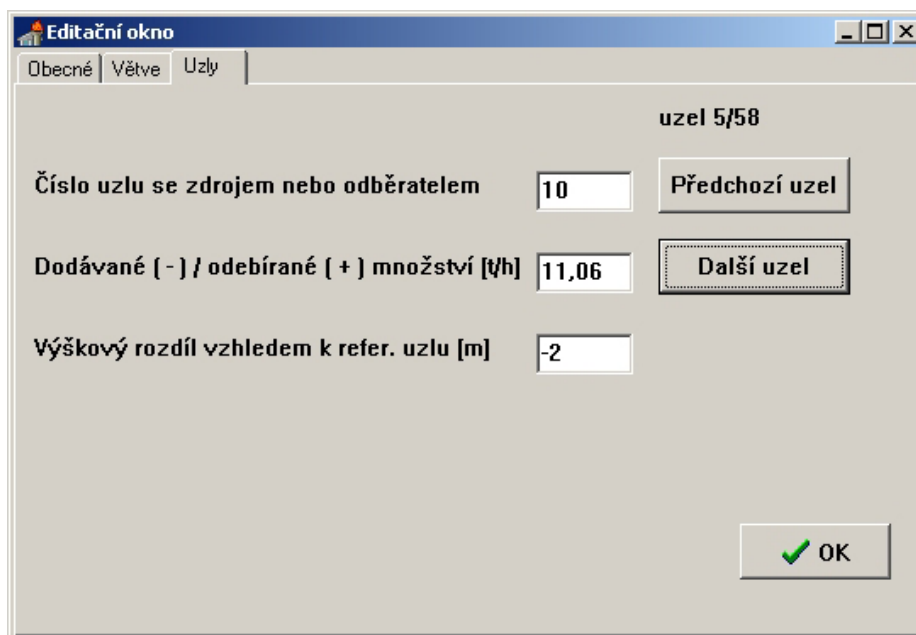
Uložení potrubí

Nadpovrchové

Podpovrchové

OK

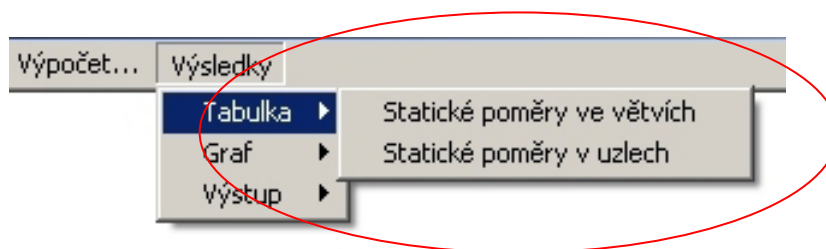
Obr. 24 Editační okno pro zadávání parametrů jednotlivých větví sítě



Obr. 25 Editační okno pro zadávání parametrů jednotlivých uzlů sítě

6.3 Položka „Výsledky“

Poslední položkou hlavního menu je funkce *Výsledky*, která slouží pro prezentaci vypočítaných hodnot. Po jejím výběru je rozvinuto další podmenu s nabídkou těchto tří funkcí: *Tabulka*, *Graf* a *Výstup* (viz. Obr. 26, Obr. 29, Obr. 31).



Obr. 26 Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky -
Tabulka

Jednotlivé nabídky se aktivují podobně jako u hlavního menu myší nebo pomocí kurzorových kláves. Položkou *Tabulka* je umožněno znázornit dosažené výsledky v přehledné tabelární formě na obrazovce počítače. První ze dvou možných tabulek, které lze v nabídce vybrat, znázorňuje statické poměry v jednotlivých větvích a druhá pak statické poměry v jednotlivých uzlech sítě. Jako výstupní vypočítané hodnoty se zobrazují:

pro každou větev (viz Obr. 27):

- hydraulický odpor [$\text{kPa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$]
- průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] / [t/h]
- tlaková ztráta [kPa] / [atm]
- rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- tepelná ztráta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$] / [kW]
- měrný objem [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$] (jen u páry)

pro každý uzel (viz Obr. 28):

- tlak [kPa] / [atm]
- teplota [$^{\circ}\text{C}$]
- dopravní zpoždění od zdroje [s]

pozn: Šedá pole na Obr. 28 značí odběratelské uzly, tj. uzly, ve kterých je umístěn odběratel

čís.vět.	poč.uzel	konc.uzel	průměr [m]	délka [m]	hydr.odpor [kPas ² /kg ²]	průtok [kg/s]	tl.ztráta [kPa]	rychlost [m/s]	tep.ztráta [kW]
1	0	1	0,25	15	0,0003	169,45	8,7325	3,6782	2,144
2	1	2	0,125	58	0,0468	8,0222	3,0146	0,6965	5,75
3	2	3	0,05	2	0,9545	0,6722	0,4313	0,3648	0,175
4	2	4	0,125	55	0,0374	7,35	2,0224	0,6382	5,446
5	4	5	0,05	95	8,7549	1,7528	26,8972	0,9512	8,252
6	4	6	0,125	113	0,0747	5,5972	2,3413	0,486	11,164
7	6	7	0,05	35	3,7313	0,3111	0,3612	0,1688	3,017
8	6	8	0,1	161	0,352	5,2861	9,8361	0,7171	16,599
9	8	9	0,05	42	4,3174	3,2722	46,2283	1,7757	3,628
10	9	10	0,05	3	1,0382	3,0722	9,7995	1,6672	0,259
11	9	11	0,025	30	112,678	0,2	4,5071	0,4341	1,778
12	8	12	0,08	319	2,2266	2,0139	9,0306	0,4269	28,404
13	12	13	0,065	25	0,8261	2,0139	3,3505	0,6467	2,562
14	1	14	0,125	260	0,1864	13,9417	36,2397	1,2105	25,752
15	14	15	0,125	70	0,082	11,1583	10,2094	0,9688	6,919
16	14	16	0,065	160	3,7246	2,7833	28,8546	0,8937	16,864
17	1	17	0,25	77	0,0017	146	36,9203	3,1691	6,611

Prům. dopravní zpoždění ETD=1681s, tj.28min; refer. bod se nachází ve větvi č. 92, 24,35m za uzlem č.92; var. koef.=76,4%

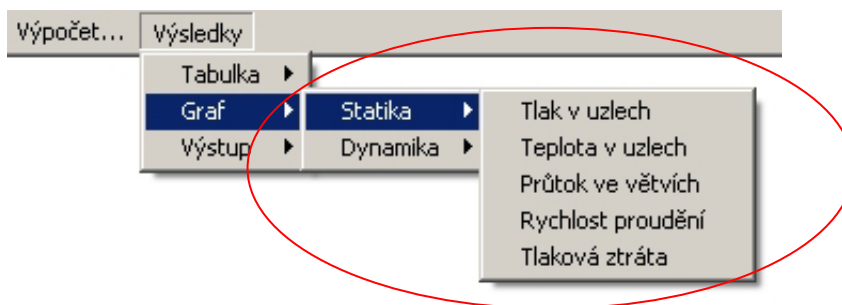
Obr. 27 Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů
 v tabelární formě – větve

uzel	tlak [kPa]	teplota [oC]	dopr. zpož. [s]
0	1600	130	0
1	1591.268	129.997	4.0781
2	1606.67	129.826	87.3472
3	1606.239	129.764	92.8298
4	1604.648	129.649	173.531
5	1577.751	128.524	273.4083
6	1602.306	129.172	406.0487
7	1620.362	126.856	613.36
8	1601.679	128.422	630.5506
9	1564.66	128.158	654.203
10	1554.86	128.138	656.0025
11	1560.153	126.034	723.3068
12	1629.482	125.054	1377.7997
13	1662.965	124.75	1416.4596
14	1508.986	129.556	218.8656
15	1480.36	129.408	291.1174
16	1452.507	128.109	397.8898

Prům. dopravní zpoždění ETD=1681s, tj.28min; refer. bod se nachází ve větvi č. 92, 24,35m za uzlem č.92; var. koef.=76,4%

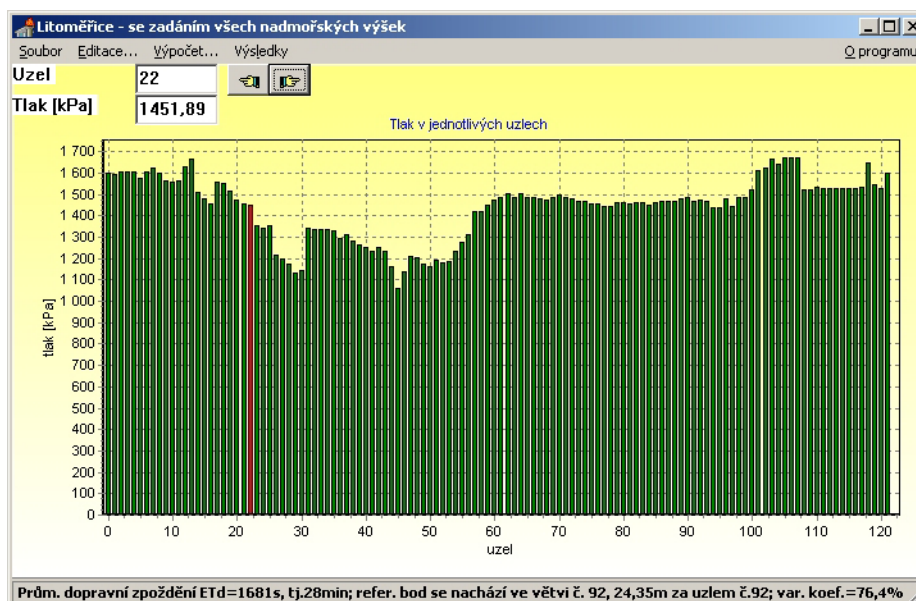
Obr. 28 Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů
 v tabelární formě - uzly

Po spuštění funkce *Graf* lze ve vnořeném menu (viz Obr. 29) vybrat buď položku *Statika* nebo *Dynamika* podle toho, jaké grafy chceme zobrazit. Pod položkou *Statika* se skrývá nabídka 5 grafů, které reprezentují výsledky výpočtu statických poměrů v dané tepelné síti.



Obr. 29 Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky – Graf – Statika

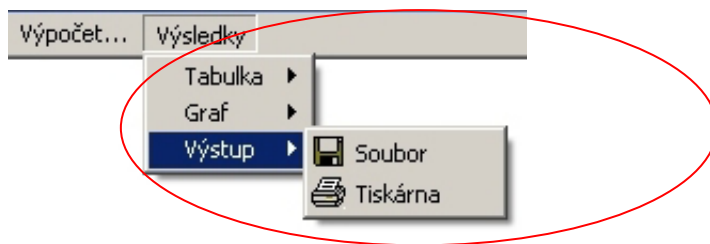
Výstupní proměnné (tlak, teplota, průtok, rychlost proudění, tlaková ztráta) se zobrazí na monitor ve formě jednoduchých sloupcových grafů. X-ová osa vždy představuje čísla větví nebo uzlů a y-ová osa skutečné hodnoty vybrané proměnné v těchto větvích či uzlech. Dají se tak snadno porovnávat jednotlivé parametry v různých místech potrubní sítě a také lokalizovat oblasti, ve kterých mohou některé parametry nabývat kritických mezí (maxima, minima). Odečítání hodnot proměnných z grafu usnadňují dvě směrová tlačítka umístěná v horní části grafu. Ta slouží k posunu aktivovaného, červeně zvýrazněného sloupce směrem doprava nebo doleva. Hodnoty proměnné, které aktivovaný sloupec představuje, lze pak sledovat ve dvou textových oknech v levém horním rohu (Obr. 30). Popis položky *Dynamika* je blíže popsán v odstavci 6.4.



Obr. 30 Ukázka prezentace výsledků výpočtu statických poměrů
v grafické formě

Informace o spočetlém průměrném dopravním zpoždění, poloze referenčního bodu a variačním koeficientu je možno odečítat ze spodního status baru, jak dokumentují například Obr. 27, Obr. 28 či Obr. 30.

Použitím funkce *Výstup* (viz Obr. 31) je možné tisknout výsledky na tiskárně nebo ukládat výstupní data do textového souboru txt či do souboru ve formátu xls (viz Obr. 32, Obr. 33). Při ukládání výsledků do souboru se zobrazuje standardní dialogový panel, ve kterém musí uživatel specifikovat jméno výstupního datového souboru. Dialogový box pro tisk umožňuje nastavovat druh použité tiskárny a její vlastnosti.



Obr. 31 Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky – Výstup

Microsoft Excel - vysledky.xls

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	číslo větve	počáteční uzel	koncový uzel	vnitřní průměr (m)	délka větve (m)	hydraulický odpor (kPa s ² /kg ²)	průtok (kg/s)	tlaková ztráta (kPa)	rychlost (m/s)	tepelná ztráta (W/m)		
2	1	0	1	0,25	15	0,000304129	169,45	8,732541945	3,67816579	142,93017		
3	2	1	2	0,125	58	0,046842679	8,02222222	3,014609767	0,69653735	99,14238		
4	3	2	3	0,05	2	0,954517627	0,67222222	0,431330018	0,36478973	87,302221		
5	4	2	4	0,125	55	0,037435341	7,35	2,022350726	0,63817099	99,020756		
6	5	4	5	0,05	95	8,754932647	1,75277778	26,89716619	0,95116661	86,866177		
7	6	4	6	0,125	113	0,074739837	5,59722222	2,341328659	0,48598433	98,792534		
8	7	6	7	0,05	35	3,731315302	0,31111111	0,361154469	0,1688283	86,205967		
9	8	6	8	0,1	161	0,352007643	5,28611111	9,83613926	0,71714344	103,09653		
10	9	8	9	0,05	42	4,317403992	3,27222222	46,22833674	1,77571199	86,375777		
11	10	9	10	0,05	3	1,038244583	3,07222222	9,799522765	1,66717951	86,288064		
12	11	9	11	0,025	30	112,6779967	0,2	4,507119866	0,43412993	59,279001		
13	12	8	12	0,08	319	2,226611504	2,01388889	9,030576169	0,42689914	89,04573		
14	13	12	13	0,065	25	0,826122644	2,01388889	3,35054564	0,64666378	102,46137		
15	14	1	14	0,125	260	0,186446981	13,9416667	36,23971257	1,21049894	99,048071		
16	15	14	15	0,125	70	0,081997612	11,1583333	10,20939172	0,96883328	98,842227		
17	16	14	16	0,065	160	3,724638323	2,78333333	28,85456616	0,89373394	105,40311		
18	17	1	17	0,25	77	0,001732047	146	36,92031634	3,16914846	85,861669		
19	18	17	18	0,5	268	0,000189722	146	4,044105758	0,79228711	152,91983		
20	19	18	19	0,25	294	0,006950691	68,9368961	33,03170227	1,49637761	87,411424		
21	20	19	20	0,25	410	0,009623706	68,9368961	45,73464262	1,49637761	87,342023		
22	21	20	21	0,25	119	0,003719189	68,9368961	17,67466414	1,49637761	87,289898		
23	22	21	22	0,032	12	15,36978275	0,35833333	1,973522799	0,47474128	40,528265		
24	23	21	23	0,25	612	0,011864966	68,5785228	55,80110068	1,48859945	87,217637		
25	24	23	24	0,15	16	0,017861986	12,5472222	2,812062198	0,75654509	71,430061		
26	25	23	25	0,2	3	0,000329447	56,0313006	1,03430003	1,90038003	77,129788		
27	26	25	26	0,2	245	0,021187381	19,9555556	8,437327749	0,67682061	77,064377		
28	27	26	27	0,05	25	2,963086421	0	0	0	0		
29	28	26	28	0,2	83	0,007820179	19,9555556	3,114184386	0,67682061	84,663183		
30	29	28	29	0,15	91	0,040614768	11,4194444	5,296318512	0,6885448	71,233618		
31	30	28	30	0,2	279	0,025784118	8,53611111	1,878764757	0,28951416	84,427607		
32	31	25	31	0,2	235	0,016529315	36,075745	21,51223253	1,22355941	77,094935		
33	32	31	32	0,15	73	0,035372303	11,6083333	4,684769231	0,69390443	71,342459		
34	33	31	33	0,2	110	0,007494979	24,5674117	4,523652431	0,83323817	217,86406		
35	34	33	34	0,2	15	0,001485419	32,6972222	1,58807416	1,10897208	76,923647		
36	35	34	35	0,2	90	0,00551442	32,6972222	5,895512388	1,10897208	76,906646		
37	36	35	36	0,15	108	0,032648086	13,1333333	5,631267033	0,79188514	71,178126		

Obr. 32 Ukázka uložení výsledků výpočtu statických poměrů v xls souboru

vysledky.txt - Notepad

File Edit Format View Help

Název sítě: Litoměřice - se zadáním všech nadmořských výšek

větev	uzel	průměr	délka	hydraul.	průtok	tlaková	rychl.	tepel.	
POČ	KONČ	[m]	[m]	odpor	[kg/s]	ztráta	[m/s]	ztráta	
-	-	-	-	[kPas ² /kg ²]	-	[kPa]	-	[W/m]	
1	0	1	0.250	15.0	3.0E-0004	169.450	8.7325	3.68	142.9
2	1	2	0.125	58.0	4.7E-0002	8.022	3.0146	0.70	99.1
3	2	3	0.050	2.0	9.5E-0001	0.672	0.4313	0.36	87.3
4	2	4	0.125	55.0	3.7E-0002	7.350	2.0224	0.64	99.0
5	4	5	0.050	95.0	8.8E+0000	1.753	26.8972	0.95	86.9
6	4	6	0.125	113.0	7.5E-0002	5.597	2.3413	0.49	98.8
7	6	7	0.050	35.0	3.7E+0000	0.311	0.3612	0.17	86.2
8	6	8	0.100	161.0	3.5E-0001	5.286	9.8361	0.72	103.1
9	8	9	0.050	42.0	4.3E+0000	3.272	46.2283	1.78	86.4
10	9	10	0.050	3.0	1.0E+0000	3.072	9.7995	1.67	86.3
11	9	11	0.025	30.0	1.1E+0002	0.200	4.5071	0.43	59.3
12	8	12	0.080	319.0	2.2E+0000	2.014	9.0306	0.43	89.0
13	12	13	0.065	25.0	8.3E-0001	2.014	3.3505	0.65	102.5
14	1	14	0.125	260.0	1.9E-0001	13.942	36.2397	1.21	99.0
15	14	15	0.125	70.0	8.2E-0002	11.158	10.2094	0.97	98.8
16	14	16	0.065	160.0	3.7E+0000	2.783	28.8546	0.89	105.4
17	1	17	0.250	77.0	1.7E-0003	146.000	36.9203	3.17	85.9
18	17	18	0.500	268.0	1.9E-0004	146.000	4.0441	0.79	152.9
19	18	19	0.250	294.0	7.0E-0003	68.937	33.0317	1.50	87.4
20	19	20	0.250	410.0	9.6E-0003	68.937	45.7346	1.50	87.3
21	20	21	0.250	119.0	3.7E-0003	68.937	17.6747	1.50	87.3
22	21	22	0.032	12.0	1.5E+0001	0.358	1.9735	0.47	40.5
23	21	23	0.250	612.0	1.1E-0002	68.579	55.8011	1.49	87.2
24	23	24	0.150	16.0	1.8E-0002	12.547	2.8121	0.76	71.4
25	23	25	0.200	3.0	3.3E-0004	56.031	1.0343	1.90	77.1
26	25	26	0.200	245.0	2.1E-0002	19.956	8.4373	0.68	77.1
27	26	27	0.050	25.0	3.0E+0000	0.000	0.0000	0.00	0.0
28	26	28	0.200	83.0	7.8E-0003	19.956	3.1142	0.68	84.7
29	28	29	0.150	91.0	4.1E-0002	11.419	5.2963	0.69	71.2
30	28	30	0.200	279.0	2.6E-0002	8.536	1.8788	0.29	84.4
31	25	31	0.200	235.0	1.7E-0002	36.076	21.5122	1.22	77.1
32	31	32	0.150	73.0	3.5E-0002	11.508	4.6848	0.69	71.3
33	31	33	0.200	110.0	7.5E-0003	24.567	4.5237	0.83	217.9
34	33	34	0.200	15.0	1.4E-0003	32.697	1.5881	1.11	76.9
35	34	35	0.200	90.0	5.5E-0003	32.697	5.8955	1.11	76.9
36	35	36	0.150	108.0	3.3E-0002	13.133	5.6313	0.79	71.2
37	35	37	0.200	324.0	2.1E-0002	19.564	7.8584	0.66	76.8
38	37	38	0.150	480.0	1.3E-0001	7.447	7.2555	0.45	46.4
39	38	39	0.125	115.0	7.7E-0002	6.447	3.2055	0.56	41.7
40	39	40	0.125	24.0	1.6E-0002	6.447	0.6745	0.56	41.7
41	40	41	0.050	10.0	1.6E+0000	0.769	0.9699	0.42	36.7
42	40	42	0.125	24.0	1.6E-0002	5.678	0.5231	0.49	41.6
43	42	43	0.125	43.0	2.9E-0002	5.175	0.7711	0.45	41.6
44	43	44	0.080	258.0	1.8E+0000	2.239	9.0330	0.47	38.2
45	44	45	0.065	236.0	5.3E+0000	1.339	9.4151	0.43	42.3
46	44	46	0.050	7.0	1.4E+0000	0.900	1.1234	0.49	36.4
47	43	47	0.065	82.0	1.7E+0000	2.936	14.7888	0.94	42.9
48	47	48	0.050	14.0	2.0E+0000	1.628	5.2279	0.88	36.6
49	48	49	0.040	21.0	7.7E+0000	1.189	10.9347	1.01	31.9
50	48	50	0.040	34.0	1.1E+0001	0.439	2.1625	0.37	31.8
51	47	51	0.065	136.0	2.8E+0000	1.308	4.8648	0.42	42.7
52	51	52	0.050	36.0	3.8E+0000	1.308	6.5303	0.71	36.2

Obr. 33 Ukázka uložení výsledků výpočtu statických poměrů v txt souboru

Konec práce s programem se provádí pomocí funkce Soubor – Konec nebo užitím standardních prostředků ve Windows, tj. kombinací kláves Alt + F4 či tlačítkem závěr v pravém horním rohu okna. Program SIMTS se tak ukončí a systém se vrátí do původního stavu.

6.4 Položka „Výsledky – Graf – Dynamika“

Jak již bylo popsáno v kapitole 5.4 výpočtový program nově zahrnuje i sledování dynamiky horkovodní sítě, resp. sledování odezvy horkovodní sítě při měnících se provozních podmínkách. Podstatou těchto výpočtů je pravidelná cyklická aktualizace informací o spotřebě tepla v jednotlivých odběrných bodech sloužící pro pravidelné upřesňování hydraulických poměrů v síti a dále pak pravidelná aktualizace venkovní teploty a teploty na prahu zdroje (zdrojů), na kterou pak navazuje výpočet nových teplotních poměrů včetně sledování dynamiky těchto tepelných toků.

Pro tyto účely bylo nutné zajistit pravidelné načítání výše uvedených aktualizovaných hodnot a opakované spouštění celého výpočtu. Aktualizovaná vstupní data jsou uložena a načítána z xls souboru, jehož formát byl pro tyto účely zvolen vzhledem k široké dostupnosti a snadné manipulaci s daty. Do vstupního datového souboru byl přidán nový list nazvaný „dynamika“, ve kterém jsou pro každý časový okamžik uložena aktualizovaná data, a to v následující struktuře, viz Obr. 34:

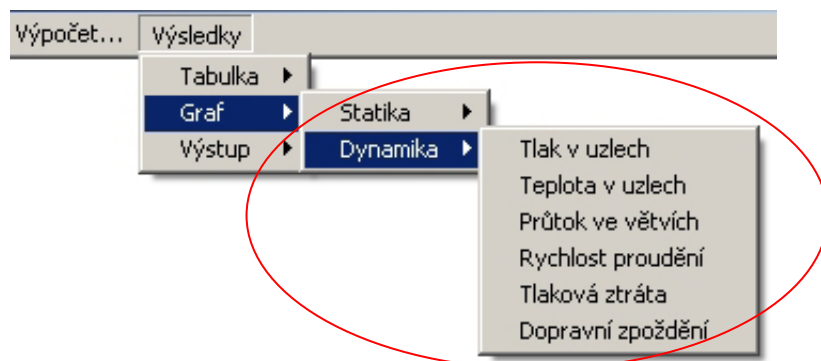
sloupec A: čas
sloupec B: teplota okolního vzduchu [°C]
sloupec C-F: teplota ve zdroji X [°C]
sloupec G-K: dodávka ze zdroje X [t/h]
sloupec L-...: odběr spotřebitele v uzlu U [t/h]

čas	teplota okolního vzduchu (°C)	teplota ve zdroji 1 (°C)	dodávka ze zdroje 1 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 3 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 5 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 7 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 10 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 11 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 12 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 13 (t/h)	odběr spotřebitele v uzlu 15 (t/h)
0:00	8,8	130	-171,00057	0,09923781	0	1	4,246146696	0,1	3,542	13,51047236	5,038
1:00	8,3	130	-178,2103565	0,096900035	5	0	4,417024795	0,4	2,549	14,23968686	5,038
2:00	8,3	130	-171,2552265	0,096900035	5	0	4,417024795	0,3	2,337	14,23968686	3,038
3:00	8,6	130	-179,9679367	0,09923781	3	0	4,246146696	0,3	2,295	13,51047236	3,038
4:00	8,8	130	-215,997957	0,09923781	3	0	4,246146696	0,3	2,560	13,51047236	4,711
5:00	8,3	130	-234,1228865	0,096900035	3	0	4,417024795	0,3	2,63	14,23968686	6,711
6:00	8,3	130	-234,9264865	0,096900035	4	1	4,417024795	0,3	2,798	14,23968686	6,711
7:00	8,3	130	-215,0243765	0,096900035	3	1	4,417024795	0,3	2,04	14,23968686	6,711
8:00	8,2	130	-224,1336681	0,096203925	3	0	4,45064008	0,3	2,342	14,3649574	6,711
9:00	8,2	130	-230,2824081	0,096203925	4	1	4,45064008	0,3	2,049	14,3649574	5,96
10:00	8,2	130	-225,9846761	0,096203925	3	0	4,45064008	0,3	2,453	14,3649574	5,96
11:00	8,2	130	-220,6875581	0,096203925	3	1	4,45064008	0,3	2,03	14,3649574	5,96
12:00	8,2	130	-222,2582981	0,096203925	3	0	4,45064008	0,3	2,078	14,3649574	5,96
13:00	8,1	130	-211,4843893	0,0957573	1	0	4,484056827	0,3	2,195	14,49102238	5,918
14:00	8,1	130	-220,7911493	0,0957573	0	0	4,484056827	0,3	1,982	14,49102238	5,918
15:00	8,1	130	-236,4517893	0,0957573	0	0	4,484056827	0,2	2,462	14,49102238	5,918
16:00	8,1	130	-216,6402993	0,0957573	1	0	4,484056827	0,3	2,85	14,49102238	5,918
17:00	8,1	130	-220,7911493	0,0957573	0	0	4,484056827	0,3	1,478	14,49102238	5,918
18:00	7,9	130	-232,6826121	0,094230207	0	0	4,55027455	0,3	2,697	14,74334745	3,911
19:00	7,3	130	-260,0239505	0,09980866	1	1	4,743638705	0,3	2,025	15,50126797	4,76
20:00	7,8	130	-225,9936594	0,093516437	0	0	4,593065447	0,3	2,822	14,86959044	4,52
21:00	7,8	130	-217,1000894	0,093516437	0	0	4,593065447	0,4	2,899	14,86959044	4,98
22:00	7,3	130	-183,0258205	0,09980866	1	0	4,743638705	0,2	2,294	15,50126797	2,21
23:00	7,3	130	-194,4856705	0,09980866	0	0	4,743638705	0,2	2,088	15,50126797	4,37

Obr. 34 Ukázka způsobu uložení vstupních dat (aktualizovaných hodnot v daných časových okamžicích) pro účely sledování dynamiky horkovodní sítě

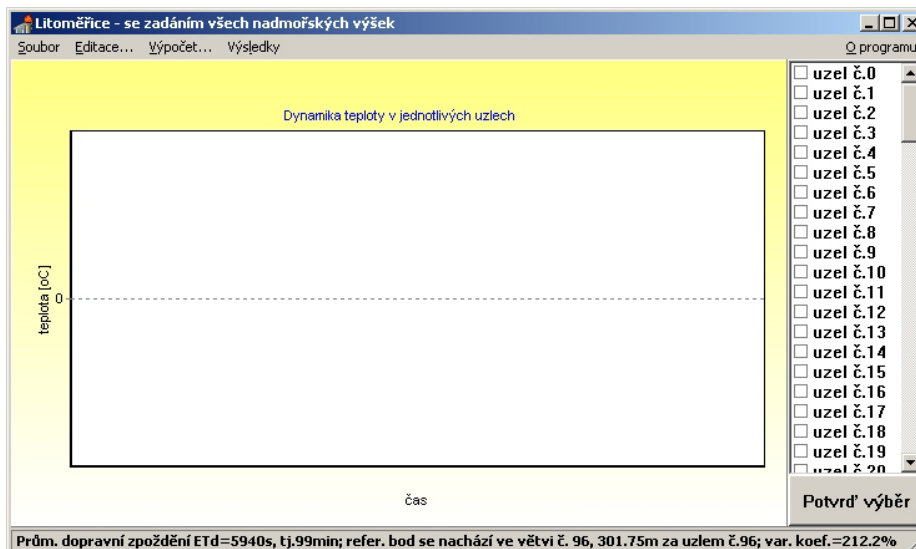
Takto zpracovaná data jsou připravena pro jednorázový off-line výpočet, ovšem pokud by v provozu bylo možné zajistit pravidelný odečet vstupních dat, lze výpočty realizovat i on-line. Za této situace by bylo nutné připravit např. jednoduché makro, s jehož pomocí by se aktualizovaná data převáděla ze stávající formy zavedené v konkrétním teplotárenském podniku (mdb, xls, dbf, ...) na požadovaný formát v xls (předzpracování dat).

