

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## MATEMATICKÝ MODEL UNIVERZÁLNÍ STANICE V LABORATOŘI VUT FSI OFI.

MATHEMATICAL MODEL OF CIRCUIT IN LABORATORY VUT FSI OFI.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ KLAPAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.

BRNO 2008

## Abstrakt

Cílem diplomové práce je návrh a verifikace matematického modelu univerzální zkušební stanice pro měření turbín v laboratoři Odboru fluidního inženýrství FSI VUT v Brně. Na univerzální zkušební stanici bylo provedeno měření a s pomocí dat vycházejících z tohoto experimentu byly modelovány tlakové a průtokové charakteristiky univerzální stanice. Uvažovány byly také regulační možnosti, zejména pomocí regulačních obtoků.

Takto zpracované charakteristiky by měly v budoucnu sloužit pro předběžný návrh zapojení zkušební stanice při měření modelů turbín.

## Abstract

This diploma thesis deals with project and experimental verification of mathematical model of experimental circuit for measuring turbine in laboratory of Kaplan Department of Fluids Engineering FME BUT in Brno. Pressure and flow characteristics were modeled based on data measured on general-purpose experimental circuit. Possibilities of the circuit control, mainly by by-pass, were also taken into account.

Characteristic curves should serve for preliminary design of the test circuit set up for the turbine model measurements.

### Klíčová slova

matematický model, univerzální zkušební stanice, měření modelů turbín, tlakové a průtokové charakteristiky

### Klíčová slova - anglicky

mathematical model, general-purpose experimental circuit, turbine model measurements, pressure and flow characteristics

## Bibliografická citace

KLAPAL, T. *Matematický model univerzální stanice v laboratoři VUT FSI OFI.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých doposud získaných znalostí, odborných konzultací, doporučené literatury a ostatních zdrojů, které mi byly poskytnuty a které jsou uvedeny v závěru práce.

V Brně dne 23.5.2008

.....

Tomáš Klapal

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval týmu odborníků, kteří svými zkušenostmi a odbornými znalostmi byli nápomocni při realizaci mé diplomové práce, především vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za dostatek trpělivosti, jeho rady a postřehy při řešení daného problému, dále pak pracovníkům zkušební laboratoře fluidního inženýrství Ing. Procházkovi, panu Kusému a panu Bauerovi za zprovoznění zkušební tratě a praktické rady při realizaci.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
1.1 POPIS ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	12
1.2 SOUČASNÝ STAV .....	12
1.3 DEFINICE A POJMY .....	13
1.4 ZÁKLADNÍ ROVNICE.....	13
1.4.1 Rovnice kontinuity .....	13
1.4.2 Bernoulliho rovnice .....	14
<b>2 TEORETICKÝ MODEL .....</b>	<b>16</b>
2.1 NÁVRH MODELU .....	16
2.2 STANOVENÍ ODPOROVÝCH SOUČINITELŮ .....	17
2.2.1 Délkové ztráty .....	18
2.2.2 Místní ztráty .....	18
2.2.3 Ekvivalentní délky potrubí pro místní ztráty.....	19
2.3 STANOVENÍ VÝPOČETNÍHO ALGORITMU.....	19
2.4 VÝSLEDNÉ INFORMACE Z TEORETICKÉHO MODELU .....	21
<b>3 UNIVERZÁLNÍ MĚŘÍCÍ STANICE – 3D MODEL.....</b>	<b>23</b>
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>26</b>
4.1 SCHÉMA MĚŘENÉ TRATĚ .....	26
4.2 POPIS MĚŘENÉ TRATĚ .....	27
4.3 MĚŘENÉ VELIČINY .....	27
4.4 POUŽITÁ MĚŘÍCÍ TECHNIKA .....	28
4.5 POSTUP MĚŘENÍ .....	30
<b>5 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>	<b>32</b>
5.1 URČENÍ VÝŠEK TLAKOVÝCH ODBĚRŮ .....	32
5.2 CHARAKTERISTIKA NÍZKOTLAKÉHO ČERPADLA .....	32
5.3 URČENÍ ODPOROVÝCH SOUČINITELŮ HLAVNÍHO POTRUBÍ.....	33
5.4 ODPOROVÝ SOUČINITEL MODELU .....	34
5.5 ODPOROVÉ SOUČINITELE REGULAČNÍCH OBTOKŮ.....	36
5.5.1 Stanovení hodnot průtoku regulačními obtoky.....	36
5.5.2 Výpočet odporových součinitelů regulačních obtoků.....	38
5.6 PARAMETRY TRATĚ PŘI PROVOZU NÍZKOTLAKÉHO ČERPADLA.....	39
<b>6 PROVOZ VYSOKOTLAKÝCH ČERPADEL.....</b>	<b>42</b>
6.1 ALGORITMUS VÝPOČTU .....	42
6.2 HODNOTY POUŽITÉ PŘI VÝPOČTU.....	44
6.2.1 Specifikace zkušební tratě.....	44





6.2.2	<i>Specifikace vysokotlakých čerpadel</i> .....	44
6.3	VÝSLEDNÉ CHARAKTERISTIKY VYSOKOTLAKÝCH ČERPATEL .....	46
<b>7</b>	<b>ZÁVĚRY A SHRUTÍ</b> .....	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ</b> .....	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>52</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>53</b>

# 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá stanovením maximálních dosažitelných parametrů na měřicí univerzální stanici v laboratoři VUT FSI OFI pomocí matematického modelu. Matematický model zahrnuje různé paralelní zapojení čerpadel a obtoků. Po ověření experimentálním měřením by měl tento model sloužit pro prvotní návrh zapojení měřicí tratě pro zkoušku turbín a pro stanovení možnosti měření dané turbíny.

## 1.1 Popis řešené problematiky

Univerzální měřicí stanici v suterénu laboratoře můžeme považovat za větevnatou, okruhovou potrubní síť. V síti jsou zapojena paralelně tři čerpadla, z nichž jedno je nízkotlaké a dvě jsou vysokotlaká. Vysokotlaká čerpadla jsou identická, ale u jednoho je stočené oběžné kolo. Spád a průtok tedy můžeme měnit postupným zapínáním čerpadel. Dále je možná regulace otevíráním obtoků, které jsou napojeny na výtlačnou větev nízkotlakého čerpadla a zaústěny do hlavní sací trouby. Potrubí je poté vyvedeno do prostoru laboratoře, kde je napojeno na příslušné potrubí zkoušeného modelu, který je zaústěn do kotle. Z kotle je opět zavedeno do suterénu do sací trouby. Ke kotli je připojena vývěva pro zkoušky kavitace. K sací troubě je připojena zásobní nádrž, jejíž přívod je při průběhu zkoušky uzavřen. Materiálem potrubí je ocel a nosičem energie výhradně voda.

Přívodní potrubí modelu a zaústění do kotle je pro každý model různé, proto je hlavním úkolem stanovení charakteristik (dosažitelného tlakového spádu a průtoku) mezi kolenem, které je umístěno před přívodním potrubím na model, a kotlem.

## 1.2 Současný stav

V současné době neexistuje žádné relativně přesné teoretické přiblížení, podle kterého by bylo možno předem určit zapojení a nastavení tratě podle požadovaných parametrů modelu. Nastavení tedy probíhá pouze podle zkušeností obsluhy. Výsledky mé práce by proto měly velmi zjednodušit a zkrátit přípravu zkušební tratě pro měření modelu.

### 1.3 Definice a pojmy

Při výpočtu proudění v potrubních systémech zavádíme pojmy a definice, které nám pomáhají zjednodušit výpočet nebo jsou přímo definovány pouze pro výpočet potrubí:

**Skutečná kapalina** – stlačitelná kapalina, jejíž viskozitu nelze zanedbat. Kromě tlaku může být namáhána i smykem. Někdy se i u skutečné kapaliny její stlačitelnost zanedbává, což bude využito i v této práci bez ztráty přesnosti.

**Proudová trubice** – trubice vytvořená všemi proudnicemi, které procházejí plochou uzavřenou danou křivkou.

**Objemový průtok** (dále zkráceně jen průtok) – objemové množství tekutiny, které proteče daným průřezem za jednotku času. Udává se zpravidla v litrech nebo metrech kubických za sekundu, minutu nebo hodinu. Je dán součinem průtočné průřezové plochy a střední průřezové rychlosti.

**Rychlostní profil** – je dán čarou rozdělení skutečných rychlostí v určité, zpravidla osou potrubí proložené, rovině. Čára prochází koncovými body vektorů rychlosti, vynesných ve všech bodech průtočného průřezu. Při proudění skutečných kapalin je rychlost částic u stěn vlivem viskozity nulová. U vyvinutého proudění v přímém potrubí bez příčné cirkulace je maximální rychlost v ose potrubí.

**Průtočný průřez** – plocha příčného řezu potrubí, kterou tekutina zaujímá nebo může zaujmout. Příčným řezem se rozumí řez rovinou kolmou na směr střední rychlosti příslušného úseku.