Výběr a zobrazení časových průběhů sledovaných veličin, tj. výsledků výpočtu dynamického chování horkovodní sítě, lze iniciovat kliknutím na položku *Dynamika* v podmenu výpočtového programu (viz Obr. 35). Stejně jako u výpočtu statických poměrů je i zde k dispozici výběr 5 grafů, které zobrazují výsledky výpočtu dynamického chování horkovodní sítě. Navíc jako šestý graf lze ještě sledovat dynamiku dopravního zpoždění.

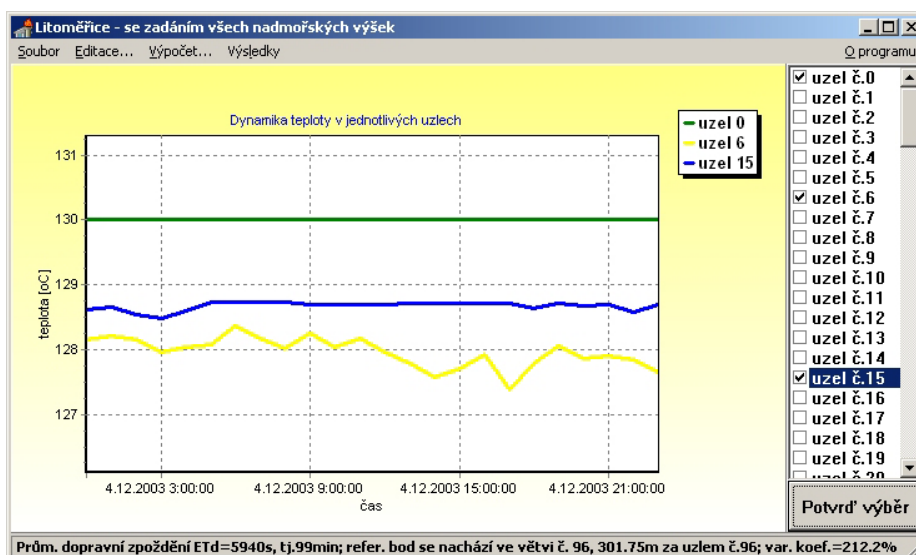


Obr. 35 Okno výpočtového programu s rozvinutou položkou Výsledky
– Graf – Dynamika

Po vybrání příslušné položky (grafu) se uprostřed obrazovky zobrazí pouze prázdný graf s nadpisem a popisem jeho souřadnic, viz Obr. 36. Pro zobrazení celého grafu je nejprve zapotřebí v pravé části obrazovky vybrat větve nebo uzly, v kterých se má příslušná zobrazovaná veličina sledovat. U rozsáhlejších horkovodních sítí s velkým množstvím uzlů a větví by v případě zobrazování hodnot dané veličiny ve všech větvích či uzlech činilo graf značně nepřehledný a nečitelný. Proto je třeba vybrat pouze ta místa sítě, která jsou konkrétně předmětem zájmu - jako rozumné se jeví zobrazování max. 10 řad do jednoho grafu. Po zaškrtnutí žádaných položek v seznamu uzlů/větví je třeba kliknout na tlačítko „Potvrď výběr“ v pravém dolním rohu obrazovky, čímž je spuštěno vykreslování příslušného grafu. Ukázkou grafického zobrazení sledovaných veličin v čase představuje Obr. 37.



Obr. 36 Vzhled obrazovky po vybrání jedné z položek v menu
Výsledky – Graf – Dynamika



Obr. 37 Ukázka grafického zobrazení časových průběhů teploty ve
vybraných uzlech 0, 6, 15

7 HLAVNÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU

7.1 Využití při operativním řízení dodávky tepla horkovodem

Možnost simulace poměrů v síti pro různé výkony zdrojů nebo různé odběry spotřebitelů, kterou vzniklý výpočtový program poskytuje, může být v teplotních dispečincích velmi užitečnou pomůckou při řízení dodávky tepla do horkovodní sítě. Základní myšlenkou v této oblasti je možnost realizovat na horkovodních teplotních soustavách tzv. kvalitativně - kvantitativní způsob řízení tepelného výkonu horkovodu [5], [6].

Algoritmus kvalitativně - kvantitativního způsobu řízení s využitím predikce průběhu denního diagramu dodávky tepla v horkovodních systémech centralizovaného zásobování teplem umožňuje eliminovat vliv dopravního zpoždění mezi teplotním výměníkem ve zdroji tepla a relativně soustředěným odběrem tepla všemi spotřebiteli. Tento způsob řízení výkonu horkovodu spočívá v současném a průběžném působení dvou akčních veličin ovlivňujících přenášený tepelný výkon a ve využívání předpovědi požadovaného tepelného výkonu v dané lokalitě. K řízení tepelného výkonu horkovodu jsou k dispozici tyto dvě akční veličiny:

- pro kvalitativní způsob řízení změna rozdílu mezi teplotami vody v přívodním a vratném potrubí horkovodu, realizovaná změnou tepelného příkonu v páře na vstupu do teplotního výměníku,
- pro kvantitativní způsob řízení změna hmotnostního toku horké vody realizovaná změnou otáček oběhového čerpadla.

Platí následující vztah:

$$P_T = M_v \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (39)$$

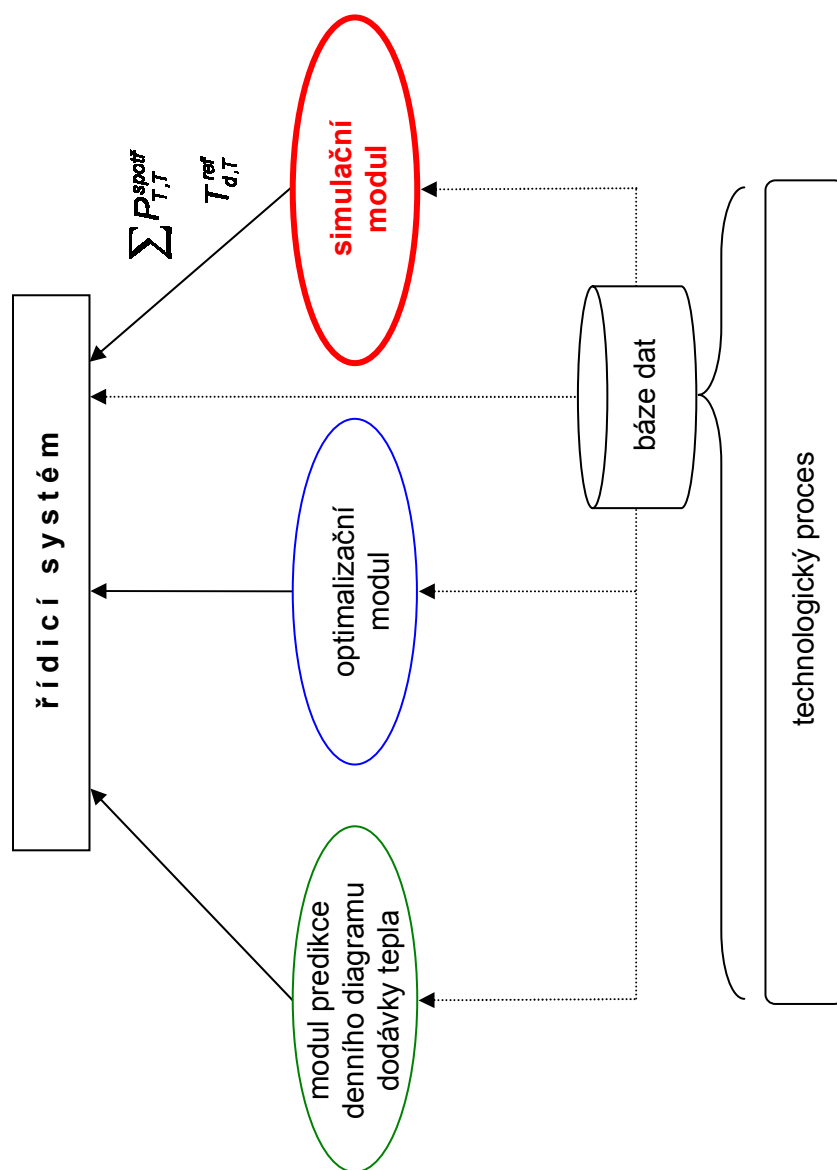
\uparrow
 kvantitativní
 způsob řízení

\uparrow
 kvalitativní
 způsob řízení

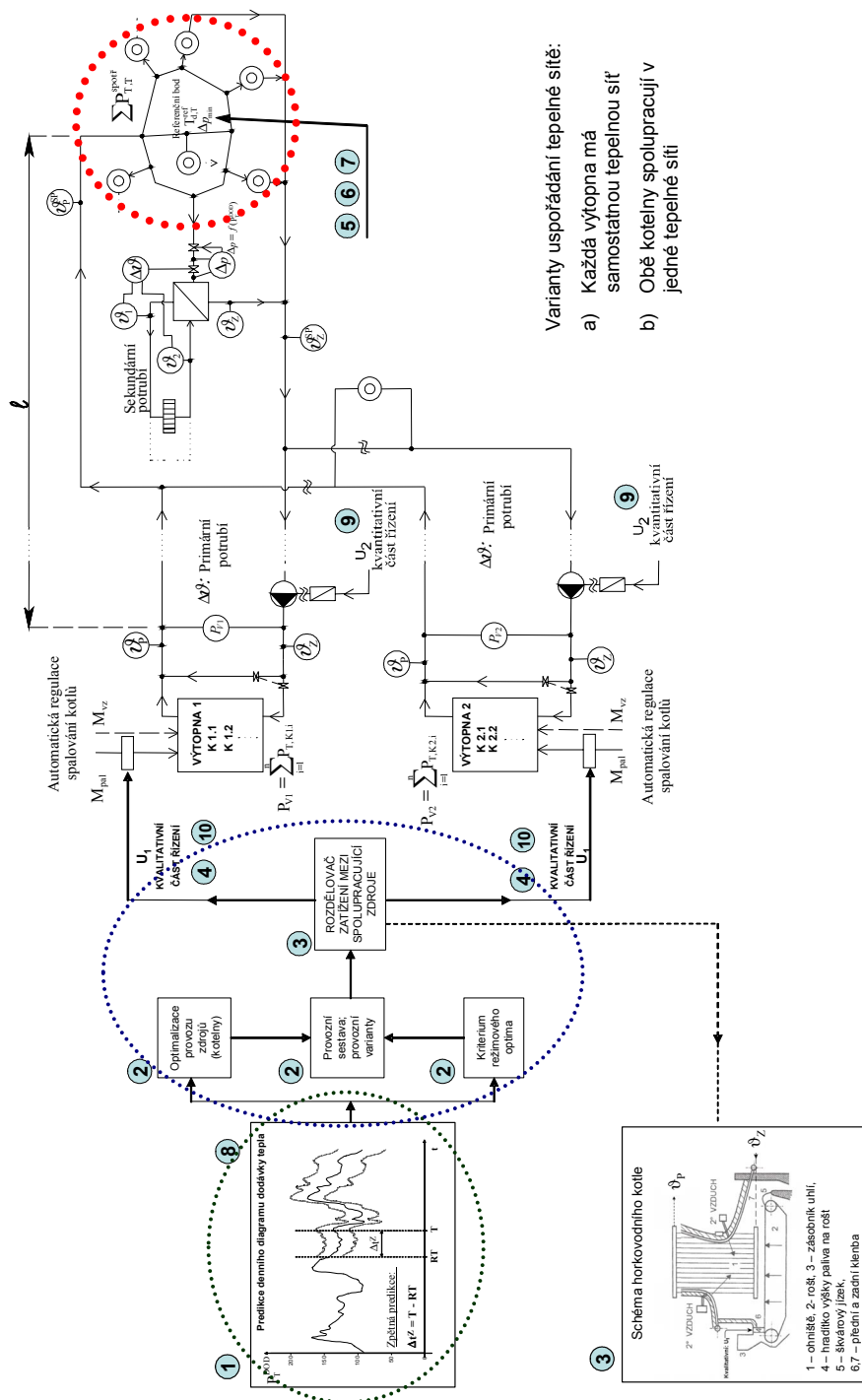
kde: P_T [W] je tepelný výkon horkovodu,
 M_v [kg.s⁻¹] - hmotnostní tok teplonosného média,
 $\Delta\vartheta$ [°C] - teplotní spád,
 c [J.kg⁻¹K⁻¹] - měrná tepelná kapacita.

Tato metoda je však vhodná pro případy, kdy odběratelé tepla jsou relativně lokálně soustředěni. Problém ovšem nastává u rozsáhlých zokruhovaných sítí, kde vzdálenost jednotlivých odběratelů mezi sebou navzájem je významná. Proto se zdálo být vhodné nalézt u každé takové sítě tzv. referenční bod tepelné sítě, jak je podrobně popsáno v odstavci 5.3. Tento bod prakticky představuje místo v tepelné síti, na které můžeme pohlížet jako na soustředění všech odběratelů právě do tohoto místa. K referenčnímu bodu by pak bylo možné vztáhnout již dříve zmiňovaný způsob řízení, resp. jeho modifikaci č. III popsanou ve výzkumné zprávě VZ UTB-FT-IIT/2003/1 [42]. Nově vzniklá modifikace nazvaná „*Algoritmus kvalitativně - kvantitativního způsobu řízení výkonu horkovodu s horkovodními kotli jako zdroji tepla*“ byla navržena profesorem Balátě v roce 2003. Principiální schéma je naznačeno na Obr. 39.

Tento algoritmus vyžaduje pravidelnou aktualizaci informace o okamžité spotřebě tepla $\sum P_{T,T}^{spotř}$ a o průměrném dopravním zpoždění v referenčním bodě horkovodní sítě $T_{d,T}^{ref}$. Tyto informace může cyklicky vypočítávat a pro nadřazený řídicí systém zajišťovat právě simulační modul, jak je schematicky naznačeno na Obr. 38.



Obr. 38 Možné začlenění simulačního modulu do řídicího systému



Obr. 39 Algoritmus kvalitativně-quantitativního způsobu řízení výkonu horkovodu s horkovodními kotli jako zdroji tepla

Legenda k Obr. 39:

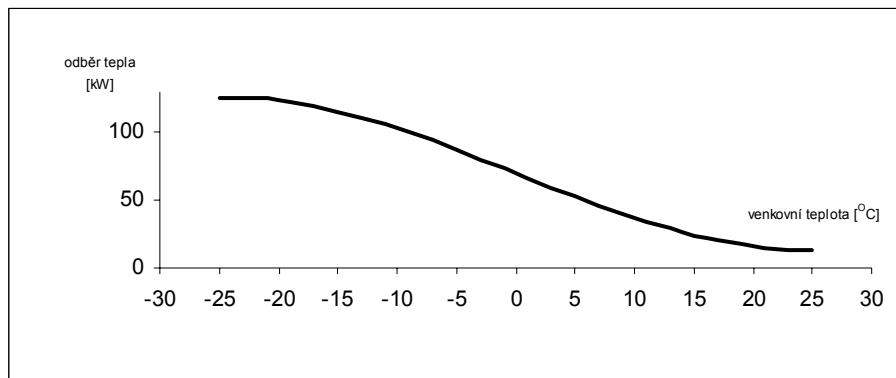
c - měrná tepelná kapacita, l - délka přívodního větve tepelného napáječe, RT - reálný čas (čas ve kterém působí akční veličina kvalitativního způsobu řízení na horkovodním kotli), S - průřez přívodní větve napáječe, T - čas, ve kterém se projeví působení akční veličiny kvalitativního způsobu řízení u lokálně soustředěných spotřebitelů, T_d - dopravní zpoždění, $T_{d,T}^{ref}$ - dopravní zpoždění v referenčním místě horkovodní sítě v čase T , Δt^Z - doba zpětné predikce (čas, o který je nutné dříve změnit akční veličinu kotlů, aby se změna tepelného výkonu horkovodního kotle kvalitativním způsobem řízení projevila v čase T , t_K - doba přechodu regulace výkonu kotle, $t_{Kstřed}$ - střední doba přechodu regulace výkonu celé kotelny, T_{VZ} - perioda vzorkování, $P_T^{p,DOD}$ - předpověď denního diagramu dodávky (vyrobeného) tepelného výkonu - DDDT, u - číslo časového úseku DDDT, $P_{T,RT}^{p,DOD,u}$ - předpověděný dodávaný (vyrobený) tepelný výkon v čase RT a v časovém úseku č. u , $P_{T,Vj,RT}^u$ - tepelný výkon kotelny č. j v čase RT v časovém úseku č. u , $P_{T,Kj,i}$ - tepelný výkon horkovodního kotle č. i ve výrobně č. j , $\Delta v = v_p - v_z$ - teplotní rozdíl v přívodním v_p a zpětném v_z potrubí horkovodní sítě, $M_{pal,Vj}$ - tepelný výkon v palivu výroby č. j , Δv_{RT}^p - teplotní rozdíl předpověděný v čase RT , tj. teplotní spád v čase RT odpovídající předpověděnému vyráběnému výkonu kotlů, $\sum P_{T,T}^{spotf}$ - odebíraný tepelný výkon všemi spotřebiteli v čase T , $\Delta p^{čerp}$ - tlaková diference oběhového čerpadla v horkovodní síti, Δp^{ref} - tlaková diference v referenčním bodě zokruhované horkovodní sítě, $\Delta M_{v,T}$ - oprava hmotnostního toku horké vody v čase T , $P_{T,Vj,RT}^p$ - předpověděný tepelný výkon horkovodních kotlů kotelny č. j v čase RT , $P_{T,RT}^{p,DOD}$ - předpověděný tepelný výkon vyráběný v čase RT , $P_{T,Kj,i,RT}^p$ - předpověděný tepelný výkon kotle č. i kotelny č. Kj , $M_{v,RT}^p$ - předpověděný hmotnostní tok v čase RT , $\Delta v_T^{p,Q}$ - korekce tepelného příkonu na horkovodním kotli v čase T zahrnující korekci tepelného obsahu v přiváděcí větvi napáječe a současně i v palivu na roštu horkovodního kotle, v_p^{SP} - teplota horké vody v přívodním potrubí v síti spotřebitelů, v_z^{SP} - teplota horké vody ve zpětném potrubí v síti spotřebitelů.

Stanovování okamžité spotřeby tepla $\sum P_{T,T}^{spotř}$ a průměrného dopravního zpoždění v referenčním bodě horkovodní sítě $T_{d,T}^{ref} = E_{Td}$ bude záviset na frekvenci, s jakou lze odečítat okamžité odebírané výkony spotřebitelů a dodávané výkony zdroje. Tyto podklady jsou pro výpočtový program vzhledem k zajištění aktuálnosti zásadní (parametry potrubí se během provozu nemění). Předpokládáme-li, že řídicí systém je umístěn ve zdroji tepla, odečty okamžitých výkonů dodávaných ze zdroje zřejmě nebude problém zajistit. Jiná však může být situace u odběratelů. Ne vždy je totiž možné z dispečinku monitorovat aktuální odběry na výměňkových stanicích - chybí komunikační linka mezi dispečinkem a výměňkovou stanicí. V tomto případě je nutné skutečný odebíraný výkon spotřebitele určitým způsobem odhadovat či aproximovat, např. pomocí topné charakteristiky příslušného odběratele, tj. pomocí závislosti odebíraného výkonu na venkovní teplotě viz Obr. 40.

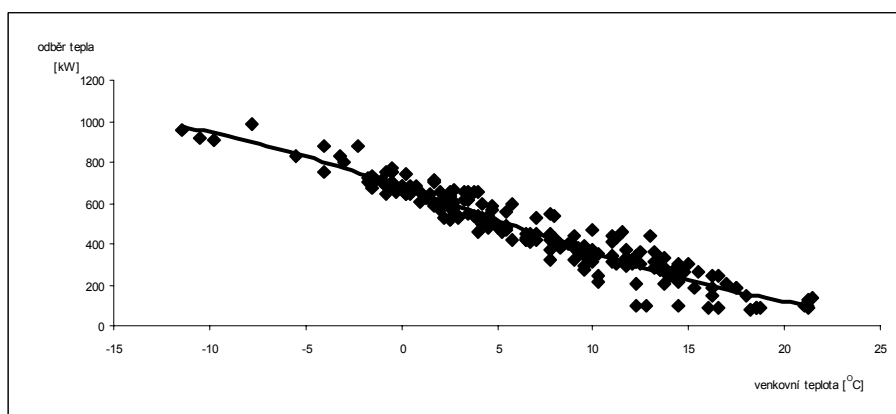
Čím přesněji by se pak daly určit odběry jednotlivých spotřebitelů, tím přesněji by se dala počítat aktuální hodnota průměrného dopravního zpoždění a poloha referenčního bodu. Ideální by samozřejmě bylo zajistit sběr aktuálních dat přímo odečtem ze sítě.

Při aproximaci nelineární topné charakteristiky se však naráží na řadu úskalí, např. jinak se může za stejné venkovní teploty chovat odběratel při růstu venkovní teploty a jinak při poklesu venkovní teploty, jinak v letním, zimním a přechodovém období, apod. Topné charakteristiky sestavené z reálných denních nebo měsíčních odečtů pak vykazují značnou nesourodost a hledaná závislost odběru tepla na venkovní teplotě se stanovuje stěží. Proto se v mnohých případech při

použití standardních technik nelineární aproximace nedosahuje potřebné přesnosti výpočtu a korelační koeficient je nízký.



Obr. 40 Ukázka idealizovaného průběhu topné charakteristiky

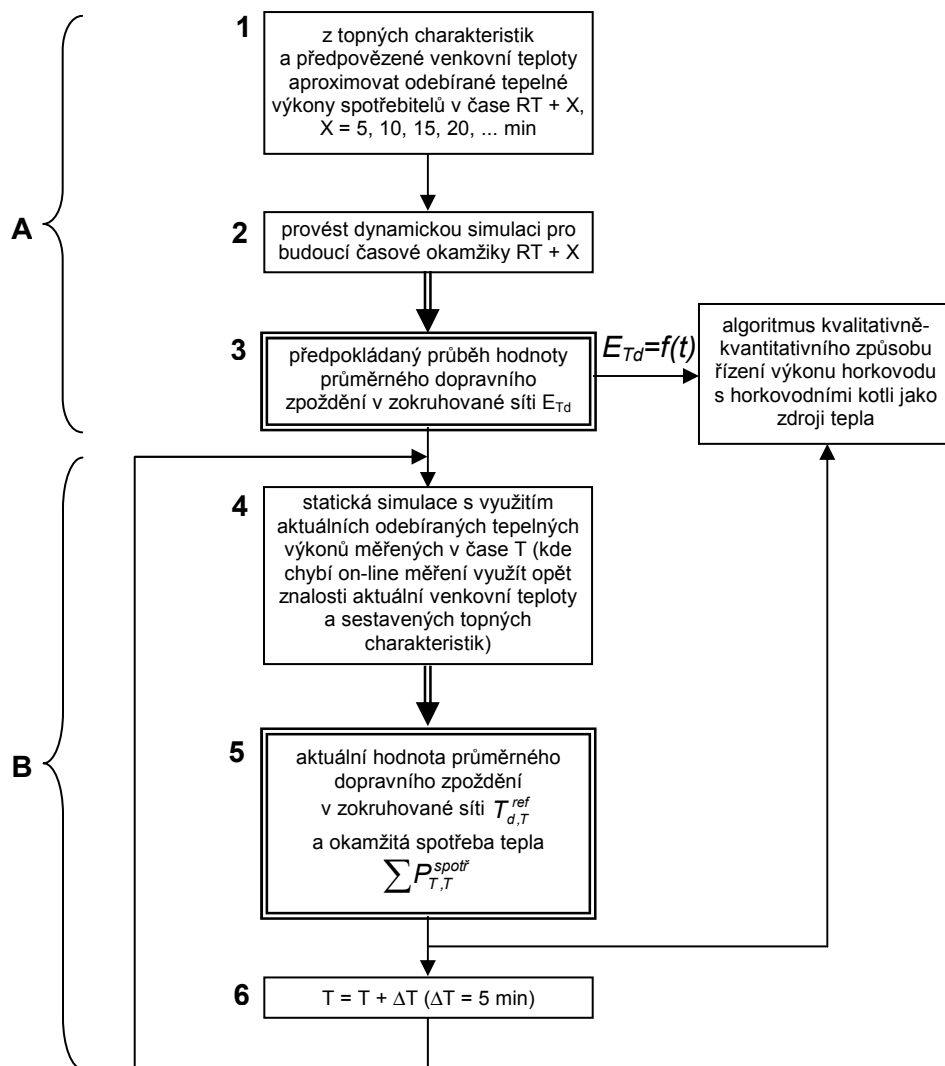


Obr. 41 Ukázka reálné topné charakteristiky zpracované z naměřených dat

Při uvažování výše uvedených skutečností by se nakonec dalo konkrétní využití simulačního modulu charakterizovat následujícím postupem: V každé vzorkovací periodě by se odečítaly nebo z příslušné topné charakteristiky aproximovaly nové odběry

spotřebitelů, na základě toho by se provedl součet všech odběrů, spočítaly se hydraulické poměry, určila poloha referenčního bodu a aktuální průměrné dopravní zpoždění v referenčním bodě. Takto získané údaje by byly s každým odečtem (vzorkováním) k dispozici pro nadřazený řídicí systém, v němž by byl implementován *algoritmus kvalitativně – kvantitativního způsobu řízení výkonu horkovodu s horkovodními kotli jako zdroji tepla*.

Tento postup je zobrazen schematicky na Obr. 42, oddíl B. Čas T značí aktuální časový okamžik. V oddíle A na Obr. 42 je pak naznačeno, jak využít dynamických simulací při nastartování celého řídicího algoritmu. Protože průměrné dopravní zpoždění se během dne mění, je nutné při rozjezdu algoritmu tuto skutečnost respektovat a kvalitativní zásahy na zdroji v čase RT provádět podle nasimulovaného průběhu hodnoty dopravního zpoždění.



Obr. 42 Využití programu SIMTS pro řízení dodávky tepelné energie do zokruhované horkovodní sítě v reálném čase

7.2 Využití při optimalizaci provozu teplárenských soustav s více zdroji tepla

Při zajišťování potřeb tepla u velkých teplárenských soustav s dvěma a více nezávislými zdroji tepla (např. ve velkých městech nebo městských aglomeracích) je třeba uvažovat nad hospodárností při rozdělování celkového zatížení na jednotlivé kooperující tepelné zdroje. Z tohoto hlediska je nutné analyzovat ekonomiku výroby jednotlivých zdrojů a také ekonomiku dopravy vyrobené tepelné energie z jednotlivých zdrojů. Cílem tohoto snažení je pak nalézt tzv. *optimální provozní sestavu tepelných zdrojů*, jak je definováno v [22], více též v [2]. Obecně lze konstatovat, že pro dané celkové zatížení teplárenské soustavy existuje pouze jediný případ rozdělení zatížení mezi spolupracující tepelné zdroje a to takový, aby při další změně rozdělení zatížení již nebylo možno dosáhnout snížení provozních nákladů celé teplárenské soustavy (optimální provozní sestava). Taková varianta rozdělení zatížení mezi jednotlivé tepelné zdroje bude variantou s nejnižšími náklady, tedy variantou ekonomicky optimální. Uvedená problematika je velmi široká a tato práce si neklade za cíl ji řešit. V následujících řádcích chci pouze nastínit možnosti, jak využít výsledků simulací při optimalizaci dodávky tepla ze zdrojů a jak lze optimalizaci se simulací vzájemně provázat.

Při hledání optimální provozní sestavy tepelných zdrojů je nejprve nutné rozhodnout o kritériu, podle kterého se bude stanovovat, nakolik je daná varianta rozdělení zatížení ekonomicky optimální. Pokud předpokládáme, že kromě nákladů na palivo ostatní složky nákladů nezávisí na rozdělení zatížení, můžeme za toto kritérium, označované jako *kritérium režimového optima*, zvolit minimum nákladů na palivo. Toto kritérium je v elektrizační soustavě pro rozdělování

zatížení mezi spolupracující kondenzační elektrárny běžně uplatňováno [17]. Pro rozdělování zatížení mezi zdroji SCZT, kde spolupracují výtopny i teplárny s protitlakovými a koncovými kondenzačními turbínami, se podle [2] nejeví toto kritérium jako výstižné a bylo nahrazeno kritériem minima energetické náročnosti, jenž respektuje vliv spotřeby elektřiny na dodané teplo u výtopny a závislou výrobu elektřiny u teplárny. Obecně lze základní vztah pro kritérium režimového optima definovat následovně:

$$b_{disp}^{ZDROJE} = c_{PAL} b_{DOD}^{ZDROJE} - c_E^{DOD} b_{E,DOD}^{ZDROJE} + c_E^{SPOTŘ} b_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE}, \quad (40)$$

kde b_{disp}^{ZDROJE} [Kč/GJ] je dispečerský poměrný přírůstek nákladů zdroje pro výrobu jednotky tepla,

c_{PAL} [Kč/GJ] - průměrná cena paliva potřebného pro výrobu jednotky tepla,

c_E^{DOD} [Kč/GJ] - cena vyrobené jednotky elektrické energie dodané do elektrizační sítě (prodej elektřiny u tepláren),

$c_E^{SPOTŘ}$ [Kč/GJ] - cena spotřebované jednotky elektrické energie odebírané z elektrizační sítě (nákup elektřiny u výtopen),

$b_{DOD}^{ZDROJE} = \frac{dP_{T,PAL}^{ZDROJE}}{dP_{T,DOD}^{ZDROJE}}$ [-] - poměrný přírůstek spotřeby tepelného výkonu v palivu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W],

$b_{E,DOD}^{ZDROJE} = \frac{dP_{E,DOD}^{ZDROJE}}{dP_{T,DOD}^{ZDROJE}}$ [-] - poměrný přírůstek vyráběného elektrického výkonu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W] (u teplárny),

$$b_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE} = \frac{dP_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE}}{dP_{T,DOD}^{ZDROJE}} [-] - \text{poměrný přírůstek spotřeby elektrického}$$

výkonu [W] na jednotku dodávaného tepelného výkonu [W] (u výtopy).

Uvažované kritérium režimového optima je univerzální pro všechny typy tepelných zdrojů. Zohledňuje skutečnost, že se v tepelném zdroji nespotřebovává při výrobě tepelné energie jen palivo, ale i elektrická energie, a že se nevyrábí jen energie tepelná, ale i elektrická. Dodávky elektrické energie z tepláren v teplárenské síti tyto zdroje zvýhodňují oproti jiným, které elektrickou energii nedodávají.

Pro případ teplárny budou brány v úvahy všechny členy rovnice (40), tedy jak cena paliva, tak i druhý člen, tedy zisk z výroby elektrické energie, a tak také náklady spojené s nákupem elektrické energie pro vlastní spotřebu zdroje. Pro případ výtopy nebude přítomný druhý člen, protože výtopy nevyrábí elektrickou energii. Je zřejmé, že například spalovna, která má nízké náklady na palivo, bude mít dispečerský poměrný přírůstek nákladů zdroje b_{disp}^{ZDROJE} velmi nízký.

Na základě dispečerských poměrných přírůstků nákladů jednotlivých zdrojů, tedy kritéria režimového optima, se stanovují optimální sestavy zdrojů na pokrytí odběratelské spotřeby tepla. Optimální provozní sestavu tepelných zdrojů lze získat minimalizací následující účelové funkce:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(b_{disp}^{ZDROJE(i)} P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)} \right) \Rightarrow \min, \quad (41)$$

kde $P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)}$ [MW] je množství dodávané tepelné energie z i-tého tepelného zdroje.

Výsledkem minimalizace této účelové funkce jsou dodávky tepelných výkonů $P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)}$ jednotlivých zdrojů.

Nalezení optimální provozní sestavy tepelných zdrojů, které pokryjí odběratelskou spotřebu tepla, splňuje sice hospodárnost provozu tepelné soustavy, ale z hlediska řízení by bylo žádoucí, aby bylo současně dosaženo také minimálních dopravních zpoždění, které negativně ovlivňují řízení dodávky tepla. Tento oprávněný požadavek je možné v účelové funkci (41) zohlednit a upravit její tvar tak, aby byla splněna jak maximální hospodárnost, tak i podmínka minimálního dopravní zpoždění. K tomuto účelu je možno využít právě analýzy hydraulických poměrů v síti, resp. z této analýzy vyplývající informace o dopravních zpožděních u jednotlivých odběratelů.

Účelová funkce řešící optimální návržení provozní sestavy tepelných zdrojů pro krytí odběratelské spotřeby tepla s využitím analýzy dopravního zpoždění bude zohledňovat také průměrné dopravní zpoždění v síti a její tvar bude dán rovnicí (42). Cílem je opět minimalizace této upravené účelové funkce a tím nalezení optimální provozní sestavy tepelných zdrojů pro krytí požadované dodávky tepelné energie v tepelné síti.

$$E = \left(\sum_{i=1}^n \left(b_{disp}^{ZDROJE(i)} P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)} \right) \right) E_{Td} \Rightarrow \min \quad (42)$$

$$E_{Td} = f \left(P_{T,DOD}^{ZDROJE(i)} \right)$$

Poznámka: Na tomto místě je vhodné upozornit na skutečnost, že je důležité odlišovat označení účelové funkce E a označení průměrného dopravního zpoždění E_{Td} . Jakkoliv je označení obou veličin pomocí písmena E podobné, nejedná se o stejné veličiny.

U všech zdrojů tepla, které dodávají tepelnou energii do horkovodní sítě, vystupují náklady spojené s čerpací prací. Stejně jako jiné náklady spojené s odběrem elektrické energie budou tyto náklady

zahrnutý do $b_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE}$. K výpočtu čerpací práce, tedy výkonu čerpacího agregátu, můžeme použít vzorce

$$P_{\check{c}} = \frac{3,6 \cdot \Delta p_z}{\rho \eta_{\check{c}}} 10^{-3} M_v, \quad (43)$$

kde $P_{\check{c}}$ [kW] je čerpací práce,
 ρ [kg.m⁻³] - měrná hmotnost proudící tekutiny,
 Δp_z [Pa.m⁻¹] - tlaková ztráta připadající na 1 m potrubí,
 $\eta_{\check{c}}$ [-] - účinnost čerpacího agregátu,
 M_v [kg.s⁻¹] - hmotnostní tok tekutiny.

V této souvislosti stojí za úvahu využít analýzy hydraulických poměrů také při určování celkových tlakových ztrát. Pomocí této analýzy lze vysledovat, jaké budou pro určité výkony zdroje tlakové ztráty v jednotlivých větvích sítě, resp. jaká bude suma těchto tlakových ztrát. Pokud tento výsledek vztáhneme na součet délek všech potrubí v síti, dostáváme hledané Δp_z , potřebné pro určení čerpací práce. Jak již bylo zmíněno, tato čerpací práce se u horkovodních soustav promítá do $b_{E,SPOTŘ}^{ZDROJE}$, což ovlivňuje b_{disp}^{ZDROJE} každého zdroje.

V rámci optimalizace provozu teplárenských soustav nachází tedy vzniklý výpočtový program své uplatnění jednak při stanovování tzv. *optimálních provozních sestav tepelných zdrojů*, ale také při určování tzv. *kriteria režimového optima*, jenž hodnotí efektivnost výroby a dopravy tepelné energie z příslušného zdroje.

7.3 Další možnosti využití

Z výsledků dosažených pomocí programově zpracované analýzy hydraulických a teplotních poměrů lze vysledovat jaké parametry bude mít proudící medium v různých místech potrubní sítě, jaký je smysl

proudění v jednotlivých větvích a také jaké budou teplotní a tlakové ztráty v potrubích pro zadané odběry. Vedle těchto základních údajů je možno také porovnávat hodnoty jednotlivých veličin v různých místech potrubní sítě a určit tak oblasti, v nichž nabývají svých mezních hodnot. Všechny tyto charakteristiky a simulace lze s výhodou využít také v dalších oblastech teplárenského provozu, jenž jsou popsány v následujících odstavcích. Nutno také prohlásit, že své uplatnění mohou tyto výpočty nalézt i mimo teplárenský obor, např. ve vodárenství či jiných příbuzných oborech, kde dochází k rozvodu media.

Projektování sítí a připojování / odpojování spotřebitelů

Pomocí vzniklého produktu je možno řešit simulaci hydraulických a teplotních poměrů při eventuálním odpojování nebo připojování nového spotřebitele. Cílem může být simulace, která by vyšetřovala, zda je potenciálnímu odběrateli možné garantovat požadované parametry media a zda nebude nutné zvýšit tlak na prahu zdroje. Lze také sledovat, jak tento případný nový odběr bude ovlivňovat okolní odběratele a hydraulické poměry v celé tepelné síti.

Sledování chování rozvodné tepelné sítě v různých obdobích roku

Z hlediska dodávky tepla během roku lze rozlišovat topné období, přechodné období a netopné období. V každém tomto období je charakter spotřeby tepla různý. Z tohoto pohledu je možné sledovat jaké budou v jednotlivých obdobích hydraulické a teplotní poměry v síti. Pokud jsou k dispozici všechny topné charakteristiky odběratelů, lze hydraulické a teplotní poměry v síti určit pro různé venkovní teploty. Tímto způsobem lze získat informaci o tom, jak venkovní teplota ovlivňuje průměrné dopravní zpoždění a polohu referenčního bodu. Uvedené závěry se pak mohou promítnout do přípravy výroby a taktéž do řízení dodávky tepla.

Simulace teplotních odezev při najíždění, odstavování a výpadcích ve zdrojích

Tyto simulační studie mohou být obzvlášť zajímavé, pokud se bude jednat o složité zokruhované sítě, do kterých dodává tepelnou energii více spolupracujících zdrojů. Lze například sledovat, jak ovlivní výpadek či odstávka tepelného zdroje nebo jeho částí teplotní poměry v síti, resp. v jakých časových relacích se tyto změny na jednom ze zdrojů projeví ve vybraných důležitých uzlech sítě (nemocnice, průmyslový výroba závislá na dodávce tepla apod.). To může být užitečné pro vyhodnocování různých krizových řešení, např. je možno vyhodnotit v jakém časovém předstihu musejí postižení odběratelé aktivovat své záložní zdroje tepla, aby byl zachován jejich bezpečný provoz.

Analýza provozních stavů z historických dat

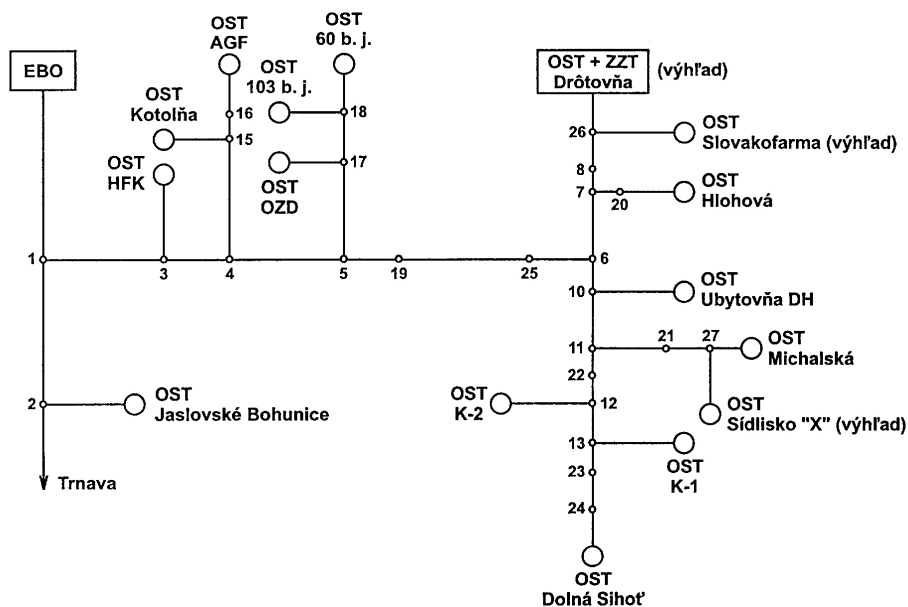
Na základě historie měřených dat z teplotní soustavy lze provádět analýzy provozních situací, ke kterým v soustavě došlo. Současně lze simulovat, jak by se situace v síti dále vyvíjela, pokud by byl či naopak nebyl v daný okamžik proveden patřičný zásah.

8 REALIZOVANÉ VÝPOČTY PRO REÁLNÉ TEPLÁRENSKÉ SOUSTAVY

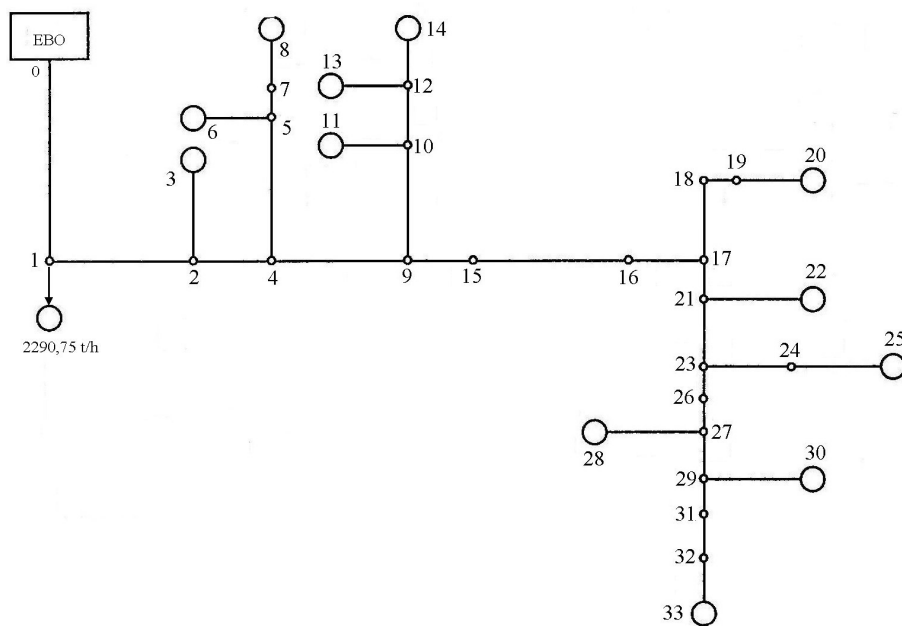
V rámci řešení disertační práce a v rámci spolupráce s energetickými podniky byly provedeny výpočty statických poměrů ve dvou konkrétních lokalitách. Jednalo se jednak o radiální rozvodnou horkovodní síť **SCZT EBO - Leopoldov, Hlohovec na Slovensku**, jejíž popisové schéma představuje Obr. 43, resp. Obr. 44. Tato činnost byla prováděna ve spolupráci se Slovenskou technickou univerzitou v Bratislavě, Fakultou elektrotechniky a informatiky. Další výpočty byly prováděny pro zokruhovanou horkovodní síť **SCZT Litoměřice**, jejíž schéma zobrazuje Obr. 54 resp. Obr. 55. Tato práce byla motivována zájmem společnosti United Energy, a.s. Most-Komořany, která uvedenou soustavu provozuje. Na základě poskytnutých podkladů pro výpočet, tj. parametrů rozvodného potrubí, definovaných odběrů jednotlivých spotřebitelů a definovaného výkonu zdroje, byl pomocí vytvořeného programu proveden výpočet hydraulických a teplotních poměrů v daných horkovodních sítích.

8.1 SCZT EBO - Leopoldov, Hlohovec

Výpočet statických poměrů byl realizován pro radiální přívodní potrubí horkovodní sítě elektrárna Bohunice EBO – Leopoldov, Hlohovec podle Obr. 43. Do tepelné sítě však nebyly zahrnuty OST Slovakofarma, OST Sídliisko „X“ a OST+ZZT Drotovňa (výhled). Dále nebyla uvažována odbočka z uzlu 1 směrem na OST Jaslovské Bohunice a Trenčín a byla nahrazena soustředěným odběrem v uzlu 1 o hodnotě 633,32 kg/s, tj. 2290,75 t/h [27]. Číslování uzlů bylo pozměněno z důvodu návaznosti číselného značení tak, že zdroj EBO je uzel č.0 a další uzly nabývají postupně čísel od 1-33, jak je naznačeno na následujícím Obr. 44.



Obr. 43 Původní schéma SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec



Obr. 44 Upravené schéma SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec

Výpočet hydraulických a teplotních poměrů (statická simulace) proběhl pro definované podmínky a při následovně zvolených hodnotách fyzikálních veličin a konstant:

Absolutní tlak na prahu zdroje	$p = 1800 \text{ kPa}$
Výkon zdroje	$M = 2579,5 \text{ t/h}$
Teplota ve zdroji	$T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota okolí	$T_{\text{ok}} = -12 \text{ }^\circ\text{C}$
Měrná tepelná kapacita proudícího media	$c_p = 4186,8 \text{ J/kg.K}$
Hustota proudícího media	$\rho = 939 \text{ kg/m}^3$
Absolutní drsnost potrubí	$k = 0,00025 \text{ m}$
Součinitel tepelné vodivosti izolačního materiálu	$\lambda_{\text{iz}} = 0,043 \text{ W/m.K}$
Koeficient přestupu tepla na vnější straně potrubí	$\alpha_v = 32 \text{ W/m}^2\text{K}$

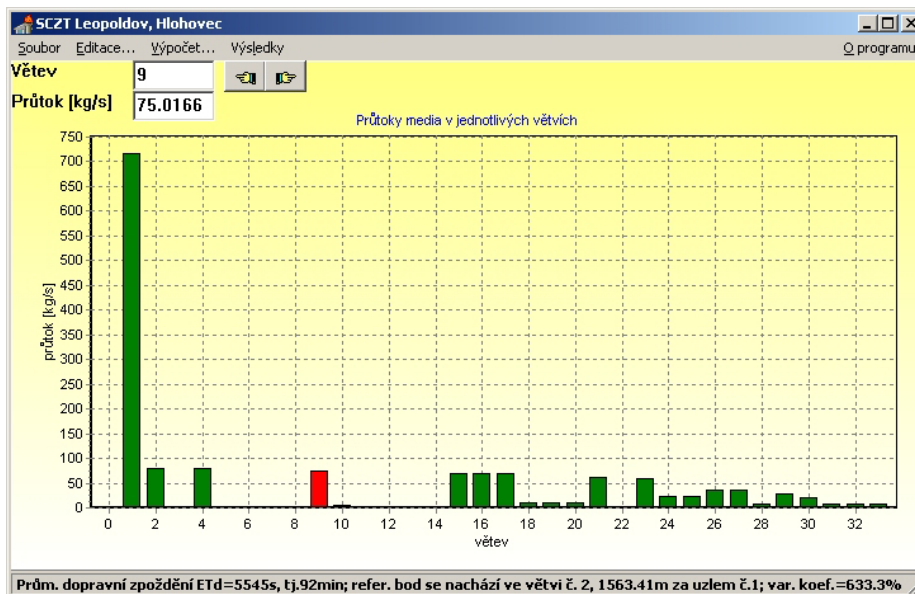
Konkrétní parametry jednotlivých potrubí (délka, průměr, místní odpory,...) a konkrétní odběry jednotlivých spotřebitelů tepla byly dále odečteny z dodaných podkladů [27]. Pro první přiblížení výsledků byly předpokládány nulové výškové rozdíly v síti. Za takto definovaných podmínek proběhl výpočet s následujícími výsledky.

8.1.1 Výsledky výpočtu statických poměrů ve větvích

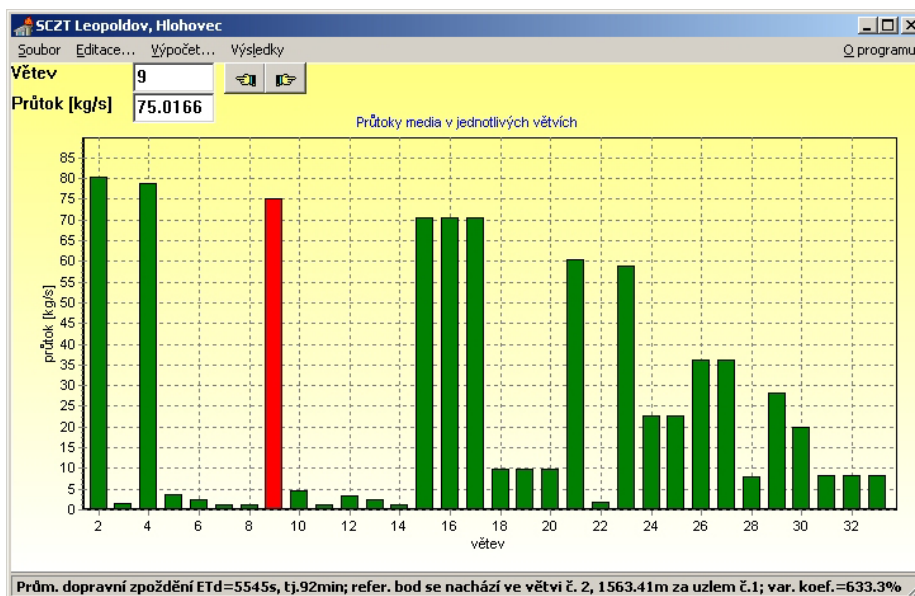
čís.vět.	poč.uzel	konc.uzel	průměr	délka	hydr.odpor	průtok	tl.ztráta	rychlost	tep.ztráta
			[m]	[m]	[kPas ² /kg ²]	[kg/s]	[kPa]	[m/s]	[kW]
1	0	1	0.7	742	0.0001	716.5472	45.0612	1.9839	64.044
2	1	2	0.6	8483	0.0017	80.2278	10.8375	0.3023	653.584
3	2	3	0.065	81	1.9074	1.4	3.7384	0.4495	4.149
4	2	4	0.6	277	0.0001	78.8278	0.3639	0.2971	21.19
5	4	5	0.08	40	0.3163	3.8111	4.5946	0.8079	1.744
6	5	6	0.05	15	1.6701	2.5306	10.6951	1.3732	0.632
7	5	7	0.08	7	0.1119	1.2806	0.1835	0.2714	0.305
8	7	8	0.05	77.3	6.8863	1.2806	11.2924	0.6949	3.248
9	4	9	0.6	181.4	0.0004	75.0167	2.0357	0.2827	138.518
10	9	10	0.125	780.4	0.5204	4.5861	10.9446	0.3982	28.557
11	10	11	0.05	98.3	8.6032	1.1083	10.5682	0.6015	3.151
12	10	12	0.125	26.5	0.0175	3.4778	0.212	0.302	0.964
13	12	13	0.065	99	2.2248	2.3778	12.5789	0.7635	3.737
14	12	14	0.05	192.8	16.6396	1.1	20.134	0.5969	6.161
15	9	15	0.6	517	0.0001	70.4306	0.5451	0.2654	39.397
16	15	16	0.6	1805	0.0003	70.4306	1.5916	0.2654	106.549
17	16	17	0.6	469	0.0001	70.4306	0.5391	0.2654	35.614
18	17	18	0.5	461	0.0002	9.8639	0.0207	0.0535	25.614
19	18	19	0.125	13.5	0.0153	9.8639	1.4878	0.8564	0.492
20	19	20	0.1	96	0.2161	9.8639	21.0289	1.3382	3.607
21	17	21	0.3	140	0.0009	60.5667	3.4231	0.913	7.909
22	21	22	0.05	44	4.1397	1.7361	12.4773	0.9421	1.422
23	21	23	0.3	298	0.002	58.8306	6.9853	0.8868	16.829
24	23	24	0.25	159.5	0.0034	22.6667	1.7266	0.492	8.048
25	24	25	0.125	116.5	0.0834	22.6667	42.8549	1.9681	4.261
26	23	26	0.3	19	0.0001	36.1639	0.1656	0.5451	1.073
27	26	27	0.2	108	0.006	36.1639	7.8924	1.2265	4.737
28	27	28	0.08	12	0.1467	7.8361	9.0099	1.6611	0.405
29	27	29	0.2	214	0.012	28.3278	9.5957	0.9608	9.382
30	29	30	0.1	4.5	0.0329	20.0306	13.2191	2.7175	0.17
31	29	31	0.2	1	0.0001	8.2972	0.0038	0.2814	0.044
32	31	32	0.15	232	0.0588	8.2972	4.0467	0.5003	9.431
33	32	33	0.125	834	0.5696	8.2972	39.2137	0.7204	30.333

Prům. dopravní zpoždění ETd=5545s, tj.92min; refer. bod se nachází ve větvi č. 2, 1563.41m za uzlem č.1; var. koef.=633.3%

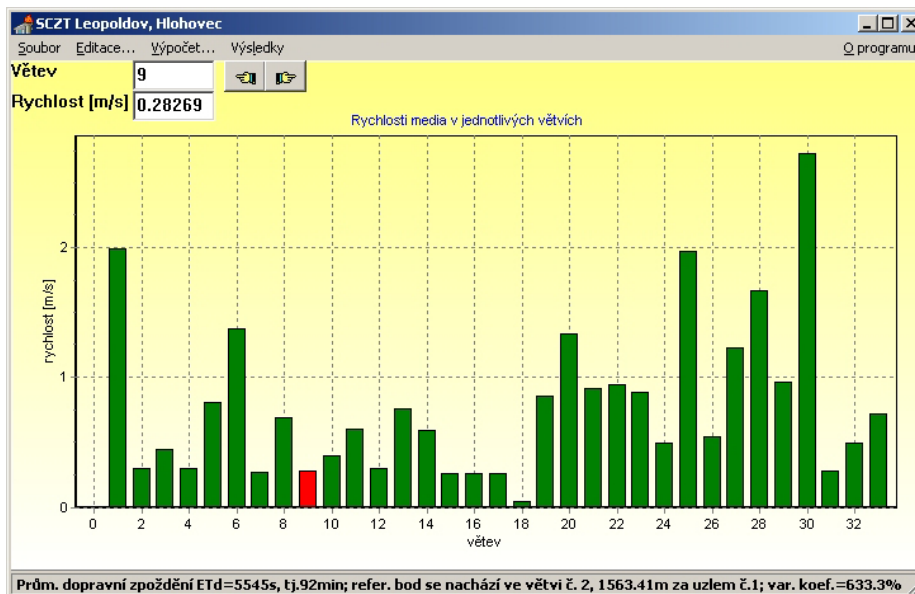
Obr. 45 Statické poměry v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec



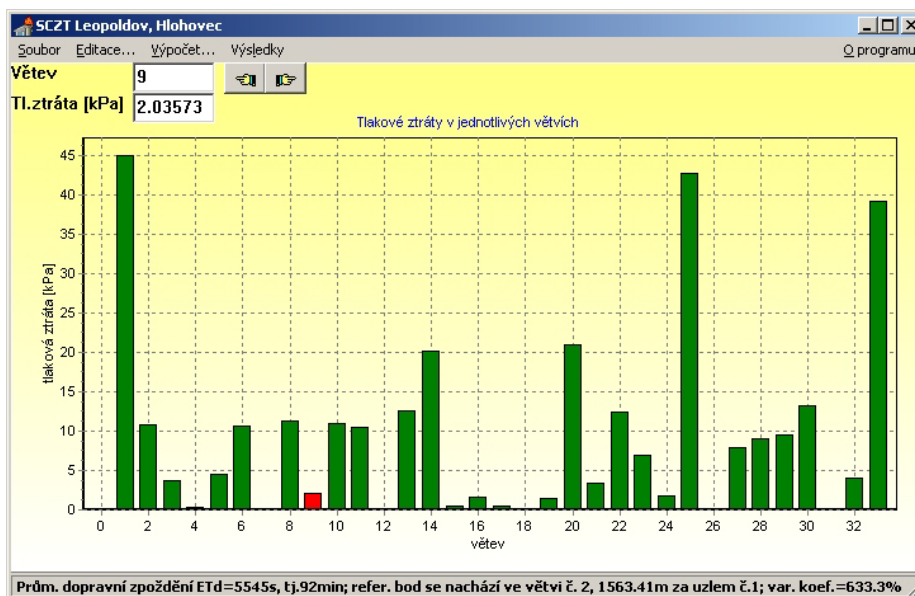
Obr. 46 Vypočítané průtoky v jednotlivých větvích (1-33) SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec



Obr. 47 Detail průtokových poměrů ve vybraných větvích 2-33



Obr. 48 Vypočítané rychlosti media v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec



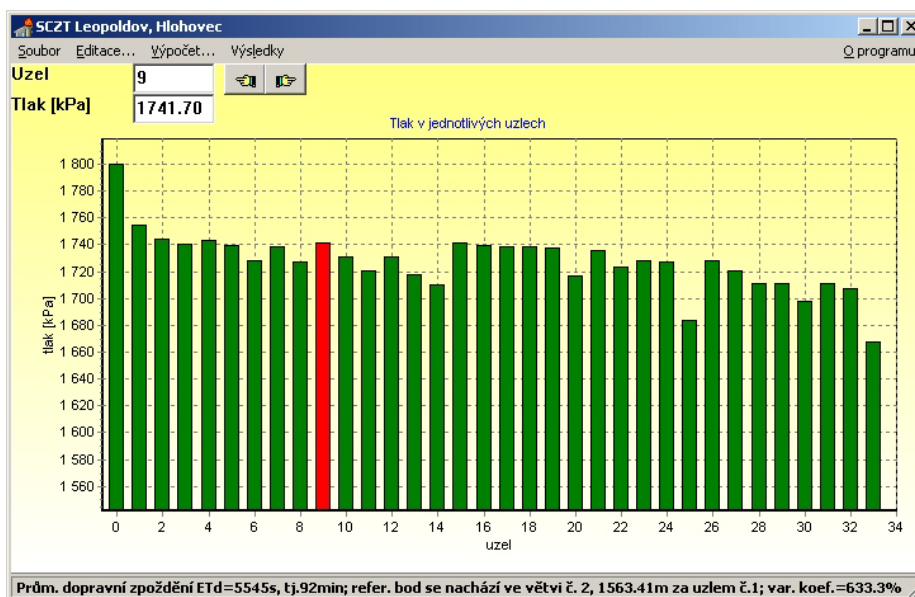
Obr. 49 Vypočítané tlakové ztráty v jednotlivých větvích SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec

8.1.2 Výsledky výpočtu statických poměrů v uzlech

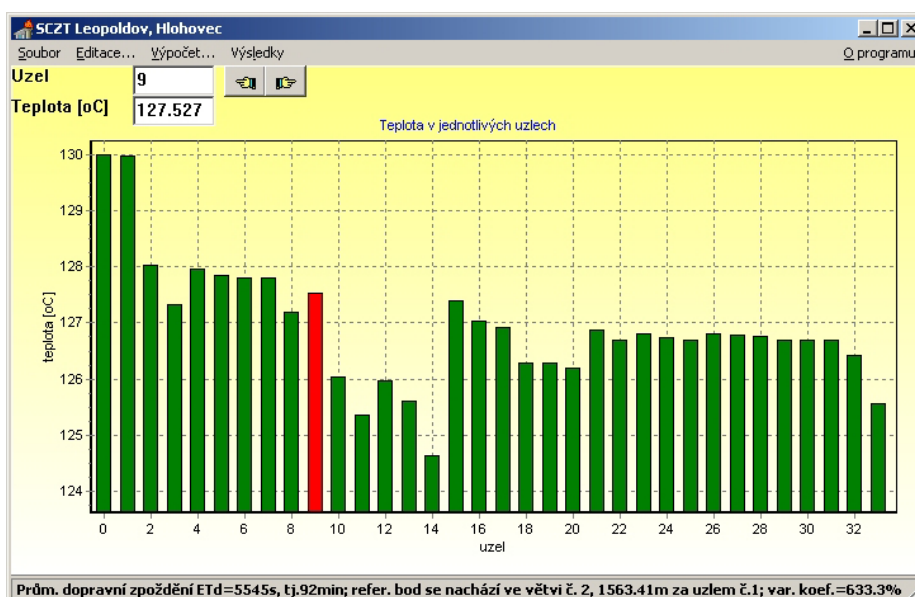
uzel	tlak [kPa]	teplota [oC]	dopr. zpož. [s]
0	1800	130	0
1	1754.939	129.979	374.0119
2	1744.102	128.033	28432.0603
3	1740.364	127.325	28612.2433
4	1743.738	127.969	29364.5268
5	1739.144	127.859	29414.0397
6	1728.449	127.8	29424.9628
7	1738.96	127.802	29439.8272
8	1727.668	127.197	29551.0648
9	1741.703	127.528	35781.2348
10	1730.758	126.04	37741.0854
11	1720.19	125.361	37904.5235
12	1730.546	125.974	37828.8449
13	1717.967	125.599	37958.5094
14	1710.413	124.636	38151.8316
15	1741.158	127.394	37729.1147
16	1739.566	127.033	44529.74
17	1739.027	126.912	46296.7723
18	1739.006	126.292	54909.149
19	1737.518	126.28	54924.9119
20	1716.49	126.192	54996.6505
21	1735.604	126.881	46450.1164
22	1723.127	126.685	46496.8195
23	1728.619	126.812	46786.1526
24	1726.892	126.728	47110.3304
25	1684.038	126.683	47169.5259
26	1728.453	126.805	46821.0065
27	1720.561	126.774	46909.0584
28	1711.551	126.762	46916.2827
29	1710.965	126.695	47131.795
30	1697.746	126.693	47133.451
31	1710.961	126.694	47135.3485
32	1706.915	126.422	47599.0815
33	1667.702	125.549	48756.7484

Prům. dopravní zpoždění ETd=5545s, tj.92min; refer. bod

Obr. 50 Statické poměry v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec

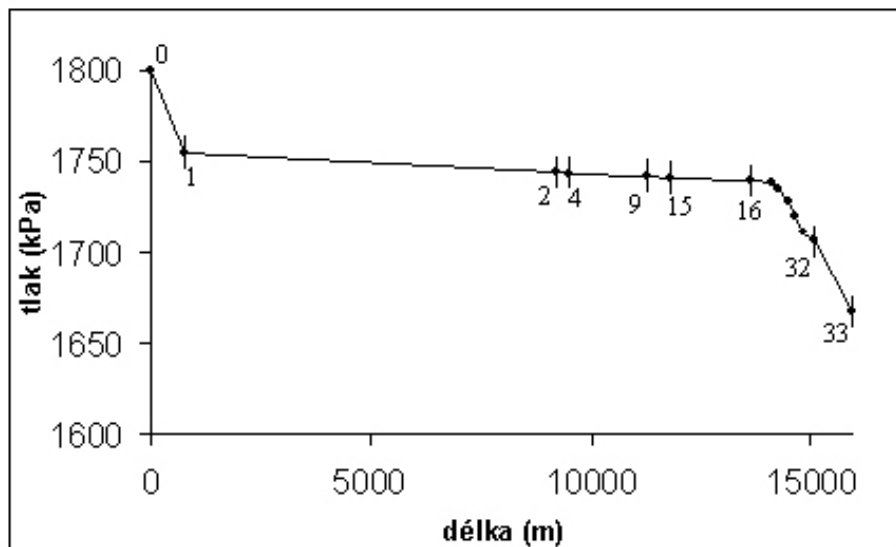


Obr. 51 Vypočítané hodnoty tlaku v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec



Obr. 52 Vypočítané hodnoty teplot v jednotlivých uzlech SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec

S využitím dosažených výsledků byl následně sestaven tlakový diagram přívodního potrubí EBO – Leopoldov, Hlohovec. Konkrétně byly do tlakového diagramu začleněny uzly 0, 1, 2, 4, 9, 15, 16, 17, 21, 23, 26, 27, 29, 31, 32, 33.



Obr. 53 Tlakový diagram přívodního potrubí EBO – Leopoldov, Hlohovec

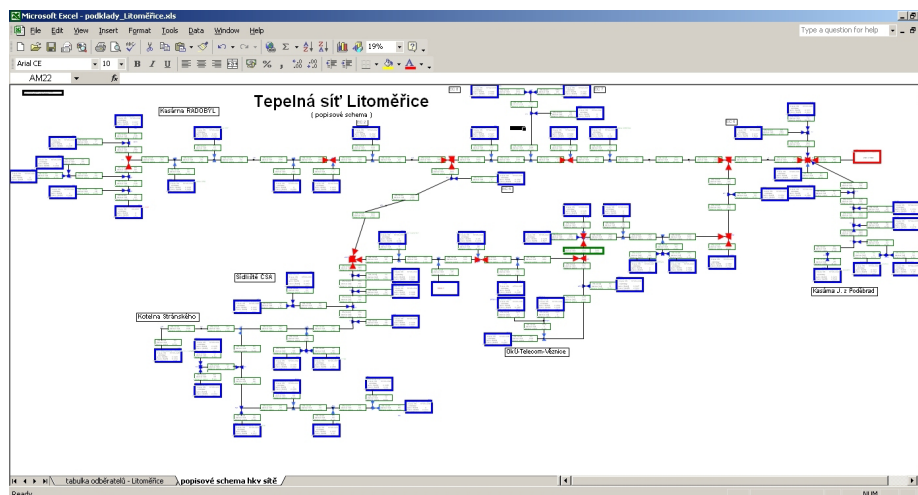
Při porovnání dosažených výsledků s hodnotami v [27] - tab. 4.1 str. 28 můžeme konstatovat, že výsledky vykazují shodu. Možné rozdíly mohou být způsobeny odlišným určením některých hodnot fyzikálních veličin (hustoty) či užitím odlišných vztahů pro výpočet hledaných parametrů. Obecně se však výsledky pohybují ve správných, předpokládaných relacích.

Na základě vypracování hydraulických a teplotních poměrů v SCZT EBO – Leopoldov, Hlohovec vznikla na IIT ve Zlíně také výzkumná zpráva, která podrobně popisuje dosažené výsledky. Číslo této výzkumné zprávy je **UTB-FT-IIT/2002/1: Výpočet hydraulických a teplotních poměrů pro soustavu centralizovaného zásobování teplem EBO - Leopoldov, Hlohovec.**

8.2 SCZT Litoměřice

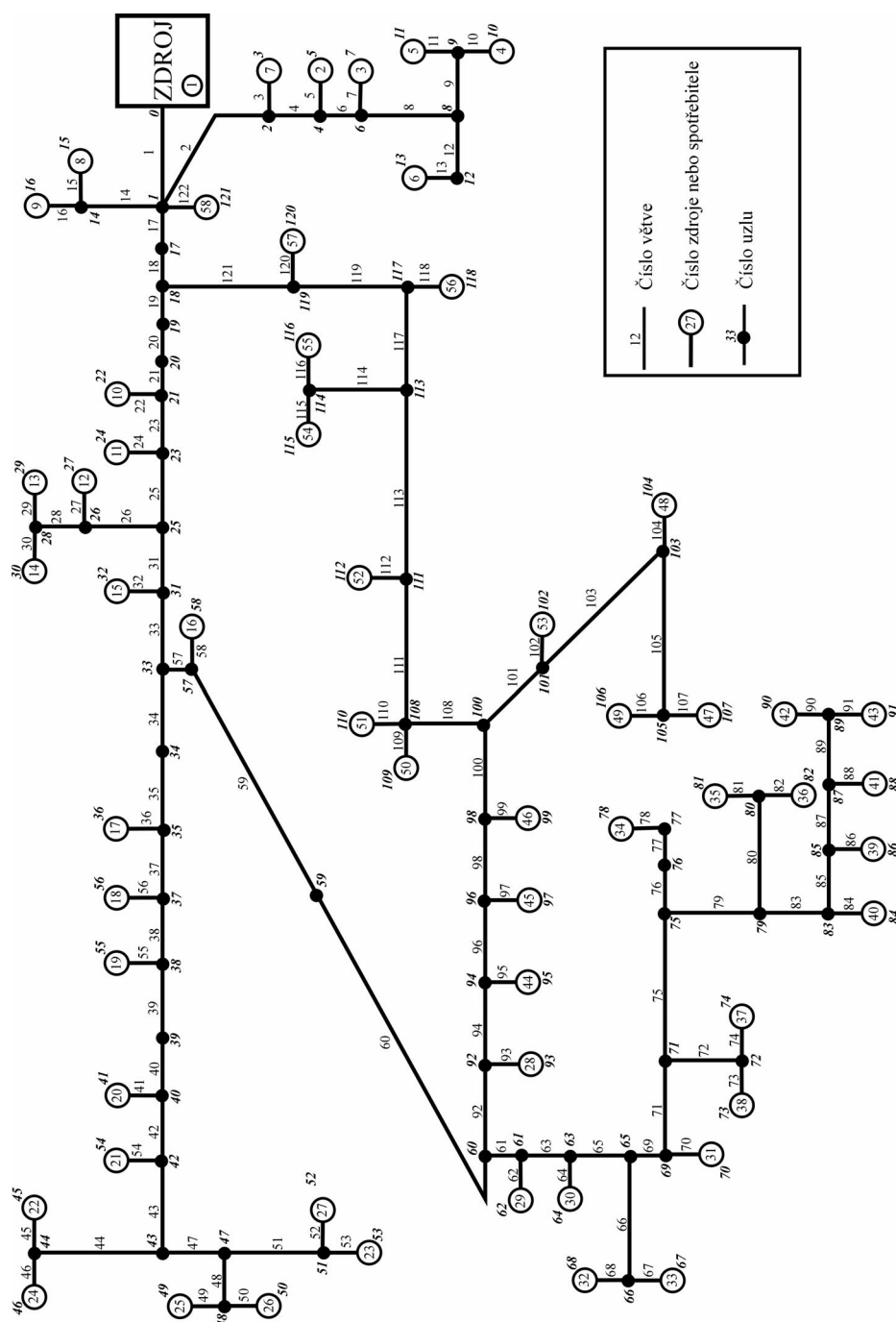
Analýza hydraulických a teplotních poměrů byla taktéž provedena pro reálnou horkovodní SCZT Litoměřice. Zástupci společnosti United Energy, a.s. Most - Komořany poskytly potřebné vstupní podklady s popisem předmětné sítě v elektronické formě. Další doplnění a upřesnění vstupních údajů pro výpočet bylo prováděno operativně prostřednictvím emailů. Během roku 2001 – 2005 proběhlo několik pracovních setkání jak na půdě UTB tak i v sídle společnosti United Energy v Mostě – Komořanech, kde byly mj. postupně specifikovány podklady pro výpočet statických poměrů a konzultovány mnohé problémy z teplárenské praxe.

Výpočet proběhl na přírodním potrubí horkovodní sítě Litoměřice, jejíž dodané schéma z MS Excel je znázorněno na Obr. 54. Jedná se o zokruhovanou horkovodní síť s jedním zdrojem, 122 větvemi a 57 odběrateli.



Obr. 54 Výchozí přehledové schéma SCZT Litoměřice

Z důvodu zadávání vstupních údajů do programu bylo nutné očíslovat jednotlivé větve a uzly horkovodní soustavy. Toto číselné označení je znázorněno na následujícím Obr. 55:



Obr. 55 Popisové schéma tepelné sítě Litoměřice s očíslováním větví a uzlů

Výpočet hydraulických a teplotních poměrů (statická simulace) proběhl pro definované podmínky a při následovně zvolených hodnotách fyzikálních veličin a konstant:

Absolutní tlak na prahu zdroje	$p = 1,6 \text{ MPa}$
Výkon zdroje	$M = 610 \text{ t/h}$
<i>(Výkon zdroje byl stanoven jako suma odběrů jednotlivých spotřebitelů)</i>	
Teplota ve zdroji	$T = 130 \text{ °C}$
Teplota okolí	$T_{ok} = -12 \text{ °C}$
Měrná tepelná kapacita proudícího media	$c_p = 4186,8 \text{ J/kg.K}$
Hustota proudícího media	$\rho = 939 \text{ kg/m}^3$
Absolutní drsnost potrubí	$k = 0,00025 \text{ m}$
Součinitel tepelné vodivosti izolačního materiálu	$\lambda_{iz} = 0,05 \text{ W/m.K}$ pro ABB $\lambda_{iz} = 0,09 \text{ W/m.K}$ pro minerální plst'
Koeficient přestupu tepla na vnější straně potrubí	$\alpha_v = 32 \text{ W/m}^2\text{K}$

Konkrétní parametry jednotlivých potrubí (délka, průměr, místní odpory,...) a konkrétní odběry jednotlivých spotřebitelů tepla byly dále odečteny z dodaných podkladů, přičemž odebírané výkony spotřebitelů M byly uvažovány pro zimní období a byly vypočítávány následovně:

$$M [\text{kg/s}] = P[\text{W}] / (4186,8 * (130 - 70)), \quad \text{kde } P \text{ je známá hodnota odebíraného výkonu [W]}$$

$$M [\text{t/h}] = 3,6 * M [\text{kg/s}].$$

V první fázi řešení tlakových poměrů v SCZT Litoměřice byl zaveden zjednodušující předpoklad, že všechny body horkovodní sítě leží ve stejné nadmořské výšce. Dosažené výsledky poskytly obraz o tom, jaké bude asi rozložení tlaků v síti, ale pro praktické potřeby tyto výsledky využívat není možné, a to vzhledem k nepřesnostem vzniklým právě zanedbáním vlivu nadmořské výšky. Proto byla pozornost soustředěna na zahrnutí výškových poměrů do výpočtu.

Problémem však byl nedostatek údajů o nadmořských výškách jednotlivých uzlů horkovodní sítě, přesněji řečeno byly známy pouze nadmořské výšky zdroje a jednotlivých odběratelů, údaje o ostatních uzlech sítě chyběly. Tento problém byl řešen aproximací neznámých nadmořských výšek z údajů o sousedních uzlech. Jelikož se berou výškové rozdíly v síti jako relativní a jsou vztaženy k nadmořské výšce zdroje, udává Tab. 1 na straně 120 konkrétní, ve výpočtu použité výškové poměry pomocí Δh (výškový rozdíl příslušného uzlu vzhledem ke zdroji).

8.2.1 Výsledky výpočtu statických poměrů ve větvích

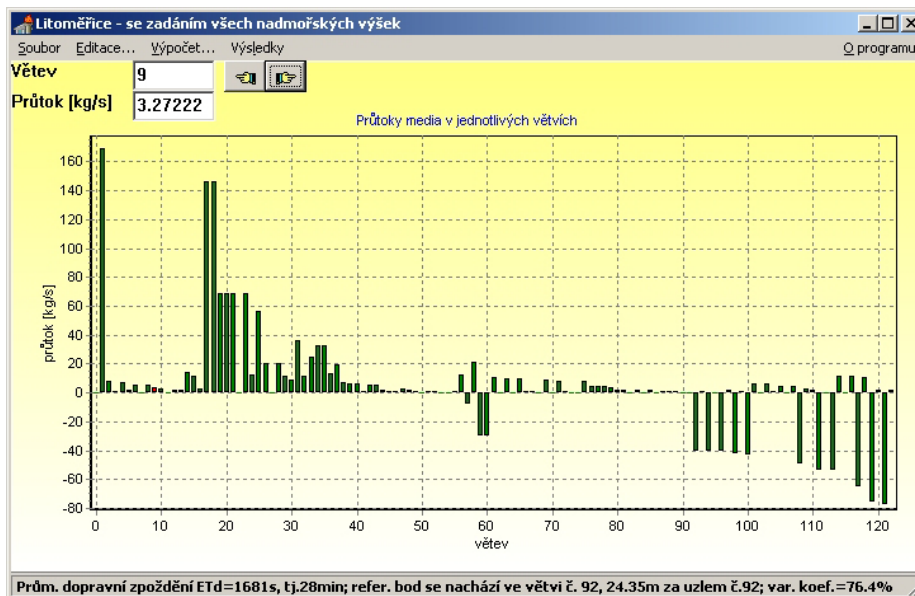
čís.vět.	poč.uzel	konc.uzel	průměr [m]	délka [m]	hydr.odpor [kPas ² /kg ²]	průtok [kg/s]	tl.ztráta [kPa]	rychlost [m/s]	tep.ztráta [W/m]
1	0	1	0.25	15	0.0003	169.45	8.7325	3.6782	142.93
2	1	2	0.125	58	0.0468	8.0222	3.0146	0.6965	99.142
3	2	3	0.05	2	0.9545	0.6722	0.4313	0.3648	87.302
4	2	4	0.125	55	0.0374	7.35	2.0224	0.6382	99.021
5	4	5	0.05	95	8.7549	1.7528	26.8972	0.9512	86.866
6	4	6	0.125	113	0.0747	5.5972	2.3413	0.486	98.792
7	6	7	0.05	35	3.7313	0.3111	0.3612	0.1688	86.204
8	6	8	0.1	161	0.352	5.2861	9.8361	0.7171	103.096
9	8	9	0.05	42	4.3174	3.2722	46.2283	1.7757	86.376
10	9	10	0.05	3	1.0382	3.0722	9.7995	1.6672	86.288
11	9	11	0.025	30	112.678	0.2	4.5071	0.4341	59.278
12	8	12	0.08	319	2.2266	2.0139	9.0306	0.4269	89.041
13	12	13	0.065	25	0.8261	2.0139	3.3505	0.6467	102.461
14	1	14	0.125	260	0.1864	13.9417	36.2397	1.2105	99.048
15	14	15	0.125	70	0.082	11.1583	10.2094	0.9688	98.842
16	14	16	0.065	160	3.7246	2.7833	28.8546	0.8937	105.402
17	1	17	0.25	77	0.0017	146	36.9203	3.1691	85.862
18	17	18	0.5	268	0.0002	146	4.0441	0.7923	152.92
19	18	19	0.25	294	0.007	68.9369	33.0317	1.4964	87.411
20	19	20	0.25	410	0.0096	68.9369	45.7346	1.4964	87.342
21	20	21	0.25	119	0.0037	68.9369	17.6747	1.4964	87.29
22	21	22	0.032	12	15.3698	0.3583	1.9735	0.4747	40.528
23	21	23	0.25	612	0.0119	68.5785	55.8011	1.4886	87.218
24	23	24	0.15	16	0.0179	12.5472	2.8121	0.7565	71.43
25	23	25	0.2	3	0.0003	56.0313	1.0343	1.9004	77.13
26	25	26	0.2	245	0.0212	19.9556	8.4373	0.6768	77.064
27	26	27	0.05	25	2.9631	0	0	0	0
28	26	28	0.2	83	0.0078	19.9556	3.1142	0.6768	84.663
29	28	29	0.15	91	0.0406	11.4194	5.2963	0.6885	71.234
30	28	30	0.2	279	0.0258	8.5361	1.8788	0.2895	84.427
31	25	31	0.2	235	0.0165	36.0757	21.5122	1.2236	77.095
32	31	32	0.15	73	0.0354	11.5083	4.6848	0.6939	71.342
33	31	33	0.2	110	0.0075	24.5674	4.5237	0.8332	217.864
34	33	34	0.2	15	0.0015	32.6972	1.5881	1.109	76.924
35	34	35	0.2	90	0.0055	32.6972	5.8955	1.109	76.907
36	35	36	0.15	108	0.0326	13.1333	5.6313	0.7919	71.178
37	35	37	0.2	324	0.0205	19.5639	7.8584	0.6635	76.804
38	37	38	0.15	480	0.1308	7.4472	7.2555	0.449	46.433
39	38	39	0.125	115	0.0771	6.4472	3.2055	0.5598	41.687
40	39	40	0.125	24	0.0162	6.4472	0.6745	0.5598	41.653
41	40	41	0.05	10	1.6381	0.7694	0.9699	0.4175	36.675
42	40	42	0.125	24	0.0162	5.6778	0.5231	0.493	41.64
43	42	43	0.125	43	0.0288	5.175	0.7711	0.4493	41.621
44	43	44	0.08	258	1.802	2.2389	9.033	0.4746	38.185
45	44	45	0.065	236	5.2521	1.3389	9.4151	0.4299	42.325
46	44	46	0.05	7	1.387	0.9	1.1234	0.4884	36.355
47	43	47	0.065	82	1.7155	2.9361	14.7888	0.9428	42.911
48	47	48	0.05	14	1.973	1.6278	5.2279	0.8833	36.566
49	48	49	0.04	21	7.7361	1.1889	10.9347	1.0081	31.876
50	48	50	0.04	34	11.2265	0.4389	2.1625	0.3721	31.821
51	47	51	0.065	136	2.842	1.3083	4.8648	0.4201	42.692
52	51	52	0.05	36	3.815	1.3083	6.5303	0.71	36.249
53	51	53	0.025	43	143.9927	0	0	0	0
54	42	54	0.04	30	10.1318	0.5028	2.5612	0.4263	31.945
55	38	55	0.05	10	1.6381	1	1.6381	0.5427	36.738
56	37	56	0.2	2	0.0003	12.1167	0.0402	0.411	76.716
57	33	57	0.2	443	0.0293	-8.1298	1.9391	-0.2757	15.284
58	57	58	0.2	2	0.0003	21.6389	0.1281	0.7339	50.376
59	57	59	0.2	215	0.0126	-29.7687	11.172	-1.0096	50.393
60	59	60	0.2	110	0.0069	-29.7687	6.1161	-1.0096	50.417
61	60	61	0.15	161	0.0423	10.3639	4.5463	0.6249	46.77

Obr. 56 Statické poměry v jednotlivých větvích horkovodní soustavy
 Litoměřice (část 1)