**Střední průřezová (profilová) rychlost** – charakteristická rychlost pro daný průřez, vyjádřená podílem průtoku a plochy průtočného průřezu. Zavedením tohoto pojmu považujeme potrubí nebo trubici za jediné proudové vlákno, ve kterém proudí kapalina v celém průřezu konstantní rychlostí.

### 1.4 Základní rovnice

#### 1.4.1 Rovnice kontinuity

Jednou ze základních rovnic pro výpočet rozvětvených potrubí je rovnice kontinuity, která má pro neustálené proudění stlačitelné tekutiny v proudové trubici tvar:

$$\frac{\partial(\rho v S)}{\partial l} + S \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

kde  $\rho$  je hustota,  $v$  – rychlost,  $S$  – průřezová plocha,  $l$  – délka oblouku proudnice,  $t$  – čas. Pro ustálené proudění je parciální derivace hustoty podle času rovna nule, z toho tedy vyplývá:

$$\rho v S = konst \quad (1.2)$$

což je rovnice kontinuity pro ustálené proudění stlačitelné tekutiny v proudové trubici. Pro nestlačitelnou tekutinu platí, že hustota  $\rho$  je konstantní, takže rovnice kontinuity je pak ve tvaru:

$$v S = konst \quad (1.3)$$

Ustálené proudění nestlačitelné kapaliny trubici má objemový průtok stálý. Můžeme tedy psát:

$$v_0 S_0 = v_1 S_1 = v_2 S_2 = \dots = v_n S_n \quad (1.4)$$

neboli

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (1.5)$$

### 1.4.2 Bernoulliho rovnice

Energetický tvar Bernoulliho rovnice pro ustálený pohyb má tvar:

$$gz + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (1.6)$$

kde  $g$  je gravitační zrychlení,  $z$  – pořadnice bodu proudnice od libovolné vodorovné srovnávací roviny,  $p$  – měrný tlak,  $\rho$  – hustota,  $v$  – rychlost. Tento tvar značí, že za ustáleného, konzervativního, izotermického pohybu neviskózní nestlačitelné kapaliny, vztaženo na jednotku hmotnosti, je součet energie polohy, napětí a pohybu podél celé proudnice stálý.

Chceme-li použít Bernoulliho rovnice nejen pro proudovou trubici, ale též pro potrubí, v jehož průřezech se rychlost mění od bodu k bodu, musíme rychlostní výšku  $v^2/2g$  v daném průřezu nahradit výrazem  $\alpha_{kin}v_{stř}^2/2g$ , kde  $\alpha_{kin}$  je Coriolisovo číslo, které závisí na geometrickém tvaru průtočného průřezu a na rozdělení rychlostí v průřezu, a  $v_{stř}$  je střední průřezová rychlost.

Při obvyklém rozdělení rychlostí v potrubích kruhového průřezu má Coriolisovo číslo tento rozsah hodnot:  $1,02 \leq \alpha_{kin} \leq 1,12$ . Při rychlostech do 3 m/s se bere pro hrubý výpočet  $\alpha = 1$ , protože rychlostní výška je sama o sobě malá, takže její oprava o 2 až 12 % je zanedbatelná. Bernoulliho rovnici tedy můžeme psát ve tvaru

$$gz + \frac{p}{\rho} + \alpha_{kin} \frac{v^2}{2} = konst \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (1.7)$$

Při proudění skutečné nestlačitelné kapaliny vznikají ztráty třením a zvláštní místní ztráty, takže celkový součet měrné energie v uvažovaném průřezu  $Y$  a ztrátové měrné energie  $Y_z$  mezi uvažovaným a počátečním průřezem se rovná skutečné měrné energii v počátečním průřezu  $Y_0$

$$Y_0 = Y + Y_z \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (1.8)$$

Platí tedy tzv. rozšířená Bernoulliho rovnice:

$$gz_0 + \frac{p_0}{\rho} + \alpha_{kin} \frac{v_0^2}{2} = gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \alpha_{kin} \frac{v_1^2}{2} + \sum_0^1 Y_z = gz_n + \frac{p_n}{\rho} + \alpha_{kin} \frac{v_n^2}{2} + \sum_0^n Y_z$$

neboli

$$Y_0 = Y_1 + Y_{z,01} = Y_2 + Y_{z,02} = \dots \quad (1.9)$$

## 2 Teoretický model

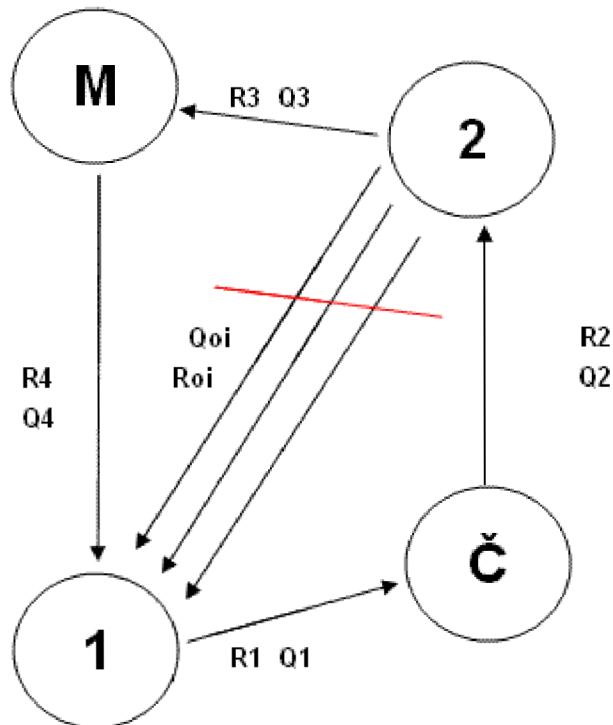
První částí úkolu v rámci této diplomové práce bylo stanovení teoretického modelu univerzální měřicí tratě. V tomto modelu by se mělo vycházet pouze ze znalosti charakteristiky čerpadla (ve tvaru  $Y = A Q^2 + B Q + C$ ) a geometrické znalosti potrubní tratě.

### 2.1 Návrh modelu

Pro tlakovou a průtokovou analýzu potrubní sítě v laboratoři byl zvolen systém orientovaných potrubních úseků konstantních vlastností a uzlů, doplněných o soubor doplňujících podmínek ve vnitřních a okrajových uzlech a na okrajích úseků. Orientovaný potrubní úsek tu splňuje podmínku:  $\Delta p = \rho R Q^2$ , kde  $R$  je tzv. odporový součinitel úseku. Uzel zde má nulový rozměr a pouze představuje podmínku spjitosti:  $\Sigma Q = 0$ .

Pro případ měřicí tratě byl zvolen model se čtyřmi uzly (viz obr. 2.1), které představují:

- **(1)** ... sání čerpadla, které je reprezentováno velkou sací troubou (DN600); místo zaústění regulačních obtoků
- **(Č)** ... čerpadlo reprezentující závislost  $Y(Q)$ , která je v zájmové části dobře aproximovatelná kvadratickým polynomem
- **(2)** ... výtlač čerpadla; místo napojení regulačních obtoků
- **(M)** ... model, představující měnitelný místní odpor



Obr. (2.1) Schéma teoretického modelu

Na obrázku (2.1) je též naznačeno, bez ohledu na měřítko, vertikální umístění jednotlivých uzlů.

## 2.2 Stanovení odporových součinitelů

Z geometrické znalosti potrubí je možné pomocí číselných tabulek a grafů uvedených v různé praktické literatuře vypočítat ztrátovou měrnou energii všech větví.

V potrubí se vyskytují dva druhy ztrát:

- délkové ztráty neboli ztráty třením
- místní ztráty

### 2.2.1 Délkové ztráty

Délkové ztráty vznikají v dlouhém přímém válcovém potrubí, v němž ztráta energie závisí pouze na charakteru povrchu stěn, rozměrech a tvaru průřezu potrubí, fyzikálních vlastnostech tekutiny a na průtoku. Pro jejich výpočet se používá tento vztah:

$$Y_z = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2.1)$$

kde  $Y_z$  je ztrátová měrná energie,  $\lambda$  – třecí součinitel,  $l$  – délka potrubního úseku,  $D$  - průměr potrubního úseku,  $v$  – střední průřezová rychlost.

Dále potom platí:

$$Y_z = \lambda \frac{l}{D} \frac{Q^2}{2 \cdot S^2} = R \cdot Q^2 \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2.2)$$

Z výrazu (2.2) tedy dále vyplývá konečný vztah pro stanovení odporového součinitele pro délkové ztráty:

$$R = \frac{\lambda \cdot l}{2 \cdot D \cdot S^2} = \frac{\lambda \cdot l}{2 \cdot D \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)^2} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot l}{\pi^2 \cdot D^5} \quad [m^{-4}] \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Místní ztráty

Místní ztráty vznikají většinou změnou směru proudu kapaliny nebo změnou průřezu potrubí ve tvarovkách, kolenech, odbočkách, uzávěrech, průtokoměrech, ventilech a jiných armaturách. Vlivem rozšíření, zúžení nebo zakřivení se mění rozdělení rychlosti a turbulence, tím vznikají úplavy, vírové stezky a oblasti nebo jednotlivé víry. Víry se odtrhují a jsou unášeny proudem. Vlivem viskozity jsou však utlumeny, čímž jejich kinetická energie degraduje v teplo. Takto vznikají dodatečné ztráty, které nazýváme místními.