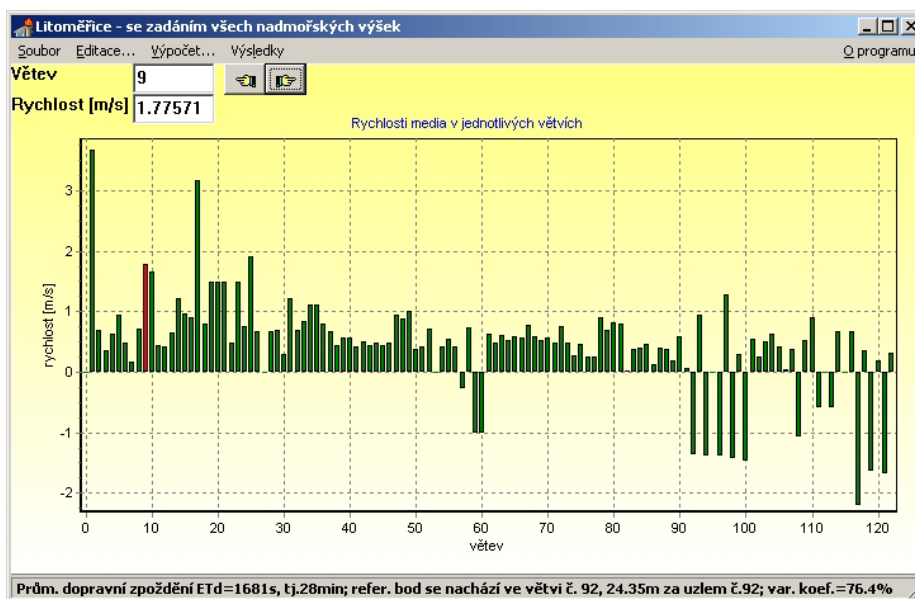
62	61	62	0.032	14	17.1633	0.3694	2.3426	0.4895	30.011
63	61	63	0.15	60	0.0162	9.9944	1.6207	0.6026	46.728
64	63	64	0.032	12	15.3698	0.3889	2.3244	0.5152	30.002
65	63	65	0.15	14	0.0037	9.6056	0.343	0.5792	46.714
66	65	66	0.05	11	1.7219	1.0306	1.8287	0.5592	37.057
67	66	67	0.032	8	11.7828	0.5806	3.9713	0.7692	29.99
68	66	68	0.032	33	34.2012	0.45	6.9257	0.5962	29.942
69	65	69	0.15	52	0.0133	8.575	0.9813	0.517	46.699
70	69	70	0.032	18	20.7502	0.425	3.748	0.5631	29.973
71	69	71	0.15	31	0.0094	8.15	0.6236	0.4914	46.68
72	71	72	0.032	18	20.7502	0.5694	6.7286	0.7544	29.973
73	72	73	0.032	18	20.7502	0.3667	2.7897	0.4858	29.908
74	72	74	0.032	11	14.473	0.2028	0.5951	0.2687	29.904
75	71	75	0.15	57	0.0146	7.5806	0.8397	0.4571	46.658
76	75	76	0.15	39	0.0101	4.2944	0.1854	0.2589	46.625
77	76	77	0.15	116	0.0296	4.2944	0.5452	0.2589	46.555
78	77	78	0.08	7	0.1857	4.2944	3.4242	0.9103	38.596
79	75	79	0.08	32	0.2269	3.2861	2.4506	0.6966	38.701
80	79	80	0.05	8	1.4707	1.5139	3.3706	0.8215	36.984
81	80	81	0.05	2	0.9683	1.4611	2.0672	0.7929	36.976
82	80	82	0.05	35	3.7451	0.0528	0.0104	0.0286	36.177
83	79	83	0.08	49	0.3432	1.7722	1.0778	0.3757	38.651
84	83	84	0.032	49	48.549	0.3056	4.5327	0.4048	29.773
85	83	85	0.065	21	0.4429	1.4667	0.9528	0.4709	43.243
86	85	86	0.05	18	2.2941	0.2194	0.1105	0.1191	36.779
87	85	87	0.065	30	0.6307	1.2472	0.9811	0.4005	43.178
88	87	88	0.05	10	1.6243	0.6778	0.7462	0.3678	36.792
89	87	89	0.065	44	0.9227	0.5694	0.2992	0.1828	43.009
90	89	90	0.032	3	7.2992	0.4389	1.406	0.5815	29.629
91	89	91	0.05	61	5.922	0.1306	0.1009	0.0708	36.029
92	60	92	0.2	86	0.005	-40.1326	8.0004	-1.3612	50.431
93	92	93	0.032	5	9.0926	0.7167	4.6701	0.9495	30.081
94	92	94	0.2	31	0.0019	-40.8493	3.1605	-1.3855	50.437
95	94	95	0.1	25	0.1131	0	0	0	0
96	94	96	0.2	342	0.024	-40.8493	39.9887	-1.3855	50.458
97	96	97	0.04	46	14.5106	1.5056	32.8911	1.2766	32.407
98	96	98	0.2	58	0.0034	-42.3548	6.1042	-1.4365	50.48
99	98	99	0.065	13	0.5709	0.9	0.4625	0.289	43.551
100	98	100	0.2	362	0.0207	-43.2548	38.7538	-1.467	50.502
101	100	101	0.125	53	0.0605	6.35	2.4396	0.5513	42.225
102	101	102	0.05	5	1.2195	0.45	0.247	0.2442	37.174
103	101	103	0.125	249	0.17	5.9	5.917	0.5123	42.145
104	103	104	0.05	106	9.8692	1.1667	13.4331	0.6331	36.959
105	103	105	0.125	2	0.0024	4.7333	0.0534	0.411	42.077
106	105	106	0.125	2	0.0024	0.4306	0.0004	0.0374	42.069
107	105	107	0.125	2	0.0024	4.3028	0.0441	0.3736	42.076
108	100	108	0.25	220	0.0039	-49.6048	9.653	-1.0767	57.959
109	108	109	0.08	200	1.6659	2.4972	10.389	0.5294	38.829
110	108	110	0.05	40	4.2604	1.6444	11.521	0.8924	37.198
111	108	111	0.35	213	0.0008	-53.7465	2.2949	-0.5952	64.525
112	111	112	0.032	36	36.8914	0	0	0	0
113	111	113	0.35	20	0.0001	-53.7465	0.3213	-0.5952	97.114
114	113	114	0.15	13	0.0048	11.1389	0.599	0.6716	46.933
115	114	115	0.05	69	6.578	0	0	0	0
116	114	116	0.15	2	0.001	11.1389	0.1263	0.6716	46.93
117	113	117	0.2	110	0.0078	-64.8854	32.6901	-2.2007	77.347
118	117	118	0.2	235	0.0177	10.7556	2.0432	0.3648	50.533
119	117	119	0.25	112	0.0022	-75.6409	12.6219	-1.6419	87.423
120	119	120	0.1	11	0.0797	1.4222	0.1612	0.1929	43.461
121	119	18	0.25	44	0.0011	-77.0631	6.4963	-1.6728	87.437
122	1	121	0.08	60	0.5546	1.4861	1.2248	0.315	51.24

Prům. dopravní zpoždění ETd=1681s, tj.28min; refer. bod se nachází ve větvi č. 92, 24.35m za uzlem č.92; var. koef.=76.4%

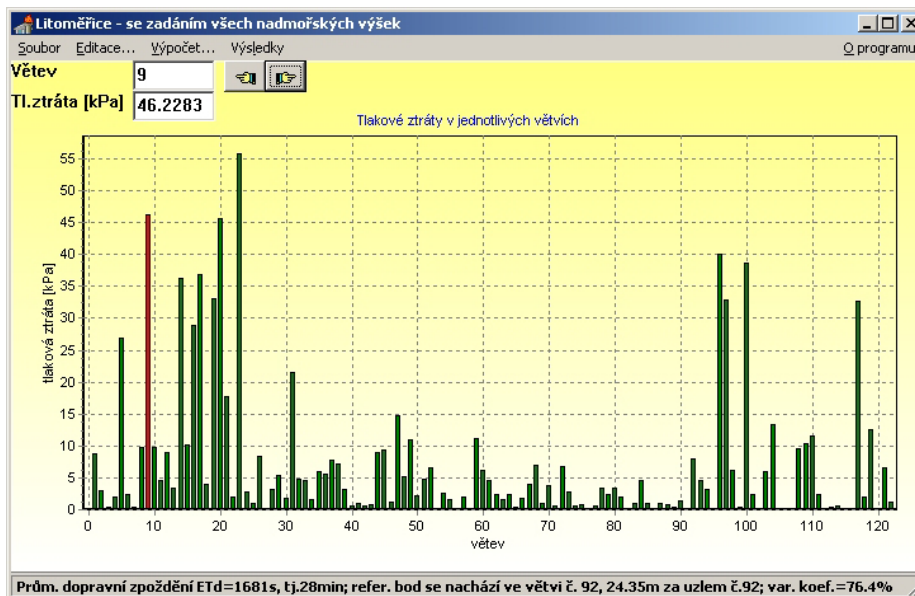
Obr. 57 Statické poměry v jednotlivých větvích horkovodní soustavy
 Litoměřice (část 2)



Obr. 58 Vypočtené průtoky v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice



Obr. 59 Vypočtené rychlosti media v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice



Obr. 60 Vypočtené tlakové ztráty v jednotlivých větvích horkovodní soustavy Litoměřice

8.2.2 Výsledky výpočtu statických poměrů v uzlech

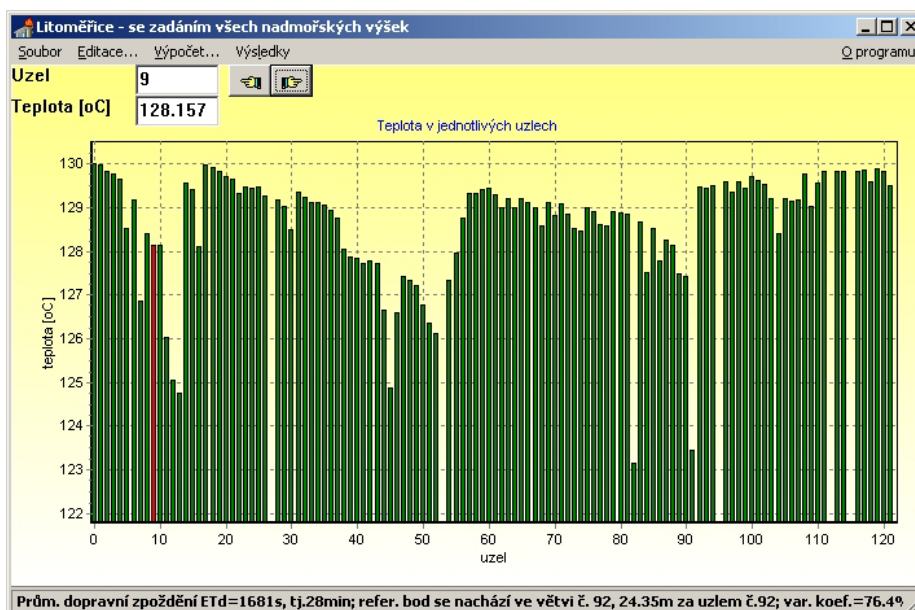
uzel	tlak [kPa]	teplota [oC]	dopr. zpož. [s]
0	1600	130	0
1	1591.268	129.997	4.0781
2	1606.67	129.826	87.3472
3	1606.239	129.764	92.8298
4	1604.648	129.649	173.531
5	1577.751	128.524	273.4083
6	1602.306	129.172	406.0487
7	1620.362	126.856	613.36
8	1601.679	128.422	630.5506
9	1564.66	128.158	654.203
10	1554.86	128.138	656.0025
11	1560.153	126.034	723.3068
12	1629.482	125.054	1377.7997
13	1662.965	124.75	1416.4596
14	1508.986	129.556	218.8656
15	1480.36	129.408	291.1174
16	1452.507	128.109	397.8898
17	1554.348	129.986	28.3749
18	1550.304	129.919	366.6361
19	1517.273	129.83	563.1106
20	1471.539	129.706	837.1056
21	1453.864	129.67	916.6309
22	1451.891	129.346	941.9079
23	1352.022	129.484	1327.7556
24	1340.001	129.462	1348.9044
25	1350.988	129.483	1329.3343
26	1213.632	129.257	1691.3209
27	1195.215	0	0
28	1173.684	129.173	1813.9531
29	1131.554	129.037	1946.1159
30	1144.18	128.514	2777.6365
31	1338.684	129.363	1521.3969
32	1333.999	129.255	1626.5987
33	1334.16	129.13	1653.4119
34	1332.572	129.122	1666.938
35	1326.677	129.071	1748.0942
36	1293.42	128.931	1884.4776
37	1309.61	128.767	2236.3867
38	1283.938	128.053	3305.3424
39	1262.316	127.875	3510.7779
40	1252.433	127.838	3553.6514
41	1233.046	127.724	3577.6007
42	1251.91	127.796	3602.3351
43	1232.722	127.713	3698.0343
44	1159.23	126.662	4241.6567
45	1057.731	124.88	4790.5962
46	1139.69	126.595	4255.9894
47	1208.725	127.427	3785.01
48	1203.497	127.352	3800.8591
49	1174.146	127.217	3821.691
50	1164.501	126.763	3892.223
51	1194.652	126.367	4108.736
52	1178.913	126.129	4159.4414
53	1185.443	0	0
54	1230.932	127.341	3672.7063
55	1273.092	127.965	3323.7701
56	1309.57	128.764	2241.2535
57	1418.976	129.329	2048.3341
58	1418.847	129.328	2051.0592
59	1448.564	129.416	1835.3884
60	1473.097	129.461	1726.4394
61	1486.968	129.287	1984.081

Obr. 61 Statické poměry v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice (část 1)

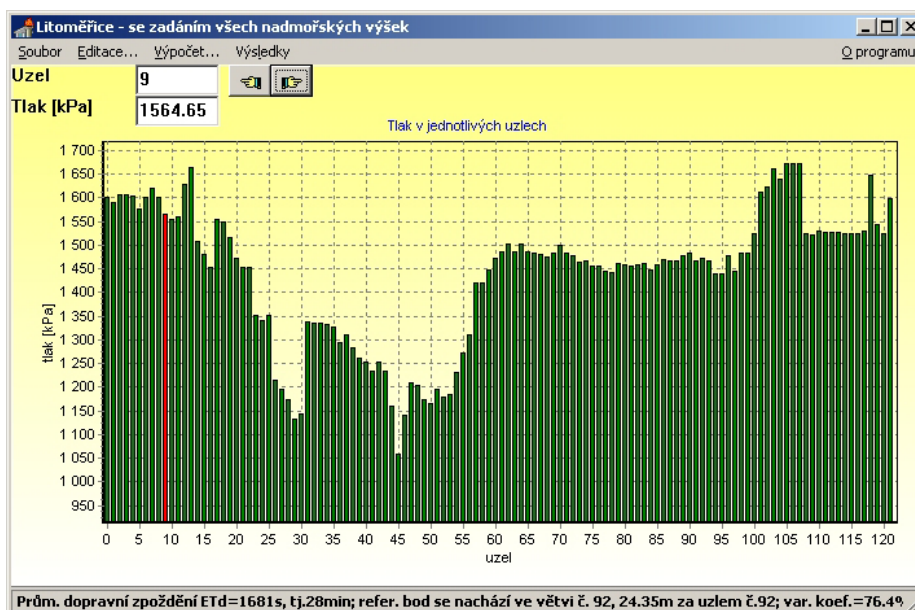
62	1503.042	129.015	2012.6838
63	1485.347	129.22	2083.6457
64	1501.44	128.999	2106.9365
65	1485.004	129.204	2107.818
66	1483.176	129.109	2127.4874
67	1479.204	129.011	2137.8884
68	1476.25	128.585	2182.8392
69	1484.023	129.136	2208.3911
70	1498.692	128.833	2240.359
71	1483.399	129.094	2271.4748
72	1476.671	128.867	2295.3337
73	1464.673	128.517	2332.3874
74	1466.867	128.48	2336.2789
75	1454.934	129.01	2396.1805
76	1454.749	128.909	2546.7963
77	1444.995	128.608	2994.7816
78	1441.571	128.593	3002.4712
79	1461.692	128.92	2442.1192
80	1458.322	128.873	2451.8571
81	1456.254	128.861	2454.3795
82	1458.311	123.143	3673.9021
83	1460.614	128.665	2572.5524
84	1446.873	127.524	2693.5944
85	1459.662	128.517	2617.1431
86	1468.76	127.796	2768.2966
87	1467.889	128.269	2692.0522
88	1467.143	128.139	2719.2405
89	1476.798	127.475	2932.6869
90	1484.601	127.427	2937.8463
91	1467.489	123.454	3793.6901
92	1471.889	129.486	1663.2577
93	1467.219	129.436	1668.5237
94	1438.216	129.495	1640.8824
95	1438.216	0	0
96	1478.204	129.596	1394.033
97	1445.313	129.36	1430.0669
98	1484.308	129.613	1353.6577
99	1483.845	129.463	1398.6417
100	1523.061	129.714	1106.9036
101	1612.706	129.63	1203.0321
102	1621.667	129.531	1223.5073
103	1662.04	129.205	1689.1008
104	1639.398	128.403	1856.5293
105	1671.195	129.201	1693.9672
106	1671.194	129.154	1747.4669
107	1671.151	129.196	1699.3207
108	1523.505	129.775	902.5844
109	1522.325	129.032	1280.4027
110	1530.402	129.559	947.4084
111	1525.8	129.836	544.7386
112	1525.8	0	0
113	1526.122	129.845	511.138
114	1525.523	129.832	530.494
115	1525.523	0	0
116	1525.396	129.83	533.4718
117	1531.186	129.876	461.1534
118	1648.853	129.613	1105.3602
119	1543.808	129.907	392.9397
120	1525.23	129.827	449.9503
121	1599.251	129.503	194.5409

Prům. dopravní zpoždění ETD=1681s, tj.28min; refer. bod

Obr. 62 Statické poměry v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy
 Litoměřice (část 2)



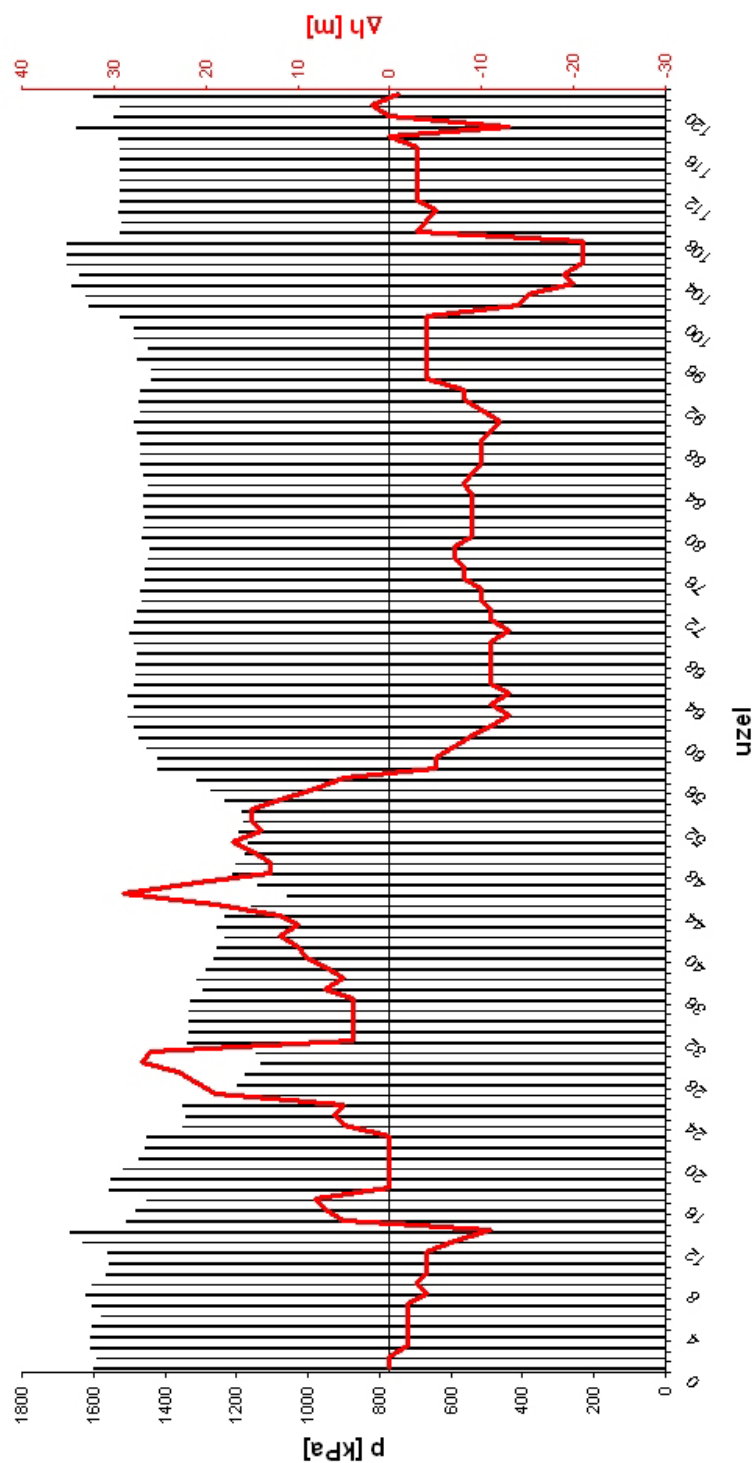
Obr. 63 Vypočtené hodnoty teplot v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice



Obr. 64 Vypočtené hodnoty tlaků v jednotlivých uzlech horkovodní soustavy Litoměřice

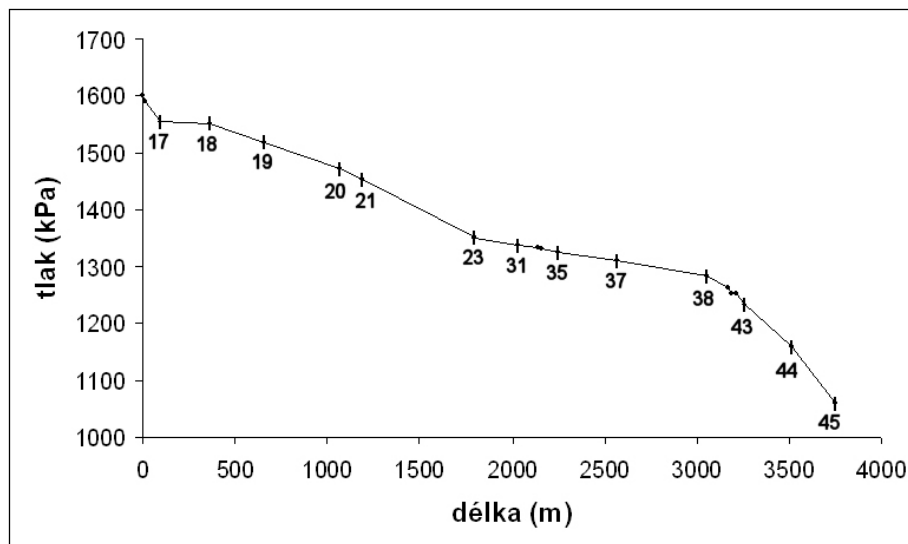
uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]	uzel	Δh [m]
1	0	12	-7	23	5	34	4	45	29	56	5	67	-11	78	-7	89	-11	100	-4	111	-3
2	-2	13	-11	24	6	35	4	46	21	57	-5	68	-11	79	-9	90	-12	101	-14	112	-3
3	-2	14	5	25	5	36	7	47	13	58	-5	69	-11	80	-9	91	-10	102	-15	113	-3
4	-2	15	7	26	19	37	5	48	13	59	-7	70	-13	81	-9	92	-8	103	-20	114	-3
5	-2	16	8	27	21	38	7	49	15	60	-9	71	-11	82	-9	93	-8	104	-19	115	-3
6	-2	17	0	28	23	39	9	50	17	61	-11	72	-11	83	-9	94	-4	105	-21	116	-3
7	-4	18	0	29	27	40	10	51	14	62	-13	73	-10	84	-8	95	-4	106	-21	117	0
8	-3	19	0	30	26	41	12	52	15	63	-11	74	-10	85	-9	96	-4	107	-21	118	-13
9	-4	20	0	31	4	42	10	53	15	64	-13	75	-8	86	-10	97	-4	108	-3	119	0
10	-4	21	0	32	4	43	12	54	12	65	-11	76	-8	87	-10	98	-4	109	-4	120	2
11	-4	22	0	33	4	44	19	55	8	66	-11	77	-7	88	-10	99	-4	110	-5	121	-1

Tab. 1 Výškové rozdíly jednotlivých uzlů SCZT Litoměřice vzhledem ke zdroji



Obr. 65 Vypočtené hodnoty tlaků v relaci s výškovými poměry

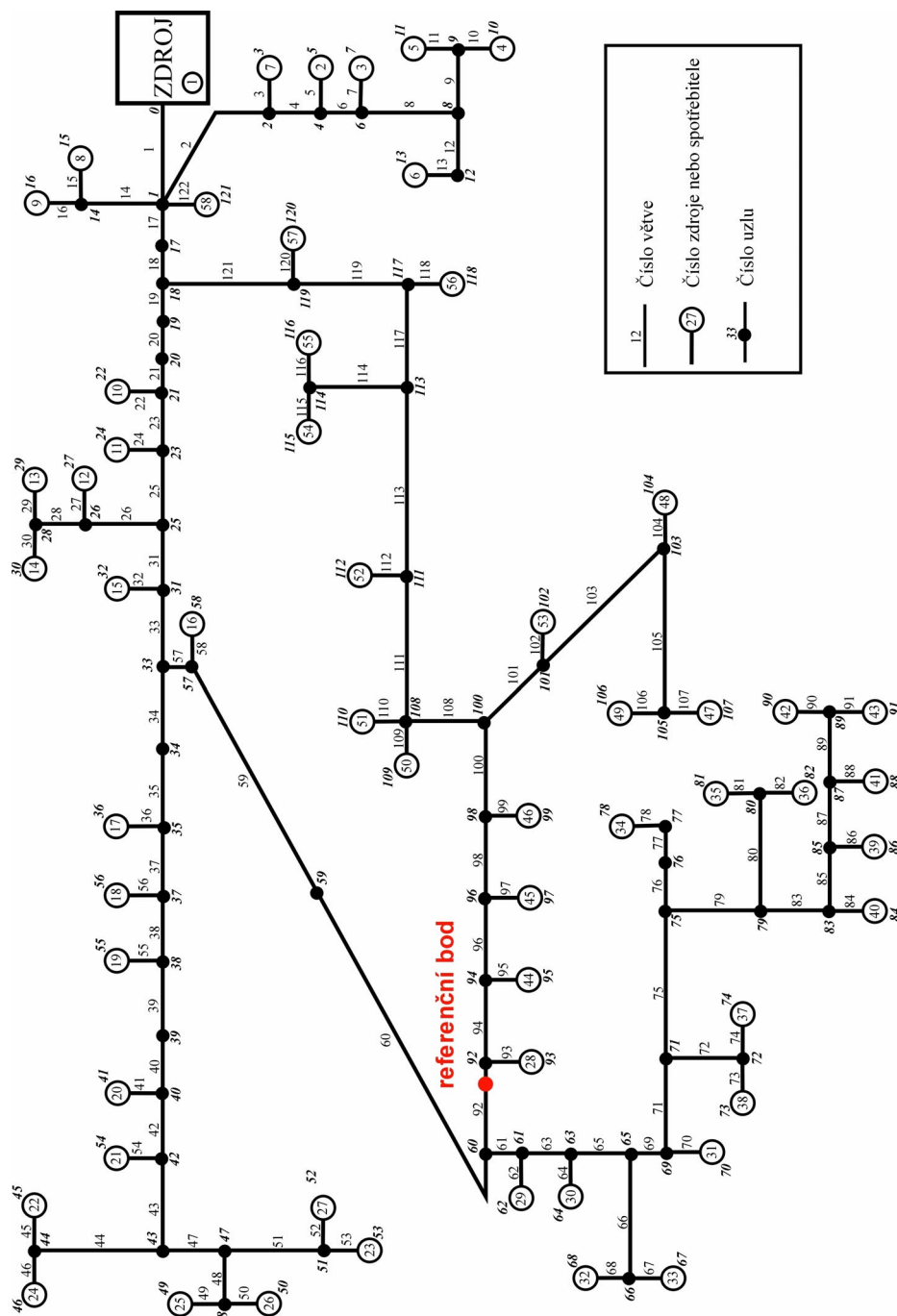
S využitím dosažených výsledků byl následně sestaven tlakový diagram horkovodní soustavy Litoměřice zahrnující uzly 0, 1, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45. Na konci tohoto tlakového digramu leží hydraulicky nejvzdálenější odběratel – VS č. 1701-339 (kasárna Radobýl - Vojenské stavby).