Za místní odpor způsobující místní ztrátu můžeme považovat takovou část potrubí, která způsobuje větší ztrátu energie než stejně dlouhý úsek přímého potrubí za stejných podmínek.

Pro jejich výpočet užíváme tento vztah:

$$Y_{z,M} = \xi \frac{v^2}{2} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2.4)$$



kde  $Y_{z,M}$  je ztráta měrné energie v místním odporu,  $\xi$  – ztrátový součinitel místního odporu,  $v$  – střední průřezová rychlost. Pokud vyjádříme rychlost pomocí průtoku  $Q$ , dostaneme vztah:

$$Y_{z,M} = \xi \frac{Q^2}{2 \cdot S^2} = R \cdot Q^2 \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2.5)$$

Z výrazu (2.5) tedy dále vyplývá konečný vztah pro stanovení odporového součinitele pro místní ztráty:

$$R = \frac{\xi}{2 \cdot S^2} = \frac{\xi}{2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)^2} = \frac{8 \cdot \xi}{\pi^2 \cdot D^4} [m^{-4}] \quad (2.6)$$

### 2.2.3 Ekvivalentní délky potrubí pro místní ztráty

Pro výpočet potrubí zkušební tratě byla zvolena metoda tzv. náhradních neboli ekvivalentních délek. V tom případě se armatura nahrazuje přímým potrubím o takové délce, v němž by vznikla stejná hydraulická ztráta jako v nahrazené armatuře. Metoda ekvivalentních délek byla zvolena pro možnost jednoduchého výpočtu a vztah pro její stanovení je:

$$l_e = \frac{\xi}{\lambda} D [m] \quad (2.7)$$

V našem případě byly ekvivalentní délky stanoveny z grafu, viz literatura [2]

## 2.3 Stanovení výpočetního algoritmu

Jak již z obrázku (2.1) vyplývá, potrubní síť se v našem případě skládá ze čtyř uzlů a sedmi orientovaných potrubních úseků.

Hodnoty odporových součinitelů jednotlivých orientovaných potrubních úseků zobrazuje tabulka (2.1). Označení jednotlivých odporových součinitelů vyplývá z obrázku (2.1).

Odporový součinitel	Hodnota [m <sup>-4</sup> ]	Popis
R <sub>1</sub> [m <sup>-4</sup> ]	0	úsek od sání (zaústění obtoků) k čerpadlu
R <sub>2</sub> [m <sup>-4</sup> ]	0	úsek od čerpadla k výtlaku (napojení obtoků)
R <sub>3</sub> [m <sup>-4</sup> ]	250	úsek od výtlaku k modelu
R <sub>4</sub> [m <sup>-4</sup> ]	550	úsek od modelu k sání
R <sub>o1</sub> [m <sup>-4</sup> ]	17 000	úsek prvního obtoku (DN150)
R <sub>o2</sub> [m <sup>-4</sup> ]	41 000	úsek druhého obtoku (DN125)
R <sub>o3</sub> [m <sup>-4</sup> ]	5 000	úsek třetího obtoku (DN150)
R <sub>M</sub> [m <sup>-4</sup> ]	750 - ∞	měnitelný odpor představující model

Tab. (2.1) Tabulka odporových součinitelů

Hodnoty odporových součinitelů  $R_1$  a  $R_2$  jsou nulové z důvodu toho, protože jejich hodnota je již obsažena v charakteristické rovnici čerpadla, která byla stanovována mezi uzly (1) a (2).

Výpočet byl proveden tabulkovým procesorem MS EXCEL podle níže uvedeného aproximačního algoritmu a hodnoty tlaku odpovídají hodnotám v nulové rovině, tj. hodnotám po odečtení statického tlaku při nulovém průtoku.

Postup je následující:

1. pomocí statického výpočtu se určí hodnota tlaku  $p_1$
2. průtoku  $Q_4$  se přiřadí hodnota pro první iteraci, měla by být kladná
3. z rovnice kontinuity tedy vyplývá  $Q_3 = Q_4$
4. nyní může být stanoven tlak za modelem  $p_{M,2} = p_1 + R_4 \cdot \rho \cdot Q_4^2$
5. a tlak před modelem  $p_{M,1} = p_{M,2} + R_M \cdot \rho \cdot Q_4^2$
6. dále se určí tlak  $p_2 = p_{M,1} + R_3 \cdot \rho \cdot Q_3^2$
7. nyní se určí průtoky obtoky

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = R_{oi} \cdot Q_{oi}^2 \quad \Rightarrow \quad Q_{oi} = \text{sign}(p_2 - p_1) \cdot \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot R_{oi}}}$$

8. určí se průtok  $Q_2$  s využitím rovnice kontinuity  $Q_2 = Q_3 + \sum Q_{oi}$
9. určí se tlak  $p_{\check{c}} = p_2 + R_2 \cdot \rho \cdot Q_2^2$

10. určí se průtok  $Q_1$  z rovnice kontinuity  $Q_1 = Q_2$

11. získá se nová hodnota průtoku  $Q_4$  pro následující iteraci podle vztahu

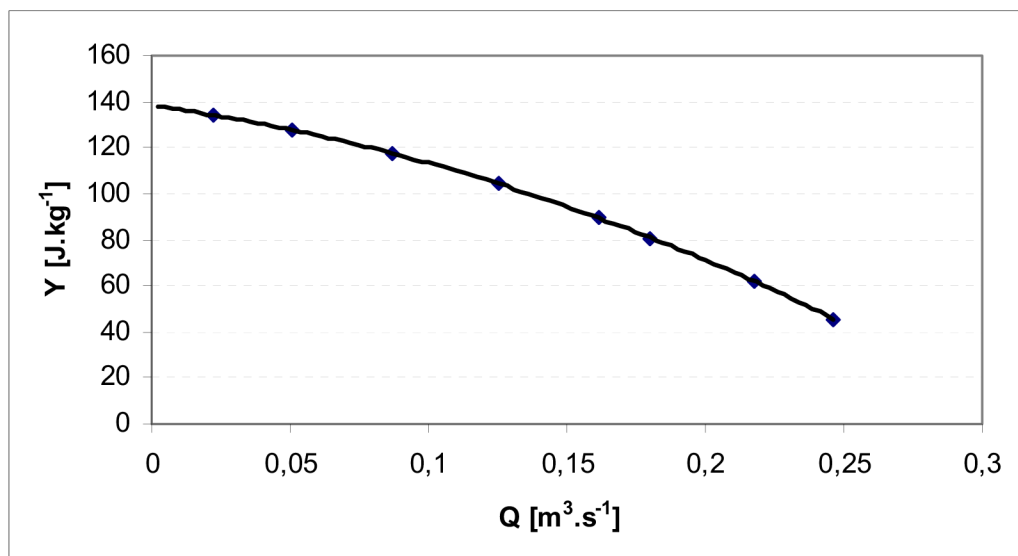
$${}^1Q_4 = Q_4 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot (A \cdot Q_2^2 + B \cdot Q_2 \cdot C) + p_1}{p_c}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (2.8)$$

a opakuje se aproximační cyklus 3. až 11. dokud  ${}^1Q_4 = Q_4$

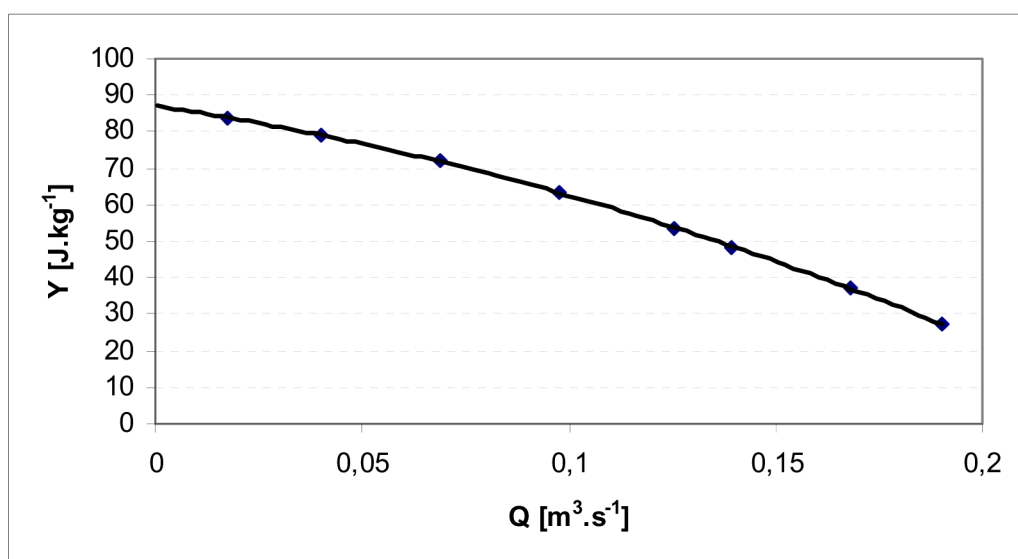
Aproximační podmínka – vztah (2.8) – vyplývá z rovnosti tlaků na výstupu z uzlu (Č) dopočítávaných z obou stran. Tlak  $p_1$  vstupující do uzlu (Č) zvýšený o tlak dodaný čerpadlem  $\rho \cdot (A \cdot Q_2^2 + B \cdot Q_2 \cdot C)$  musí být roven tlaku dopočítaného z výtlačné strany  $p_c$ . Touto podmínkou je pak zpřesňován startovací průtok  $Q_4$ , což je vlastně průtok modelem.