Obr. 66 Tlakový diagram části horkovodní soustavy Litoměřice

Na základě vypočtené hodnoty průměrného dopravního zpoždění $E_{Td} = 1681s = 0,47h$, známých hodnot rychlostí v jednotlivých větvích a příslušných délek potrubí byla určena poloha referenčního bodu. Referenční bod se nachází ve větvi č. 92, viz Obr. 67.

Dosažené výsledky v oblasti výpočtu hydraulických a teplotních poměrů pro SCZT Litoměřice podrobně popisuje také výzkumná zpráva, která vznikla na IIT ve Zlíně. Číslo této výzkumné zprávy je **UTB-FT-IIT/2002/2: Výpočet hydraulických a teplotních poměrů pro SCZT Litoměřice**. K této zprávě byl také dopracován dodatek s označením **UTB-FT-IIT/2002/2 – dod. č. 1**.

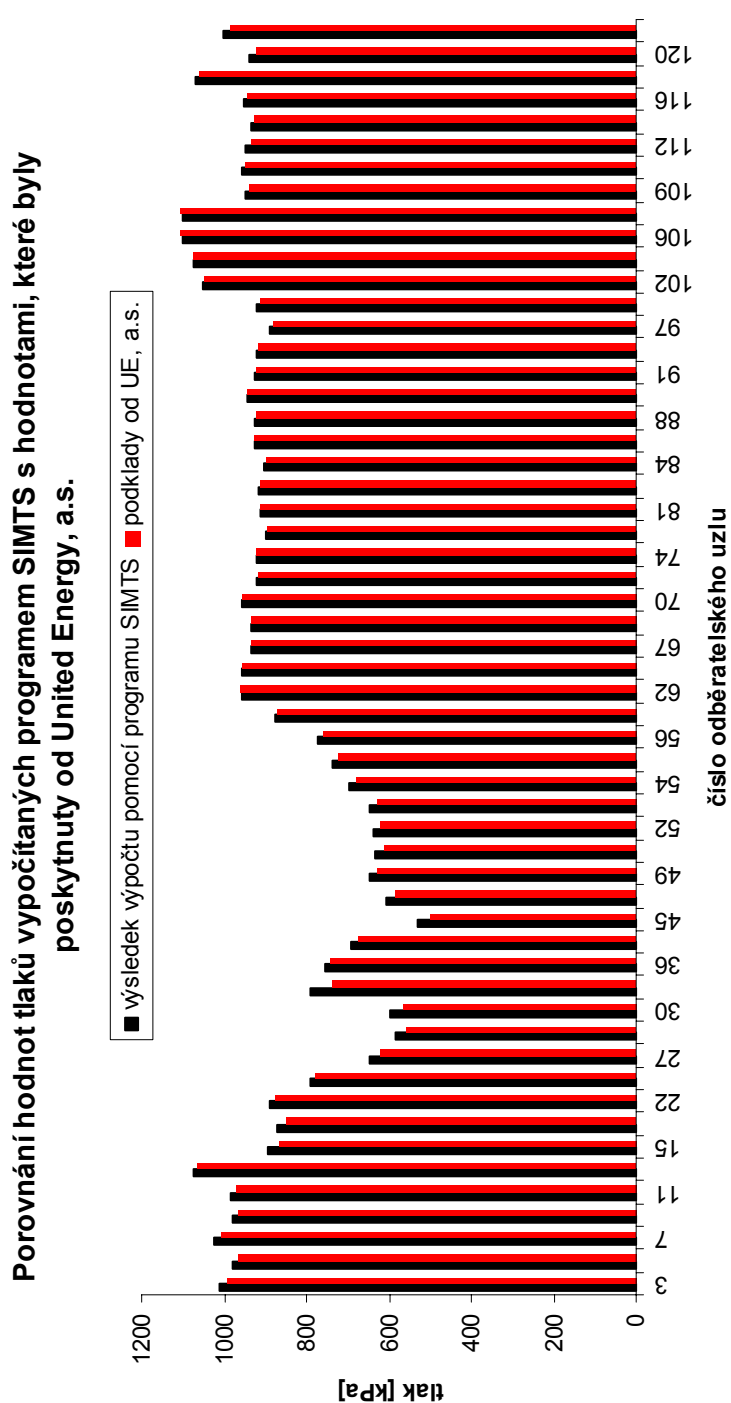


Obr. 67 Grafické znázornění polohy referenčního bodu v horkovodní síti

V rámci verifikace použitého matematického modelu a celého výpočtového algoritmu pro určování statických poměrů v tepelných sítích jsem provedl porovnání dosažených výsledků s podklady, které byly k dispozici od společnosti United Energy, a.s. Závěry tohoto porovnání jsou následující:

- hodnoty průtoků v jednotlivých větvích se téměř shodují, rozdíly nepřesahují 1%, průměrný rozdíl hodnot činí 0.02%
- průměrný rozdíl hodnot hydraulického odporu činí 6.4% - to může být způsobeno použitím odlišným hodnot některých fyzikálních veličin (hustota, drsnost potrubí, koeficient místních odporů, apod.) či užitím odlišných vztahů pro stanovení hydraulického odporu
- hodnoty rychlosti proudění se odlišují průměrně o 6.1% - to může být způsobeno užitím odlišným hodnot hustoty proudící vody
- při porovnávání hodnot tlaků u jednotlivých odběratelů byla zjištěna průměrná odchylka 1.5% - bližší porovnání je na Obr. 68
- porovnání teplot v uzlech sítě nebylo možné provést, nebylo s čím porovnávat
- orientace toků v jednotlivých větvích sítě se shodují

Při provedené verifikaci se neporovnávaly vypočítané hodnoty se skutečnými reálnými hodnotami, pouze byly porovnávány výstupy ze dvou matematických modelů. Vzhledem k tomuto faktu by bylo žádoucí provést další stupeň ověřování správnosti užitého modelu, a to přímo měření v terénu. V rámci disertační práce k tomuto kroku nedošlo.



Obr. 68 Hodnoty tlaků vypočtené pomocí programu SIMTS v relaci s hodnotami poskytnutými United Energy, a.s.

8.2.3 Korekce a filtrace měřených dat

Prvotní analýzou technologických dat měřených na jednotlivých výměňkových stanicích bylo zjištěno, že jsou data v mnohých případech zatížena chybami měření. Velmi často se jednalo o následující nedostatky:

- některé zaznamenané hodnoty měřené technologické veličiny výrazně vybočují, jedná se o nahodilé chyby měření
- řádové rozdíly mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami měřené technologické veličiny (posunutá poloha desetinné čárky)
- velmi malé naměřené hodnoty tam, kde by měla být nulová hodnota
- chybějící záznamy z některých dnů v měsíci i celé měsíce

Práce s těmito „surovými“ daty by byla zatížena výše uvedenými chybami, ať už by se jednalo o zpracovávání topných charakteristik nebo o využití dat v simulačních výpočtech. Proto bylo nutné data zbavit chyb měření. Vzhledem k tomu, že se jednalo o velké množství dat umístěných v několika stovkách databázových souborů, bylo třeba tuto činnost co nejvíce zautomatizovat. K této činnosti jsem využil možností VisualBasicu zabudovaného v prostředí MS Access a vytvořil několik rutin (maker), které zajistily příslušné korekce v datech. Konkrétně jsem se soustředil na odstranění extrémních hodnot a filtraci naměřených časových řad. Pro filtrování se jako vhodné jevílo použití metodiky exponenciálně váženého klouzavého průměru, definovaného následujícím vztahem:

$$X_t = \lambda Y_t + (1-\lambda) X_{t-1}, \quad \text{pro } t = 1, 2, \dots, n \quad (44)$$

kde X je filtrovaná hodnota,

Y - naměřená hodnota,

$0 < \lambda < 1$ - faktor zapomínání.

Faktor zapomínání byl nastaven na hodnotu $\lambda = 0,6$.

8.2.4 Topné charakteristiky

Z poskytnutých provozních dat, které byly naměřeny na výměňkových stanicích, byly zpracovány topné charakteristiky, tj. závislosti odebraného tepla spotřebitelů na venkovní teplotě. Díky těmto charakteristikám je pak možné s určitou mírou přesnosti aproximovat odběr stanice při známé aktuální venkovní teplotě. Toho lze využít při různých statických nebo dynamických simulacích, jež je možné s pomocí výpočtového programu SIMTS realizovat. Podle typu předávací stanice byly zpracovávány topné charakteristiky následovně:

▪ kompaktní předávací stanice KPS

K dispozici byly hodinové záznamy technologických veličin měřených na stanicích. Pro každý zaznamenaný den byl z naměřených dat stanoven celkový denní odběr tepla a průměrná venkovní teplota. Celkový denní odběr tepla byl určen jako rozdíl hodnot součtového kalorimetru na konci a na začátku dne dělený počtem sekund za den:

$$P[W] = 10^{-9} (W1[GJ]_{24hod} - W1[GJ]_{0hod}) / 86400s. \quad (45)$$

Průměrná venkovní teplota byla stanovena z náměrů ze 7., 14. a 21. hodiny dle následujícího vztahu:

$$T_{VENK}[^{\circ}C] = (T_{VENK}[^{\circ}C]_{7hod} + T_{VENK}[^{\circ}C]_{14hod} + 2T_{VENK}[^{\circ}C]_{21hod}) / 4. \quad (46)$$

Pro každý den byl tedy určen jeden bod topné charakteristiky, přičemž záznamy dat z měsíců říjen až květen včetně byly použity pro sestavení topné charakteristiky topného období a zbylé měsíce červen až září pro sestavení topné charakteristiky netopného období. V netopném období se však jedná pouze o odběr pro účely ohřevu teplé užitkové vody a nelze vysledovat žádnou závislost

odběru tepla na venkovní teplotě. Proto byla spočtena pouze průměrná hodnota odběru v těchto letních měsících. Pokud byly náměry v některém ze dní zjevně zkreslené (nulová venkovní teplota, konstantní hodnota měřeného tepla na kalorimetru, záporná hodnota odebraného tepla během dne, apod.) nebyly příslušné body do topných charakteristik zahrnuty. Aproximace funkčních závislostí z jednotlivých bodů pak byla provedena polynomem 3. řádu.

Přestože uvedená činnost byla zčásti zautomatizovaná pomocí vytvořených jednoúčelových maker ve VisualBasicu, zpracování tak velkého množství dat (45KPS x 8760 hodinových hodnot jedné měřené veličiny za rok) byla činnost velmi pracná a náročná a tak byla k sestavení topných charakteristik použita pouze data za rok 2004. Výsledky práce shrnuje kapitola 8.2.4.1.

- **výměníkové stanice VS a EC**

Přestože byly k dispozici hodinové záznamy technologických veličin měřených na stanicích VS a EC, nebylo možné z nich žádným způsobem určit odebírané tepelné výkony. Tato problematika byla několikrát konzultována se zástupci UE, a.s., skutečností však zůstává, že hodinové odběry tepla u těchto stanic z poskytnutých databázových souborů určit nelze. Tyto výměňkové stanice patří k největším odběratelům SCZT Litoměřice, a proto je škoda, že jejich chování nebylo možno v plné míře poznat. K sestavení topných charakteristik bylo použito známých měsíčních odečtů odebrané tepelné energie, a to z každého měsíce let 2002-4. Celkem byly tedy topné charakteristiky aproximovány z 3x12 hodnot. Nevýhodou u takto získaných závislostí je, že jsou sestavovány z měsíčních průměrovaných hodnot venkovní teploty a tak se ztrácí informace

o chování odběru při venkovních teplotách bod bodem mrazu. Výsledky práce shrnuje kapitola 8.2.4.2.

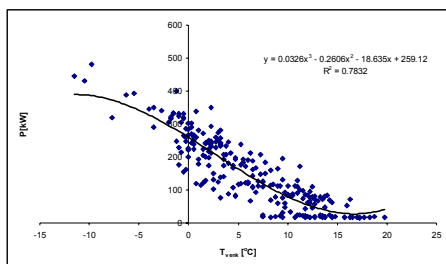
▪ **odběrná místa s měsíčními odečty**

Poslední skupinu odběratelů tvoří výměňkové stanice, kde není realizovaný on-line odečet měřených technologických dat a kde se odečítá spotřebované teplo pouze jednou do měsíce. U těchto odběratelů byly topné charakteristiky zpracovány podobně jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že k dispozici byly měsíční odečty pouze za leden 2002 – duben 2003, celkem tedy 16 hodnot. Výsledky odpovídají množství vstupních informací a aproximace závislostí je v těchto případech značně nepřesná, viz kapitola 8.2.4.3.

8.2.4.1 Kompaktní předávací stanice KPS

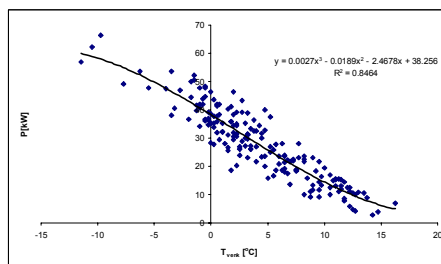
uzel 5, VS 1704-303, KPS 205

průměrný odběr v netopné období = 16,3 kW



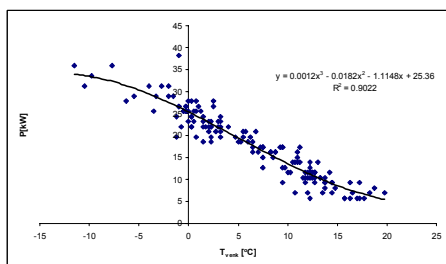
uzel 7, VS 1704-301, KPS 206

průměrný odběr v netopné období = 0 kW



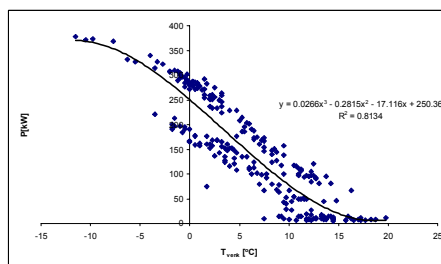
uzel 11, VS 1704-305, KPS 207

průměrný odběr v netopné období = 6,8 kW



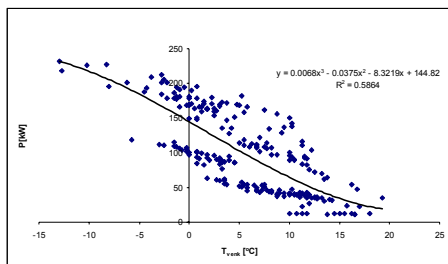
uzel 13, VS 1701-332, KPS 201

průměrný odběr v netopné období = 5,7 kW



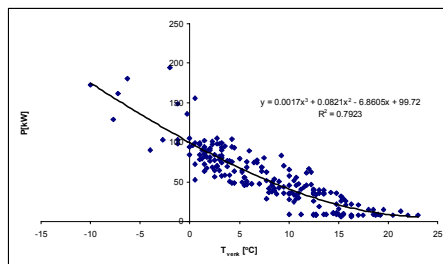
uzel 41, VS 1701-340, KPS 117

průměrný odběr v netopné období = 11,5 kW



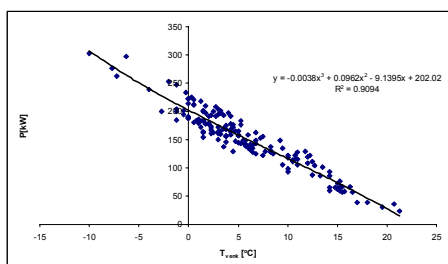
uzel 45, VS 1701-335, KPS 100

průměrný odběr v netopné období = 7,4 kW



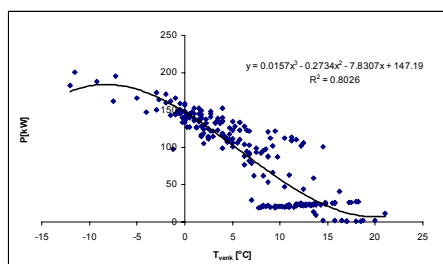
uzel 46, VS 1701-334, KPS 160

průměrný odběr v netopné období = 0 kW



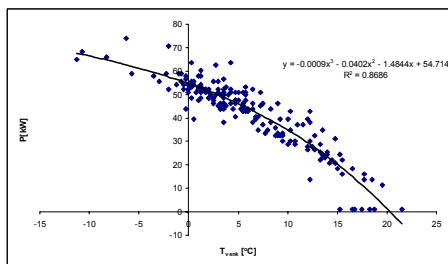
uzel 49, VS 1701-345, KPS 104

průměrný odběr v netopné období = 1,8 kW



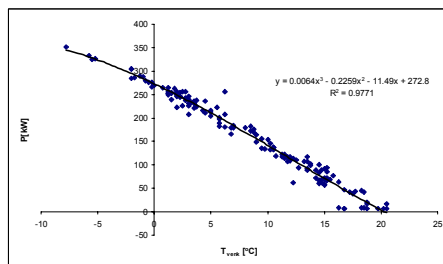
uzel 50, VS 1701-344, KPS 126

průměrný odběr v netopné období = 0 kW



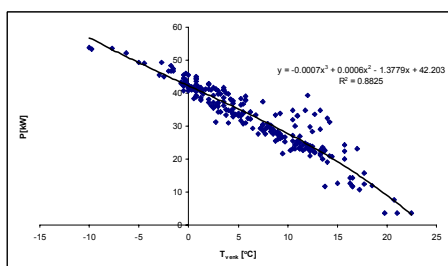
uzel 52, VS 1701-342, KPS 130

průměrný odběr v netopné období = 7 kW



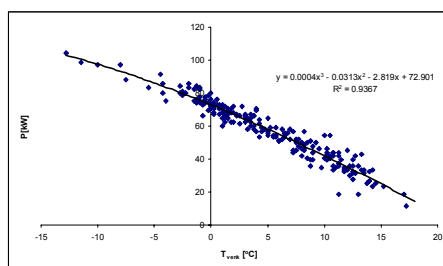
uzel 53, VS 1701-348, KPS 108

průměrný odběr v netopné období = 3,3 kW



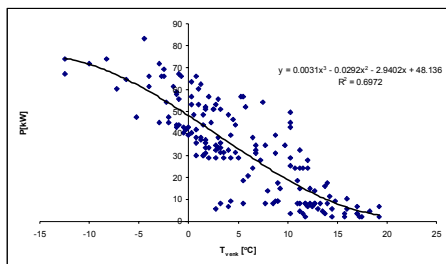
uzel 54, VS 1701-333, KPS 159

průměrný odběr v netopné období = 0,9 kW



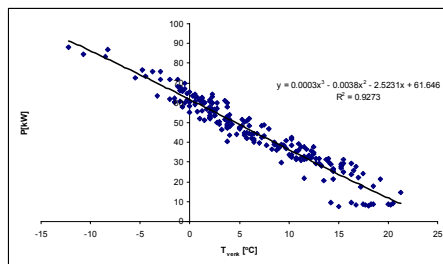
uzel 55, VS 1701-343, KPS 121

průměrný odběr v netopné období = 3 kW



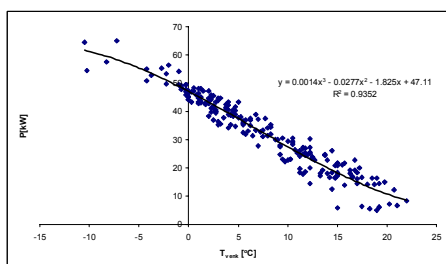
uzel 62, VS 1701-312, KPS 14

průměrný odběr v netopné období = 7,5 kW



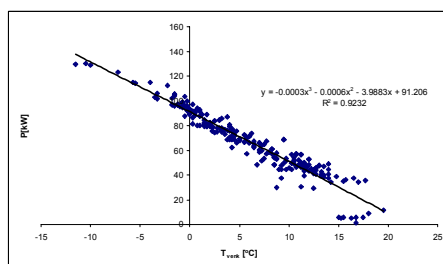
uzel 64, VS 1701-314, KPS 13

průměrný odběr v netopné období = 6,1 kW



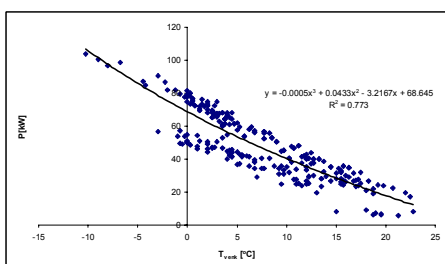
uzel 67, VS 1701-316, KPS 11

průměrný odběr v netopné období = 5,1 kW



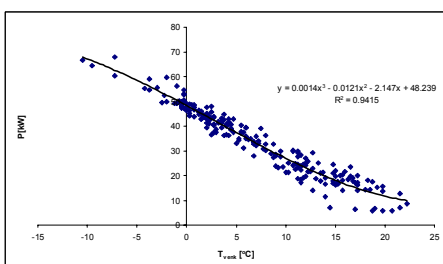
uzel 68, VS 1701-313, KPS 12

průměrný odběr v netop. období = 6,3 kW



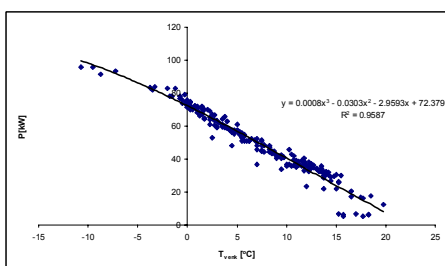
uzel 70, VS 1701-315, KPS 10

průměrný odběr v netopné období = 5,9 kW



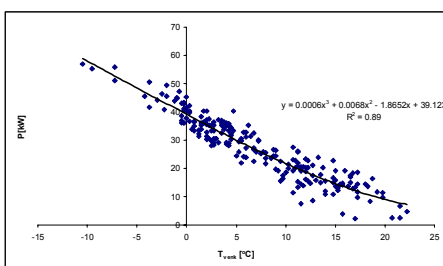
uzel 73, VS 1701-319, KPS 9

průměrný odběr v netopné období = 5,5 kW



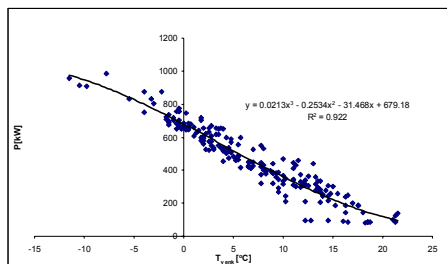
uzel 74, VS 1701-317, KPS 8

průměrný odběr v netopné období = 2,3 kW



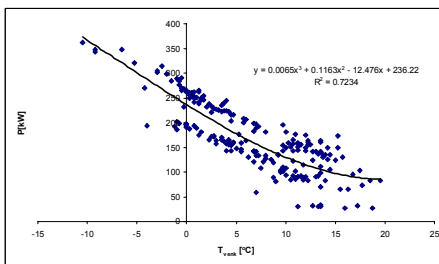
uzel 78, VS 1701-326, KPS 1

průměrný odběr v netop. období = 82,8 kW



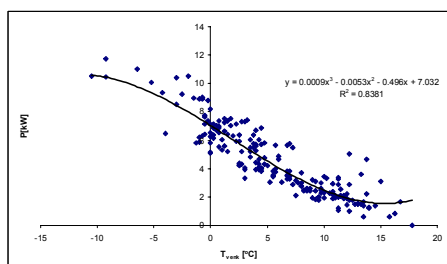
uzel 81, VS 1701-322, KPS 2

průměrný odběr v netop. období = 26,9 kW



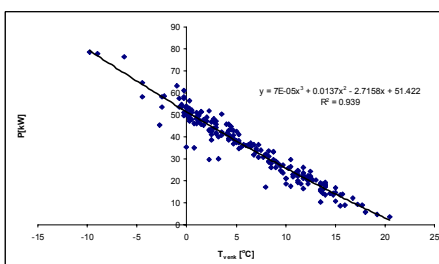
uzel 82, VS 1701-323, KPS 3

průměrný odběr v netopné období = 0 kW



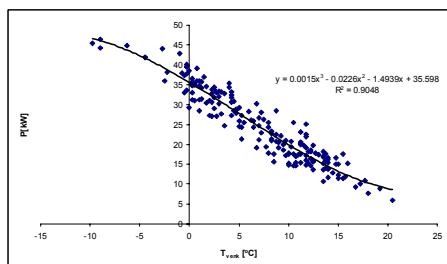
uzel 84, VS 1701-336, KPS 4

průměrný odběr v netopné období = 0 kW



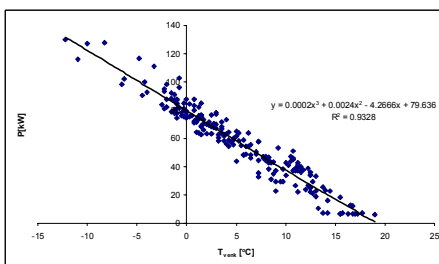
uzel 86, VS 1701-320, KPS 5

průměrný odběr v netopné období = 3 kW



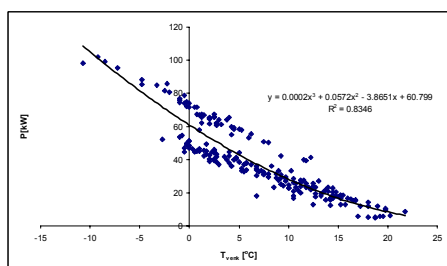
uzel 88, VS 1701-321, KPS 15

průměrný odběr v netopné období = 6,8 kW



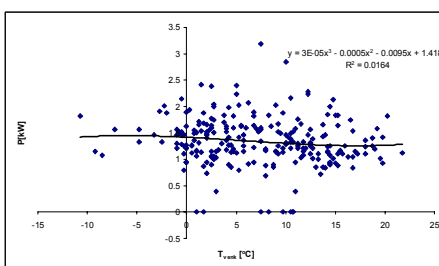
uzel 90, VS 1701-318, KPS 6

průměrný odběr v netopné období = 5,1 kW



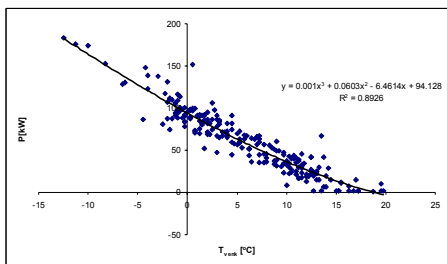
uzel 91, VS 1701-328, KPS 7

průměrný odběr v netopné období = 1,1 kW



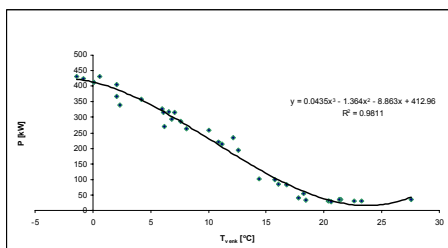
uzel 93, VS 1701-311, KPS 16

průměrný odběr v netopné období = 1,8 kW

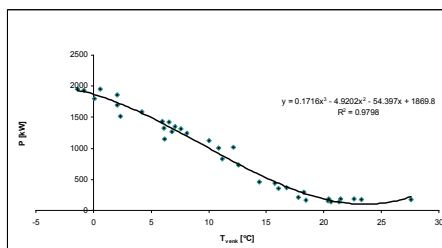


8.2.4.2 Výměníkové stanice VS a EC

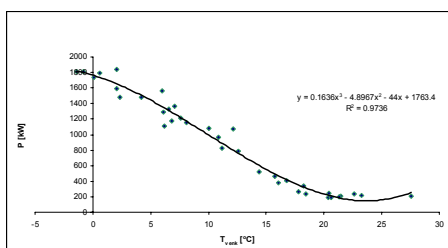
uzel 17, VS 1703-006, EC6



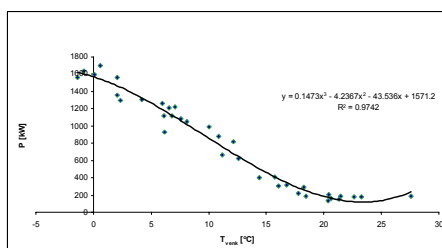
uzel 24, VS 1702-001, EC1



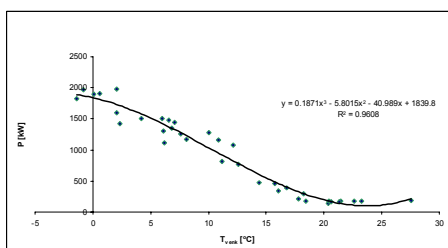
uzel 29, VS 1702-007, EC7



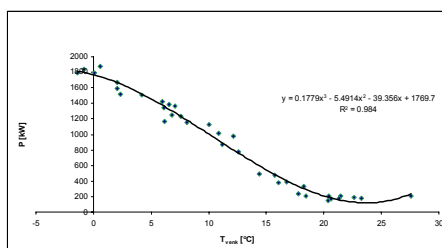
uzel 32, VS 1702-003, EC3



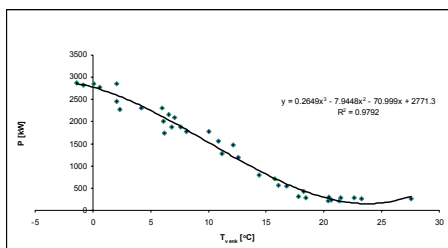
uzel 36, VS 1702-002, EC2



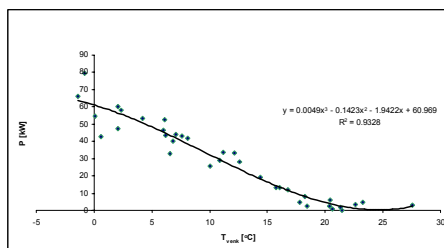
uzel 56, VS 1702-004, EC4



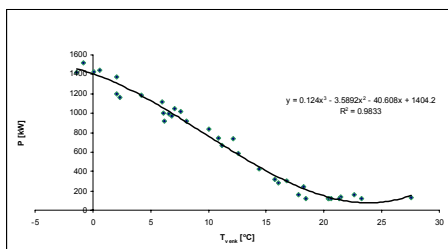
uzel 58, VS 1702-005, EC5



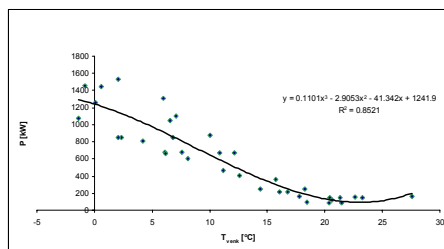
uzel 112, VS 1701-004, VS4



uzel 116, VS 1701-002, VS2

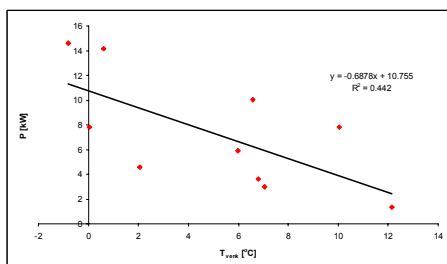


uzel 118, VS 1701-001, VS1

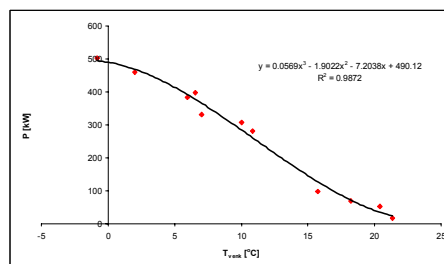


8.2.4.3 Odběrná místa s měsíčními odečty

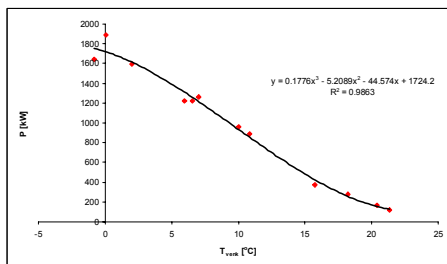
uzel 3, VS 1704-302,
Prádelna Českolipská 3