## 2.4 Výsledné informace z teoretického modelu

Pomocí výše popsaného aproximačního postupu se získají hodnoty tlakového spádu na modelu a průtoku modelem při různých nastaveních otevření ventilu simulujícího model, tj. při různých hodnotách odporového součinitele modelu. Z těchto hodnot již může být stanovena hodnota disipované energie na ventilu, což odpovídá měrné energii zpracovávané modelem. Toto může být provedeno i pro různé otevření obtoků nebo pro různé paralelní zapojení čerpadel. Pouze při změně zapojení čerpadel musí být změněna charakteristická rovnice uzlu (Č).



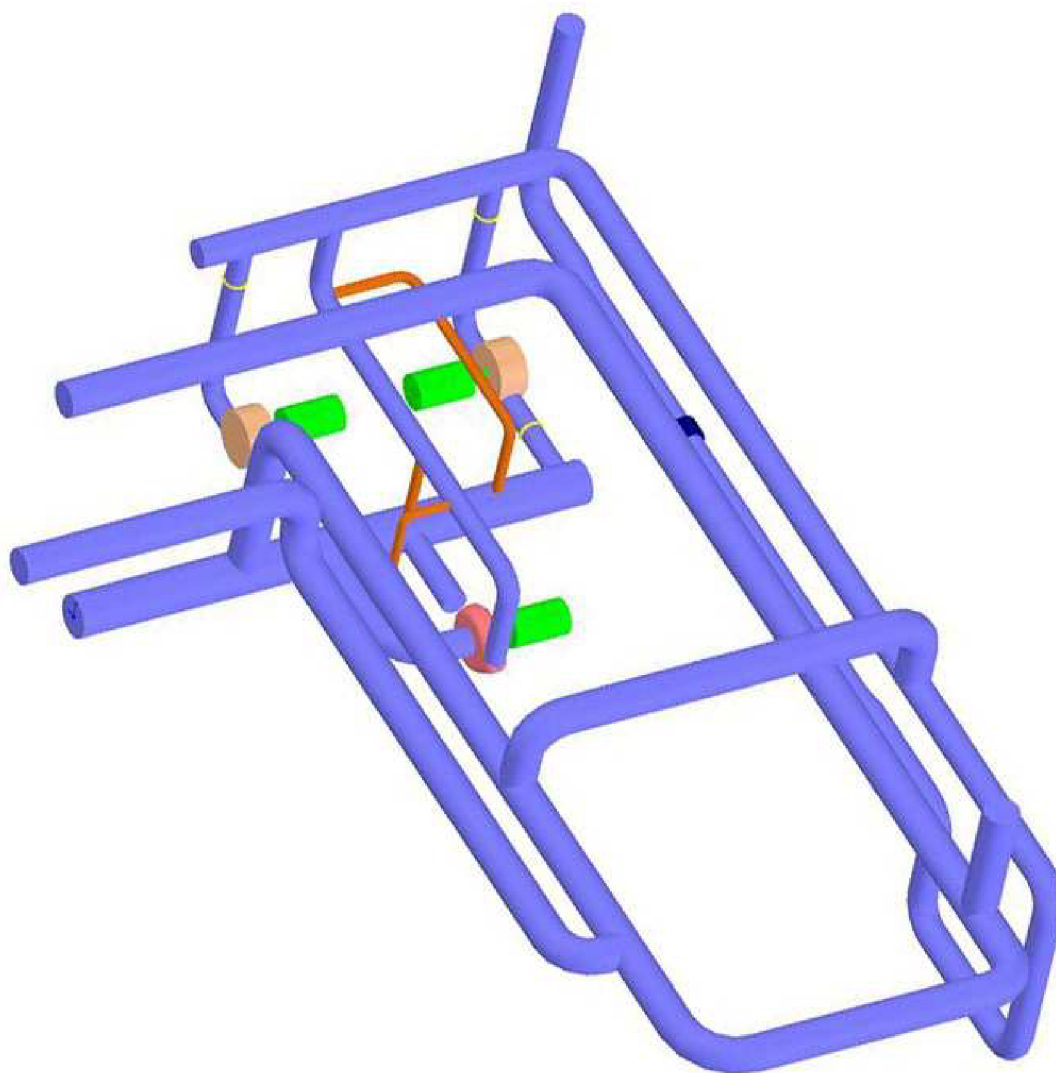
Obr. (2.2) Zpracovaná měrná energie na modelu při zapojení nízkotlakého čerpadla a zavřených všech obtocích