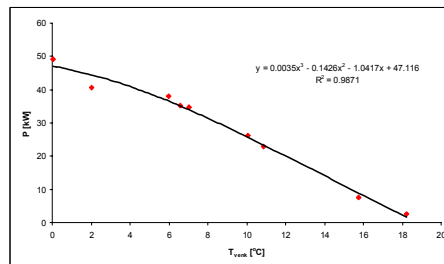
uzel 10, VS 1704-304,
Kasárna J. z Poděbrad



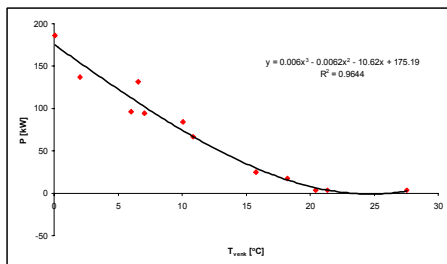
uzel 15, VS 1703-301, Městská nemocnice



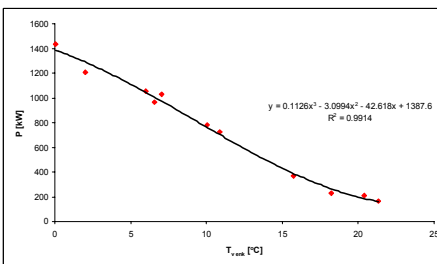
uzel 22, VS 1702-301, OSEVA Nerudova ul.



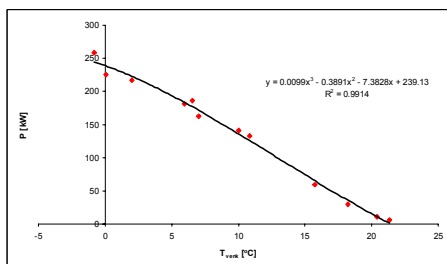
uzel 27, VS 1702-302, ALBERT Litoměřice



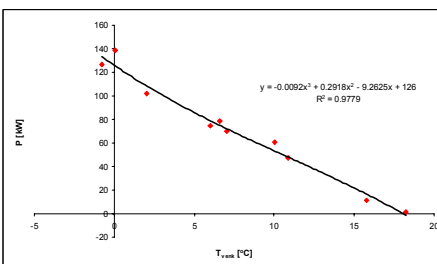
uzel 30, VS 1702-008, EC 8 - U kapličky



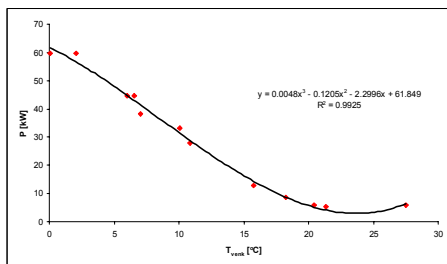
uzel 97, VS 1701-308, Policie ČR



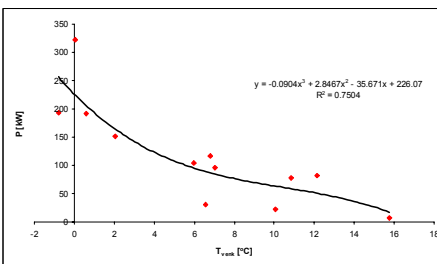
uzel 99, VS 1701-307, 3.ZŠ B. Němcové



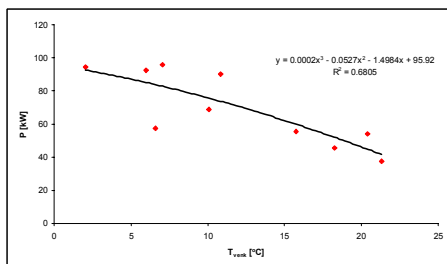
uzel 102, VS 1701-338,
Pražská 10,12/531



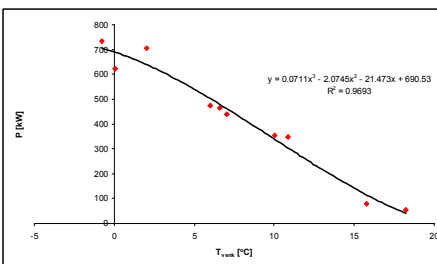
uzel 104, VS 1701-306, TELECOM
Litoměřice



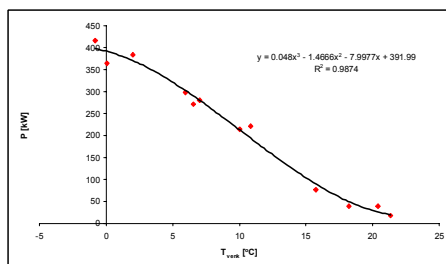
uzel 106, VS 1701-309, Věžnice



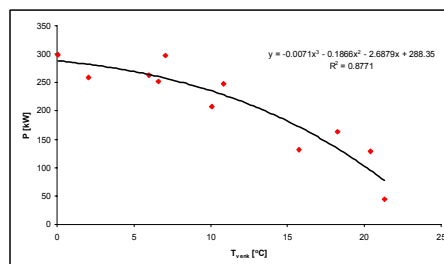
uzel 107, VS 1701-305, Okresní úřad



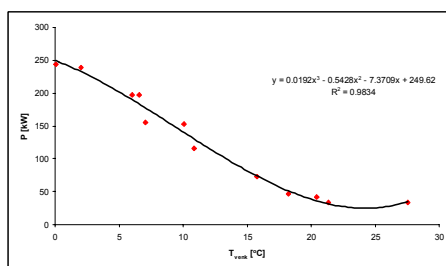
uzel 109, VS 1701-302,
 Svojsíkova - školní jídelna



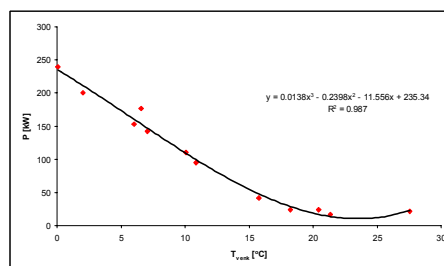
uzel 110, VS 1701-303,
 Plavecký bazén



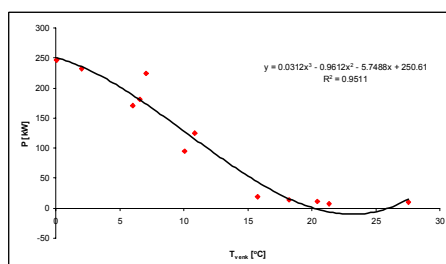
uzel 115, VS 1701-347, Vrchlického 292 - HD



uzel 120, VS 1701-301, 6.ZŠ, U stadionu 4



uzel 122, VS 1791-301, ČSAD Litoměřice



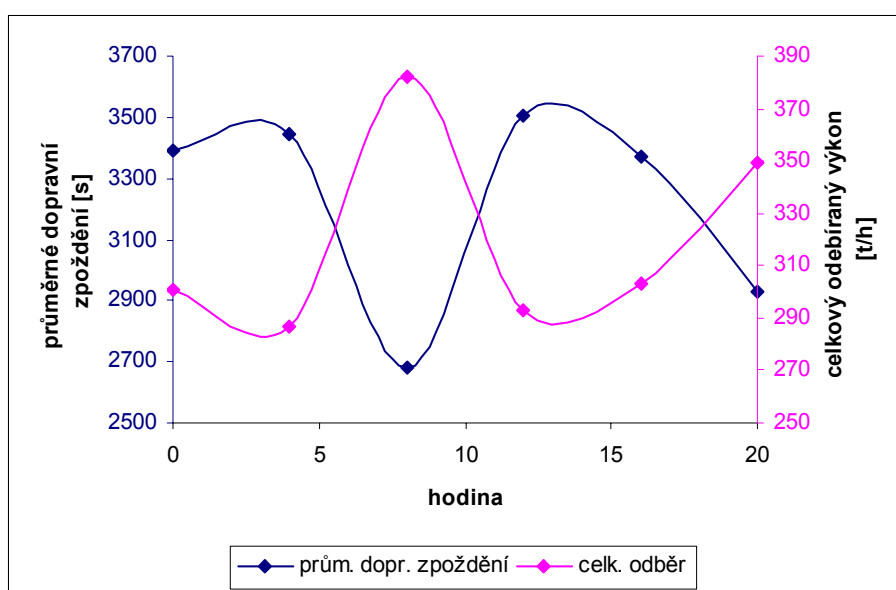
8.2.5 Analýza závislosti průměrného dopravního zpoždění a polohy referenčního bodu horkovodní sítě na čase

Vytvořený výpočtový program SIMTS byl využit pro sledování velikosti průměrného dopravního zpoždění v horkovodní síti během zimního a letního období. Zároveň byla analyzována závislost průměrného dopravního zpoždění na denní hodině. Za tímto účelem byly provedeny statické simulace pro dva vhodně zvolené dny v zimním období (čt. 11. 12. 2003 a út. 27. 1. 2004) a pro jeden den

v letním období (pá. 29. 8. 2003). Vždy se jednalo o pracovní dny a vždy byly venkovní teploty typické pro dané roční období, tj. bez výraznějších extrémů. Sledována byla velikost průměrného dopravního zpoždění v síti, dále poloha referenčního bodu, variační koeficient a celkový odběr sítě. Pro každý den bylo provedeno 6 statických simulací v šesti časových okamžicích. Dosažené výsledky jsou shrnuty v následujících Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4 a na Obr. 69, Obr. 70, Obr. 71.

čt. 11. 12. 2003					
hodina	$T_{\text{VENK}} [^{\circ}\text{C}]$	$E_{\text{Td}} [\text{s}]$	poloha ref. bodu	var. koef. [%]	celk. odběr [t/h]
0	0.2	3390	větev 96	186.8	301
4	-1.6	3447	větev 96	125.7	287
8	-2.5	2678	větev 92	221.8	382
12	0.7	3503	větev 96	188.8	293
16	2.3	3373	větev 96	187.7	303
20	-0.4	2932	větev 92	126.9	349

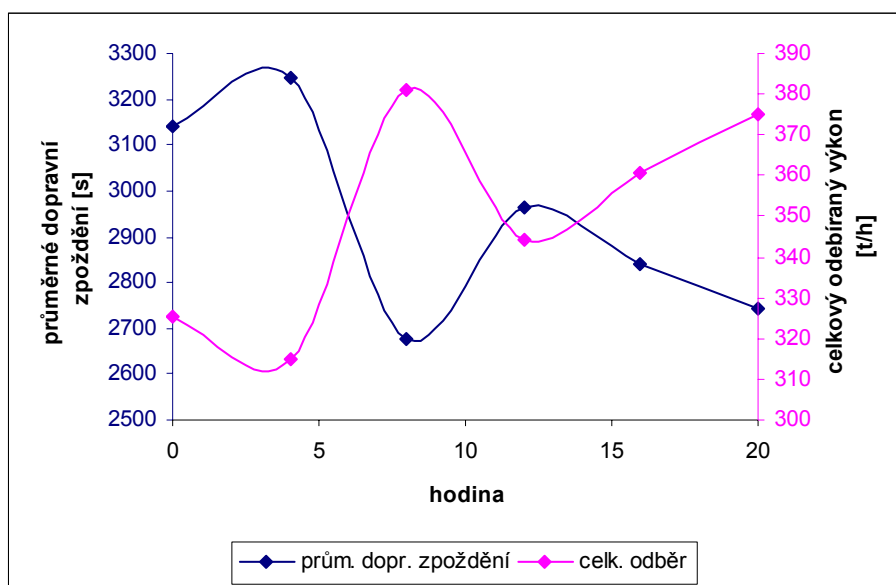
Tab. 2 Výsledky statických výpočtů pro den 11. 12. 2003



Obr. 69 Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 11. 12. 2003

út. 27. 1. 2004					
hodina	T_{VENK} [°C]	E_{Td} [s]	poloha ref. bodu	var. koef. [%]	celk. odběr [t/h]
0	-1.6	3139	větev 96	76.4	325.2
4	-2.5	3245	větev 96	76.8	314.7
8	-2.3	2675	větev 96	77.1	381.2
12	-0.7	2962	větev 96	72.5	344.4
16	-1.2	2841	větev 92	77.7	360.7
20	-0.7	2743	větev 92	89.4	375.3

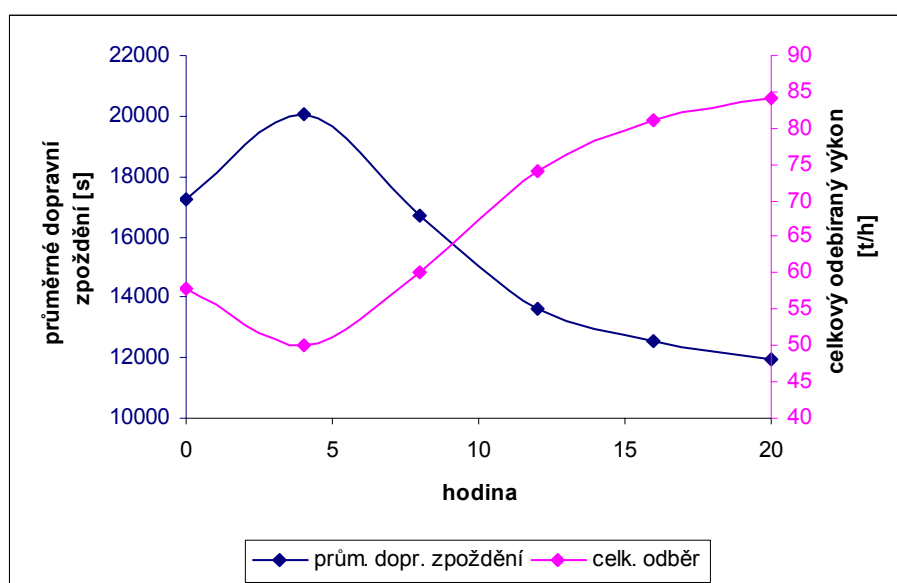
Tab. 3 Výsledky statických výpočtů pro den 27. 1. 2004



Obr. 70 Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 27. 1. 2004

pá. 29. 8. 2003					
hodina	T_{VENK} [°C]	E_{Td} [s]	poloha ref. bodu	var. koef. [%]	celk. odběr [t/h]
0	20	17229	větev 96	183.6	58
4	17.4	20072	větev 60	120.5	50
8	18.4	16703	větev 96	92.1	60
12	27	13606	větev 96	164	74
16	28.4	12550	větev 96	194	81
20	25.3	11973	větev 96	147.7	84

Tab. 4 Výsledky statických výpočtů pro den 29. 8. 2003



Obr. 71 Relace mezi průměrným dopravním zpožděním a celkovým odběrem sítě během dne 29. 8. 2003

Výsledky provedené analýzy je možno shrnout následovně:

- Hodnota průměrného dopravního zpoždění je závislá na ročním období, resp. na venkovní teplotě. Nejnižších hodnot dosahuje v zimních měsících, kdy se pohybuje okolo 3000s, tj. 50min,

zatímco v letních měsících je naopak průměrné dopravní zpoždění největší a činí cca 16000s, tj. 4,5 hodiny.

- Hodnota průměrného dopravního zpoždění je také závislá na celkovém odběru spotřebitelů, čím vyšší je celkový odběr tím nižší je průměrné dopravní zpoždění.
- Přestože se velikost průměrného dopravního zpoždění mění během roku i v rámci jednoho dne, poloha referenčního bodu se výrazně nemění a osciluje mezi větvemi č. 60 a 96.

8.2.6 Dynamické simulace s výpočtovým programem SIMTS

Vytvořený výpočtový program SIMTS je možné použít také k nejrůznějším dynamickým simulacím, jak popisuje kapitola 6.4. Je možné sledovat časové průběhy určité fyzikální veličiny ve vybraných místech horkovodní sítě, a to při nejrůznějších stavech, ve kterých se může celá soustava nacházet. Tyto simulace je možné provádět na generovaných datech, kdy chceme nasimulovat určitou hypotetickou situaci, která může v soustavě nastat. Ale simulace můžeme také provádět na historických datech (zpětně), abychom lépe poznali, jak se soustava v některých místech během času chová. Funkčnost těchto dynamických simulací byla ověřena právě na historických datech a může být demonstrována na následujících případech.

8.2.6.1 Dynamická simulace č.1 – tlakové poměry v okolí hydraulicky nejvzdálenějšího odběratele

Důležitou úlohou při provozu tepelných sítí je zajištění minimálního tlakového spádu u hydraulicky nejvzdálenějšího odběratele. Z tohoto pohledu bude jistě užitečné sledovat, jak se tlakové poměry v okolí tohoto kritického místa mění s časem. Pro

ukázku byla provedena dynamická simulace s využitím poskytnutých historických dat sledující hodnoty tlaku v uzlech 45, 46, 49, 50, 52 a 53. Uvedená simulace využívá informace o měřených hodinových odběrech výměňkových stanic; tam, kde nebyla tato data k dispozici byla k aproximování aktuálního odběru využita příslušná topná charakteristika. Simulace byla provedena pro časové období od 3.12.2003 0:00 do 5.12.2003 23:00, přičemž simulačním krokem byla jedna hodina.

Z dosažených výsledků na Obr. 72 lze vysledovat, že v uzlu 45 je po celou dobu nejnižší tlak z celé sítě a jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 1255 kPa – 1214 kPa. Zároveň lze pozorovat, že v nočních hodinách je tlak nejvyšší, zatímco během dne jsou hodnoty o něco nižší.

8.2.6.2 Dynamická simulace č.2 – průtokové poměry ve vybraných větvích

Cílem následující dynamické simulace je poznat, jak se mění průtok ve větví č. 57, která uzavírá zokruhování horkovodní sítě. Dá se předpokládat, že velikost a orientace toku touto větví se s měnícími odběry spotřebitelů může výrazně měnit. Obzvláště, když se v její bezprostřední blízkosti nachází jedna z největších výměňkových stanic – v uzlu č. 58. Vycházel jsem ze stejných vstupních dat jako v předchozím případě, tj. sledováno bylo období mezi 3.-5.12.2003. Vedle průtoků ve větví č. 57 zobrazují výsledky simulace na Obr. 73 také hodnoty průtoku ve větví č. 1.

Z uvedeného grafu je patrné, že průtok větví č. 57 je po celou dobu záporný vzhledem k původně zvolené orientaci větve, tj. horká voda proudí z uzlu č. 57 do uzlu č. 33. V některých časových okamžicích je však průtok velmi blízký nule a nelze proto vyloučit, že v určitých případech může nastat situace, kdy se smysl orientace toku

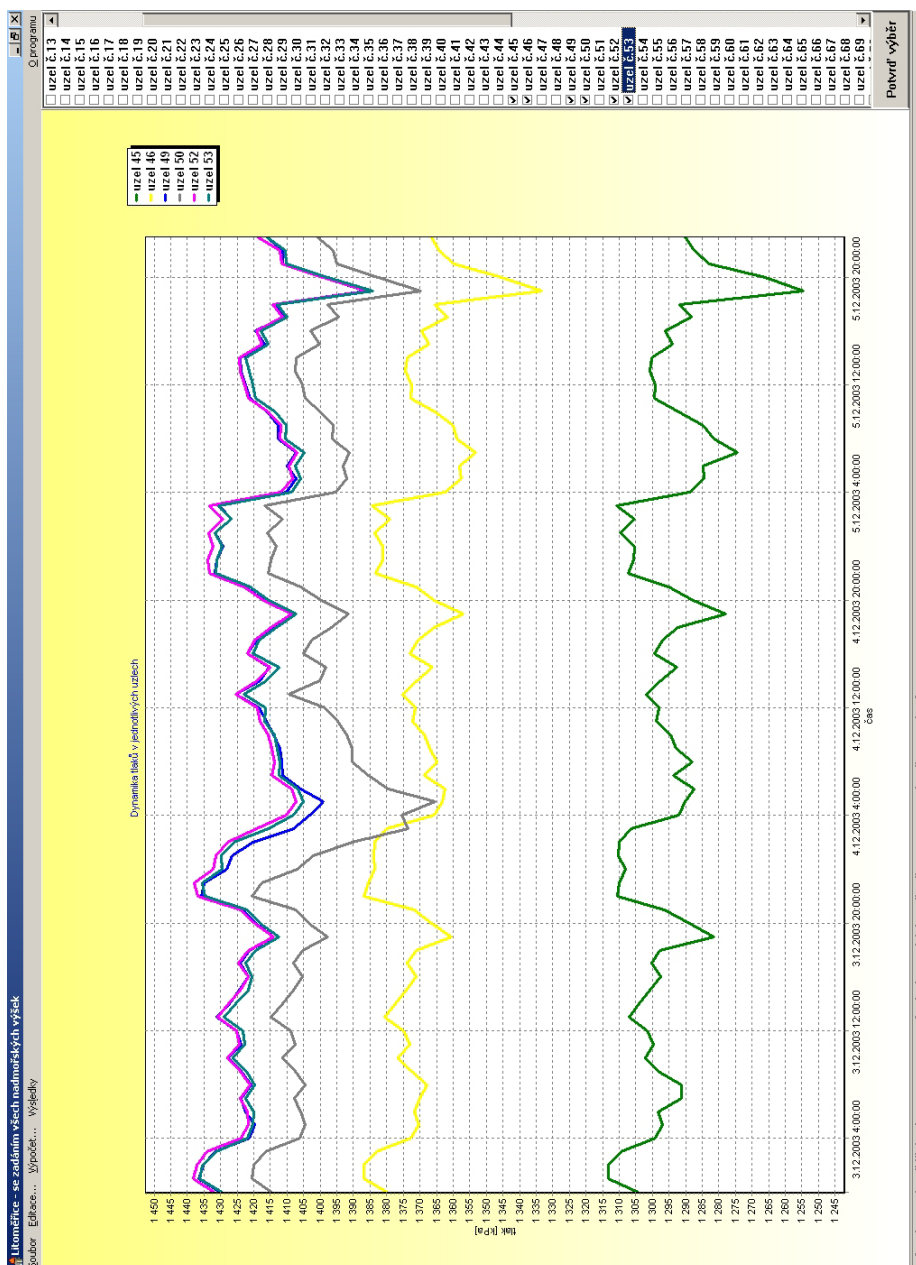
na jistou dobu změni. Průtok větví č. 1 odráží celkovou spotřebu sítě - nepřekvapuje tedy, že v nočních hodinách je průtok nízký a že během dne stoupá. To, že mezi 3. až 5. prosincem postupně klesala venkovní teplota, vysvětluje vzrůstající tendenci průtoku větví č. 1.

8.2.6.3 Dynamická simulace č.3 – teplotní poměry ve vybraných uzlech

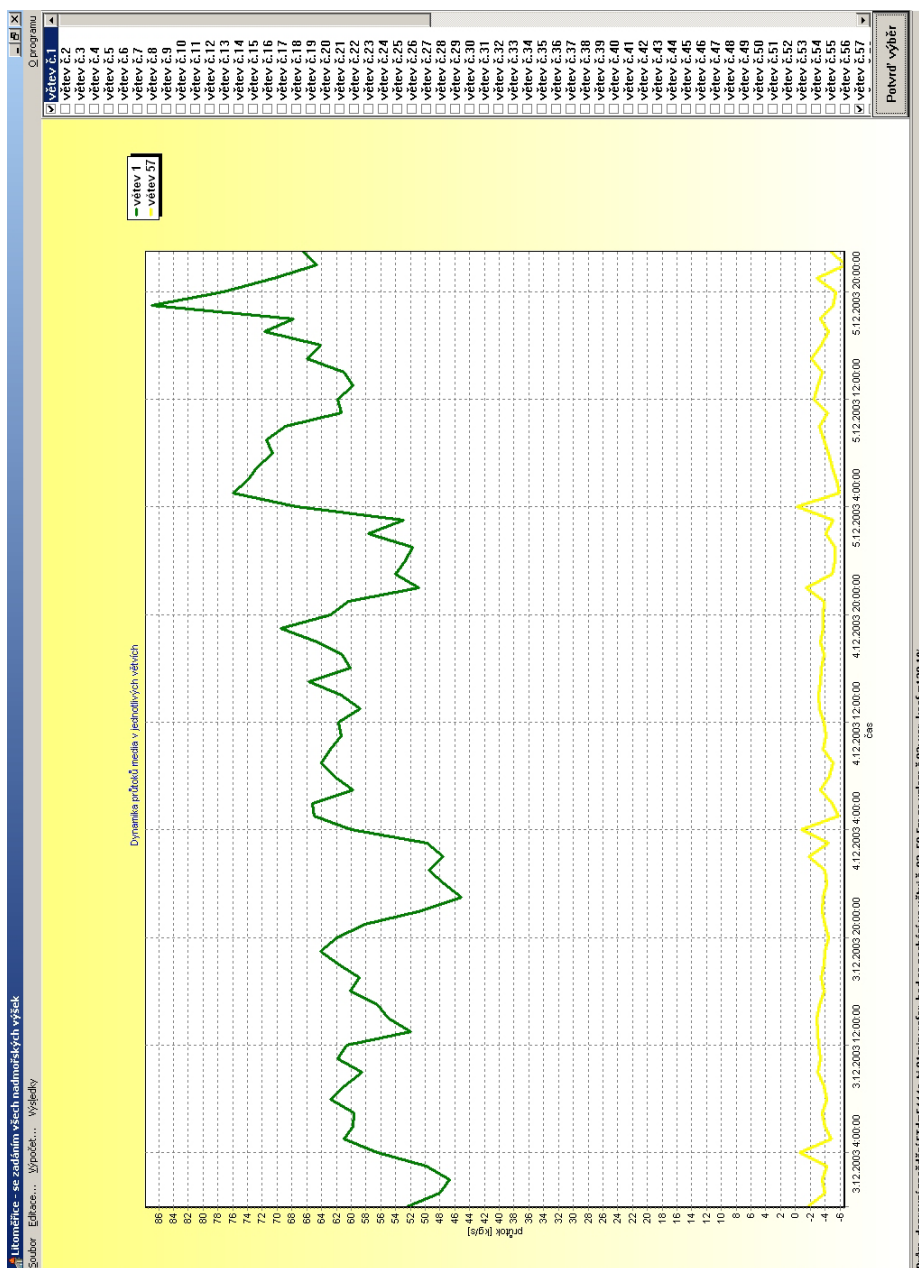
S pomocí výpočtového programu SIMTS byla provedena také dynamická simulace teplotních poměrů podél jednoho z paprsků tepelné sítě, zahrnující uzly č. 1, 2, 4, 6, 8, 9 a 11. Z výsledků na Obr. 74 je patrné, jak se teplota proudícího media se vzdáleností příslušného uzlu od zdroje postupně snižuje a zároveň jak se mění teplota v definovaných uzlech sítě s časem.

8.2.6.4 Dynamická simulace č.4 – průměrné dopravní zpoždění

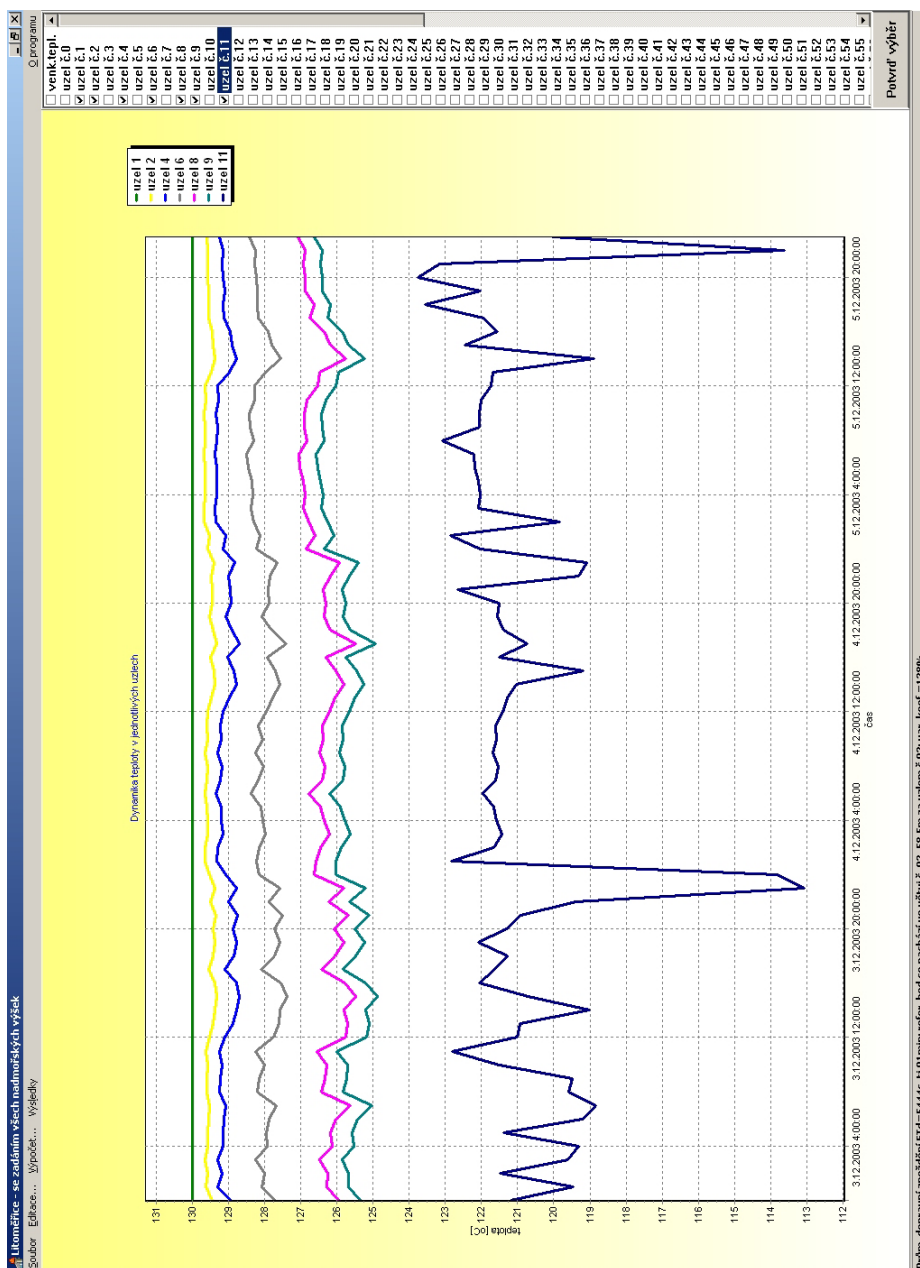
Další z možností (nikoliv však poslední), které výpočtový program SIMTS skýtá, je sledování měnící se hodnoty průměrného dopravního zpoždění během dne. Jak popisuje kapitola 8.2.5, hodnota průměrného dopravního zpoždění je závislá na celkovém odběru spotřebitelů a čím vyšší je celkový odběr tím nižší je průměrné dopravní zpoždění. Toto tvrzení dokládá i Obr. 75, který prezentuje výsledky výpočtu průměrného dopravního zpoždění v závislosti na čase. V nočních hodinách, kdy jsou odběry nižší je průměrné dopravní zpoždění vyšší a v denních hodinách, kdy jsou odběry vyšší je průměrné dopravní zpoždění nižší.



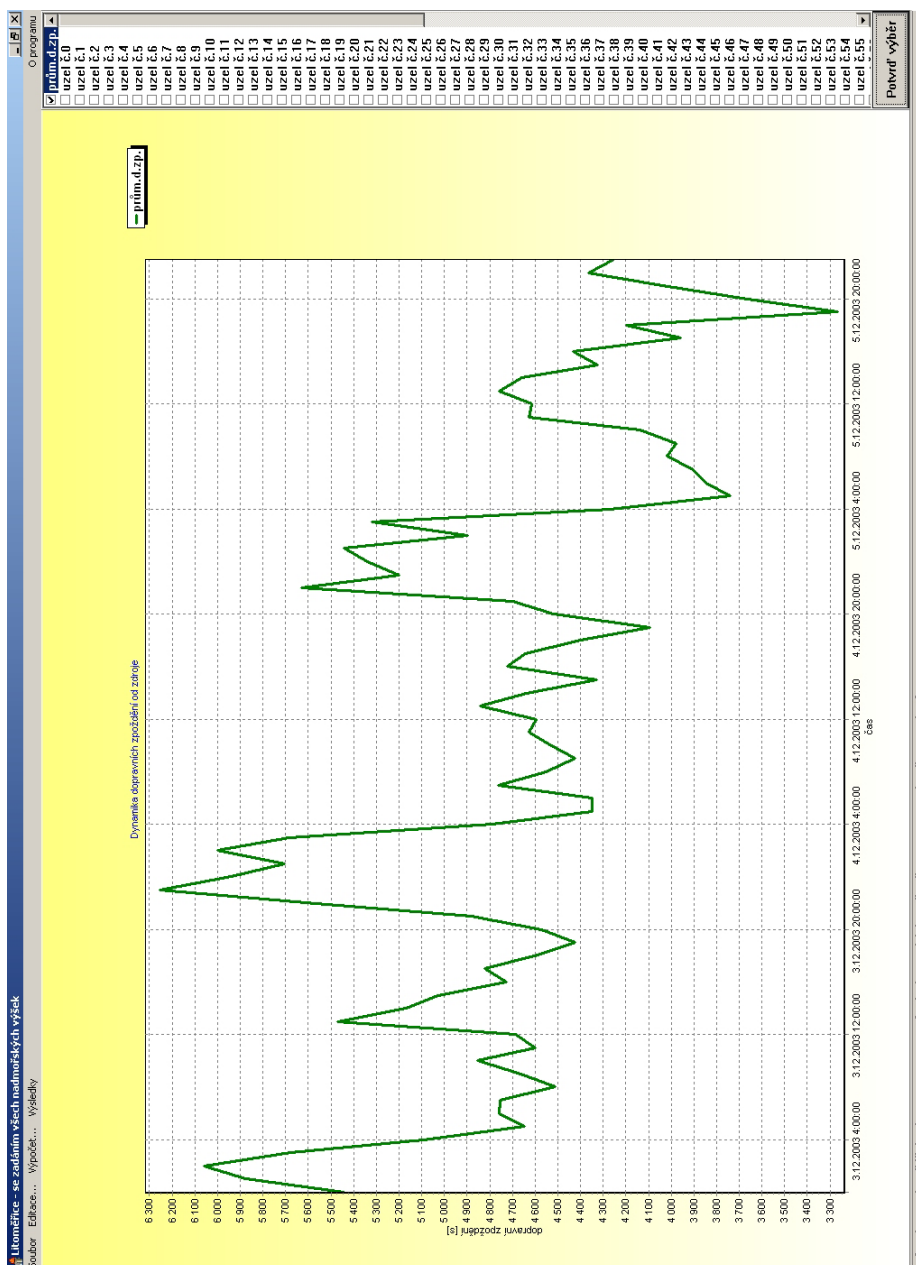
Obr. 72 Dynamická simulace tlakových poměrů v okolí hydraulicky nejvzdálenějšího odběratele pro dny 3. - 5. 12. 2003



Obr. 73 Dynamická simulace průtokových poměrů ve větvích č. 1 a 57
 pro dny 3. - 5. 12. 2003



Obr. 74 Dynamická simulace teplotních poměrů v uzlech č. 1, 2, 4, 6, 8, 9 a 11 pro dny 3. - 5. 12. 2003



Obr. 75 Dynamická simulace – velikost průměrného dopravního zpoždění pro dny 3. - 5. 12. 2003

9 ZHODNOCENÍ

Předmětem řešené problematiky bylo zabývat se analýzou hydraulických a tepelných poměrů v tepelných sítích soustav centralizovaného zásobování teplem. Hlavním výstupem práce je výpočtový program pro simulaci těchto poměrů, který může být aplikován na jakoukoliv obecně strukturovanou tepelnou síť. K výpočtům byla s výhodou použita metoda okruhových průtoků, vycházející z metody elektrických smyček používané v elektrotechnice. Elektrickému proudu zde odpovídá hmotnostní tok, napětí odpovídá tlak a elektrickému odporu odpovídá odpor hydraulický. Na základě zadaných parametrů potrubní sítě, definovaných výkonů zdrojů a odběrů spotřebitelů lze stanovit hodnoty tlaku a teploty v jednotlivých uzlech a dále průtoky, rychlosti, měrné objemy, hydraulické odpory, tepelné a tlakové ztráty v jednotlivých větvích sítě.

Program lze použít pro zokruhované a nezokruhované potrubní sítě s jedním nebo více zdroji tepelné energie, přičemž teplotonosným médiem může být pára nebo horká voda. U horkovodních sítí lze kromě statických simulací provádět i dynamické simulace, které umožňují sledovat časové průběhy určité fyzikální veličiny ve vybraných místech horkovodní sítě, a to při nejrůznějších stavech, ve kterých se může celá soustava nacházet. Přínosem je také možnost sledovat průměrná dopravní zpoždění v horkovodních sítích (vážený průměr dopravních zpoždění mezi zdrojem a spotřebitelem) a možnost určovat polohu referenčního bodu tepelné sítě. Na tento bod, ve kterém je dopravní zpoždění od zdroje rovno právě průměrnému dopravnímu zpoždění, můžeme prakticky pohlížet jako na soustředění všech odběratelů.

Vzniklý software má široké uplatnění v teplotárenské praxi, může se stát vhodným nástrojem především pro provozovatele z řad

energetických podniků a pro projektanty z teplotního oboru. Dá se využít například při:

- projektování sítí a připojování / odpojování spotřebitelů,
- sledování chování rozvodné tepelné sítě v různých obdobích roku,
- simulaci teplotních odezev při najíždění, odstavení a výpadcích ve zdrojích,
- analýze provozních stavů z historických dat,
- operativním řízením dodávky tepla horkovodem – nejdříve jako pomůcka operátora, v pokročilejší fázi jako součást řídicích systémů
- optimalizaci provozu teplotních soustav s více zdroji tepla, a jinde.

Funkčnost a účelnost využití vytvořeného softwaru byla ověřena výpočty na dvou konkrétních teplotních lokalitách. Jednalo se jednak o radiální rozvodnou horkovodní síť SCZT EBO - Leopoldov, Hlohovec na Slovensku a dále pak o zokruhovanou horkovodní síť SCZT Litoměřice.

Dosažené výsledky byly hojně prezentovány na národních i mezinárodních konferencích pořádaných v daném oboru. Soupis doposud publikovaných příspěvků je přiložen níže.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
- [2] BALÁTĚ, J. *Návrh automatizovaného systému řízení centralizovaného zásobování teplem*. Doktorská disertační práce. VUT v Brně, Brno, 1982.
- [3] BALÁTĚ, J. *Dynamika a regulace parních kotlů, Regulace a automatizace turbosoustrojí*. VUT v Brně, Brno, 1987.
- [4] BALÁTĚ, J. *Vybrané statě z automatického řízení*. VUT v Brně, Brno, 1996. (ISBN 80-214-0793-X)
- [5] BALÁTĚ, J., SYSALA, T. Algoritmus řízení tepelného výkonu v horkovodních systémech centralizovaného zásobování teplem. *Automatizace*, 1995, vol. 38, no.11, p. 435-438.
- [6] BALÁTĚ, J., SYSALA, T. The Way of District Heating Output Control by Means of Hot Water Piping. In: *Preprints: 5th IFAC Workshop on Algorithms and Architectures for Real-Time Control – AARTC '98Cancun*. 1998, Mexico.
- [7] BENONYSSON, A., BOHM, B., RAVN, H.F. Operational optimization of a district heating system. In: *Energy Convers. Mgmt.* 1995, vol. 36, No. 5, p. 297-314.
- [8] BOBÁL, V. *Identifikace systémů*. VUT v Brně, Brno, 1990. (ISBN 80-214-0125-7)
- [9] COMAKLI, K. , YÜKSEL, B. and COMAKLI, Ö. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network. In: *Applied Thermal Engineering*. 2004, vol. 24, Issue 7, p. 1009-1017.
- [10] CYHELSKÝ, L., KAHOUNOVÁ, J., HINDLS, R. *Elementární statistická analýza*. Praha: Management Press, Ringier ČR, 1999. ISBN 80-7261-003-1

- [11] ČERMÁK, J., PETERKA, V., ZÁVORKA, J. *Dynamika regulovaných soustav v tepelné energetice a chemii*. Praha: Academia, 1968.
- [12] ČSN EN ISO 12241 - *Tepelná izolace pro technická a technologická zařízení staveb, pravidla výpočtu*. Praha: 1998.
- [13] ENENKL, V. *Termomechanika*. VUT v Brně, Brno, 1983.
- [14] GRUNTA, M. *Analýza statických a dynamických vlastností zokruhovaných tepelných sítí*. Diplomová práce. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, 2002.
- [15] JŮZA, J. Rovnice termodynamických vlastností vody a vodní páry upravené pro samočinné počítače. *Strojírenství*, 1967, vol. 17, no. 3.
- [16] KADRNOŽKA, J., OCHRANA, L. *Teplárenství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. ISBN 80-7204-222-X.
- [17] KLÍMA, J., JIREŠOVÁ, A., IBLER, Z., LENCZ, I. *Ekonomika a řízení elektroenergetiky*. Praha: SNTL, 1984.
- [18] KOLOMAZNÍK, I. *Simulace statických a dynamických vlastností energetických sítí*. Doktorská disertační práce. VŠB – TU Ostrava, 1997.
- [19] KOUCKÝ, M. Spolehlivost stochastických sítí. In: *Zborník 4. medzinárodnej konferencie Riadenie v energetike*. Bratislava: Vydavateľství Slovenskej technickej univerzity v Bratislavě, 2000. (ISBN 80-227-1354-6)
- [20] KOUTNÁ, M. *Vyšetřování vlastností teplovodních sítí soustav centralizovaného zásobování teplem*. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, 1994.
- [21] KRATOCHVÍL, P., LIŠKA, J., URBÁNEK, M. *Sborník referátů na seminář Analogový model tepelných sítí EGÚ a programy pro výpočet tepelných sítí na číslicovém počítači*. Praha: VÚE Praha, 1976.

- [22] LAPČÍK, R. *Optimalizace kombinované výroby elektřiny a tepla*. Diplomová práce. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, 2003.
- [23] LARSEN, H.V., BOHM, B., WIGBELS, M. A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks. In: *Energy Conversion and Management*. 2004, vol. 45, p. 1119-1139.
- [24] LARSEN, H.V., PÁLSSON, H., BOHM, B., RAVN, H.F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. In: *Energy Conversion and Management*. 2002, vol. 43, p. 995-1019.
- [25] MACKENZIE – KENNEDY, C. *District Heating; Thermal Generation and Distribution*. Oxford: Pergamon Press, 1979. ISBN 0080227112.
- [26] MACHÁČEK, R. *Využití metod teorie grafů v optimalizaci energetických sítí*. Doktorská disertační práce. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2000.
- [27] MICHALEC, P., MEREŠ, B. *Analýza teplotných a hydraulických pomerov SCZT Leopoldov, Hlohovec při paralelnej spolupráci s SCZT Trnava*. STU v Bratislavě, Katedra tepelnej energetiky, Bratislava, 1998.
- [28] MÍKA, V. *Základy chemického inženýrství*. Praha: SNTL, 1977.
- [29] MÍKA, V. a kol. *Sbírka příkladů z chemického inženýrství*. Praha: SNTL, 1978.
- [30] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987.
- [31] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Montanex, a.s., 1999, ISBN 80-7225-030-2.
- [32] POLESNÝ, B. *Teplárenství a potrubní sítě*. VUT v Brně, Brno, 1989.
- [33] POLESNÝ, B. *Termodynamická data pro výpočet tepelných a jaderných energetických zařízení*. VUT v Brně, Brno, 1990.
- [34] PROCHÁZKA, A. *Proudění tekutin*. Praha: SNTL, 1987.

- [35] RIORDAN, R., M. *Vytváříme relační databázové aplikace*. Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-7226-360-9.
- [36] SAZIMA, M., KMONÍČEK, V. *Teplo*. Praha: SNTL, 1989.
- [37] SEDLÁČEK, J., SLABA, J. *Delphi v kostce*. Praha: Ben - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-12-0.
- [38] SVOBODA, L., VONEŠ, P., KONŠAL, T., MAREŠ, M. *1001 tipů a triků pro Delphi*. Praha: Computer Press, 2001. ISBN 80-7226-529-6.
- [39] VLACH, J. *Teplárenství*. Praha: SNTL, 1972.
- [40] WERNSTEDT, F., DAVIDSSON, P., JOHANSSON, Ch. Simulation of District Heating Systems for evaluation of Real-Time Control Strategies. In: *First European Simulation and Modelling Conference*. Naples, Italy, 2003.
- [41] WIGBELS, M., ALTHAUS, W., LUCHT, M. Nonlinear Optimisation in CHP-Applications. *Optimization Online*, 2002, no. 11.
- [42] Výzkumná zpráva č. UTB-FT-IIT/2003/1: *Způsob řízení tepelného výkonu horkovodu za současného působení kvalitativní i kvantitativní části řízení*. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická, 2003.

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ

- (1) BALÁTĚ, J., PRINC, M. Statické řešení hydraulických poměrů zokruhovaných tepelných sítí. In: *3. Mezinárodní konference New Trends of Automation in Energetic Processes '98*. Zlín: VUT v Brně, FT ve Zlíně, 1998.
- (2) PRINC, M. Statická analýza hydraulických poměrů zokruhovaných tepelných sítí. In: *Sborník anotací „Studentská tvůrčí a odborná činnost STOČ'99“*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999, p.17.
- (3) BALÁTĚ, J., PRINC, M. Analýza hydraulických a tepelných poměrů v zokruhovaných tepelných sítích. In: *Proceedings of XXIII. ASR Seminary '99 „Instruments and Control“*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999, p.7. (ISBN 80-7078-666-3)
- (4) BALÁTĚ, J., PRINC, M. Analysis of Hydraulic and Heat Relations in Circle Heat Supply Networks. In: *Proceedings of the 10th International DAAAM Symposium INTELLIGENT MANUFACTURING & AUTOMATION: PAST-PRESENT-FUTURE*. Vienna: Vienna University of Technology, 1999. (ISBN 3-901509-10-0)
- (5) BALÁTĚ, J., PRINC, M. Solution of Static Properties in Circle Heat Supply Networks. In: *Proceedings of the world – wide workshop DISTRICT HEATING CONTROL '99*. Zlín: Academia Centrum Zlín, 1999. (ISBN 80-214-1461-8)
- (6) PRINC, M., BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B. Řešení hydraulických a tepelných poměrů tepelných sítí. In: *Sborník příspěvků 4. mezinárodní vědecko – technické konference ŘÍZENÍ PROCESŮ 2000*. Kouty nad Desnou: 2000, p. 92. (ISBN 80-7194-271-5)
- (7) PRINC, M., BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B. Řešení hydraulických a tepelných vlastností tepelných sítí. In: *Zborník 4. medzinárodnej konferencie Riadenie v energetike*. Bratislava: Vydavateľství

- Slovenské technické univerzity v Bratislavě, 2000, p. 302-307. (ISBN 80-227-1354-6)
- (8) PRINC, M., BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B. Řešení hydraulických a tepelných vlastností tepelných sítí. In: *Proceedings of the 2nd DAAAM Workshop*. Košice: DAAAM International Vienna, 2000, p. 67-68. (ISBN 3-901509-18-6)
- (9) PRINC, M., BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B. Solving of Hydraulic and Heat Relations of Heat Networks. In: *Proceedings of International Carpathian Control Conference*. Krynica: AGH Krakov, 2001, p.597-602. (ISBN 83-91340-07-4)
- (10) BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B., PRINC, M. Behaviour Analysis and Control of Heat Networks Economical Operation. In: *Summaries Volume of the 13th International Conference on Process Control '01*. Štrbské Pleso: Slovak University of Technology in Bratislava, 2001, p.200. (ISBN 80-227-1542-5)
- (11) BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B., PRINC, M., PHAN, T.D. Economical Operation of District Heating Systems. In: *Annals of DAAAM for 2001 & Proceedings of the 12th International DAAAM Symposium*. Jena: DAAAM International Vienna, 2001, p. 15-16. (ISBN 3-901509-19-4)
- (12) PRINC, M., KAJAN, S., BALÁTĚ, J. Calculation of Hydraulic and Heat Relations in Heat Networks; Accession to the Solution in Real Locality. In: *Proceedings of Annotations of the 5th International Conference Control of Power & Heating Systems 2002*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2002, p.156-157. (ISBN 80-7318-074-X)
- (13) STRAKOŠ, V., BALÁTĚ, J., KOLOMAZNÍK, I., PRINC, M. Solution of Operating Situation in Heat Distribution. In: *Proceedings of Annotations of the 5th International Conference Control of Power & Heating Systems 2002*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2002, p.176-177. (ISBN 80-7318-074-X)
- (14) PRINC, M., BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B. Analysis of Hydraulic and Heat Relations in Heat Networks; Calculation in Real Locality.

- In: *Proceedings of 3rd International Carpathian Control Conference*. Malenovice: VŠB-Technical University of Ostrava, 2002, p. 775-780. (ISBN 80-248-0089-6)
- (15) BALÁTĚ, J., PRINC, M., CHRAMCOV, B. Analýza a syntéza řízení horkovodní sítě; návrh pro konkrétní lokalitu. In: *Zborník abstraktov medzinárodnej konferencie Kybernetika a informatika*. Trebišov: Vydavateľstvo STU v Bratislavě, 2002, p. 109-110. (ISBN 80-227-1749-5)
- (16) BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B., PRINC, M., HAMPEL, R. Conception of Design of District Heating Control. In: *Beitragsmanuskripte der XXXIV. Kraftwerkstechnisches Kolloquium*. Dresden: Technische Universität Dresden, 2002, p. 185-194.
- (17) PRINC, M., KAJAN, S., BALÁTĚ, J. Výpočet hydraulických a tepelných poměrů v rozvodných tepelných sítích; přiblížení na řešení v konkrétní lokalitě. *AT&P Journal*, 2003, no. 1/2003, p. 64-66. (ISSN 1335-2237)
- (18) BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B., PRINC, M. Strategy of Control of Extensive District Heating Systems. In: *Proceedings of the IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control 2003*. Seoul: KIEE, 2003, vol. II, p. 762-767.
- (19) BALÁTĚ, J., CHRAMCOV, B., PRINC, M. Strategy and Philosophy of District Heating Systems Control. In: *Abstracts Volume of the 2nd IFAC Conference Control Systems Design '03*. Bratislava: IFAC, 2003, pp. 41.
- (20) PRINC, M., BALÁTĚ, J., JENÍK, P., KOPA, J., CHRAMCOV, B. Využití analýzy hydraulických a teplotních poměrů v horkovodních sítích pro řízení dodávky tepla. In: *Teplárenské dny 2004*. Pardubice: TSCŘ, 2004.

Výzkumné zprávy:

pro STU FEI Bratislava:

(21) UTB-FT-IIT/2002/1 *Výpočet hydraulických a teplotních poměrů pro soustavu centralizovaného zásobování teplem EBO - Leopoldov, Hlohovec, březen 2002*

pro United Energy, Most - Komořany, a.s.:

(22) UTB-FT-IIT/2002/2 *Výpočet hydraulických a teplotních poměrů pro SCZT Litoměřice, prosinec 2002*

(23) UTB-FT-IIT/2002/2 – dod. č.1 : *Výpočet hydraulických a teplotních poměrů pro SCZT Litoměřice, duben 2003*

pro GAČR:

(24) UTB-FT-IIT/2003/2: *Analýza statických a dynamických vlastností tepelných sítí a její využití pro řízení teplárenské soustavy, prosinec 2003*

CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Michal Princ
Datum narození: 25. července 1976, Uherské Hradiště
Adresa: Zašová 207, 756 51, okr. Vsetín
E-mail: michal.princ@freescale.com
Rodinný stav: ženatý

Vzdělání a kvalifikace:

- 1982 - 1990 základní škola v Uherském Hradišti
- 1990 - 1994 gymnázium v Uherském Hradišti, maturitní zkouška s vyznamenáním
- 1994 - 1999 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, obor Automatizace a řídicí technika ve spotřebním průmyslu (Ing.), diplomová práce: Analýza statických a dynamických vlastností zokruhovaných tepelných sítí "
- 1999 - 2002 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Institut informačních technologií, prezenční doktorské studium v oboru Technická kybernetika, od r. 2004 studium v kombinované formě
- 2002 - 2004 civilní služba, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- 2004 - dosud Freescale Polovodiče, s.r.o. Rožnov pod Radhoštěm – System Application Engineer

Jazykové znalosti: angličtina – aktivní znalost
němčina – základní znalost