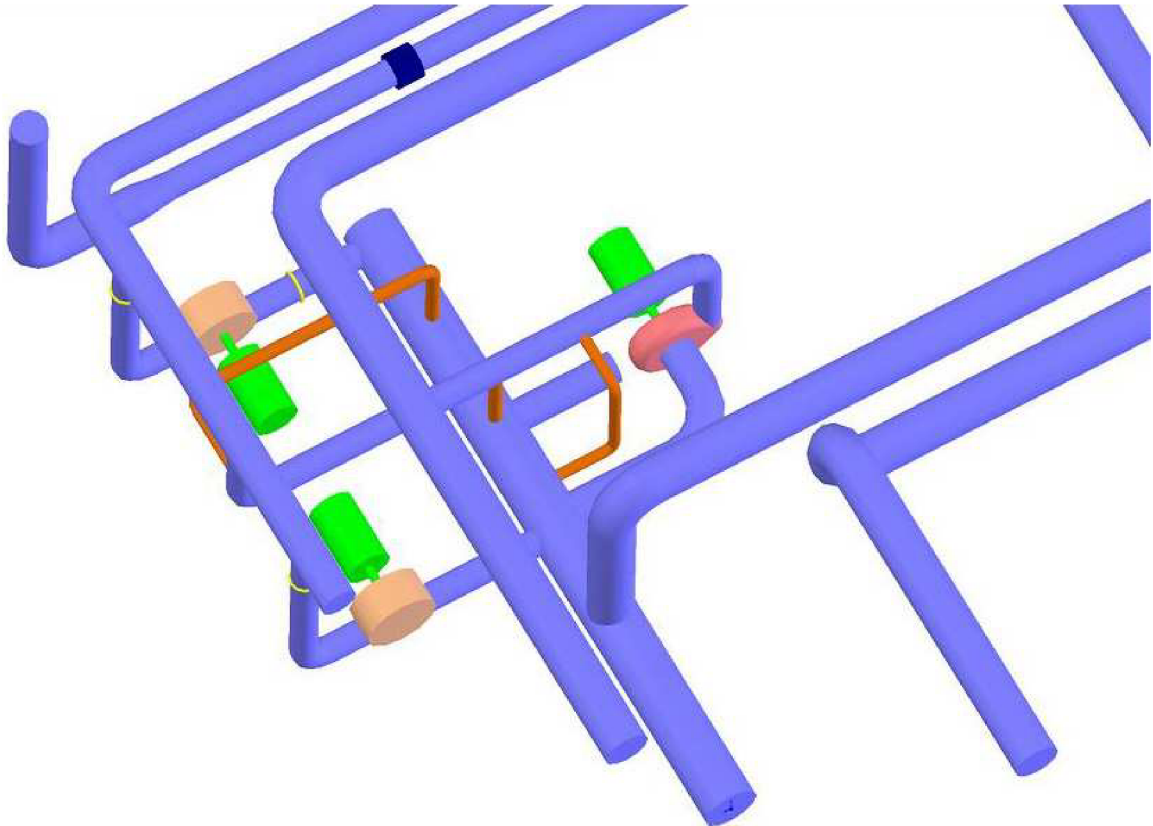
Obr. (2.3) Zpracovaná měrná energie na modelu při zapojení nízkotlakého čerpadla a otevřených všech obtocích

### 3 Univerzální měřicí stanice – 3D model

Součástí této diplomové práce bylo vytvoření reálného 3D modelu hlavní části univerzální měřicí stanice, která se nachází v suterénu laboratoře OFI. Model byl vytvořen pomocí softwaru SolidWorks 2006 na základě již existující 2D dokumentace. Tento model by měl sloužit pro první zorientování při úpravě, změně či opravě potrubní sítě zkušební stanice.



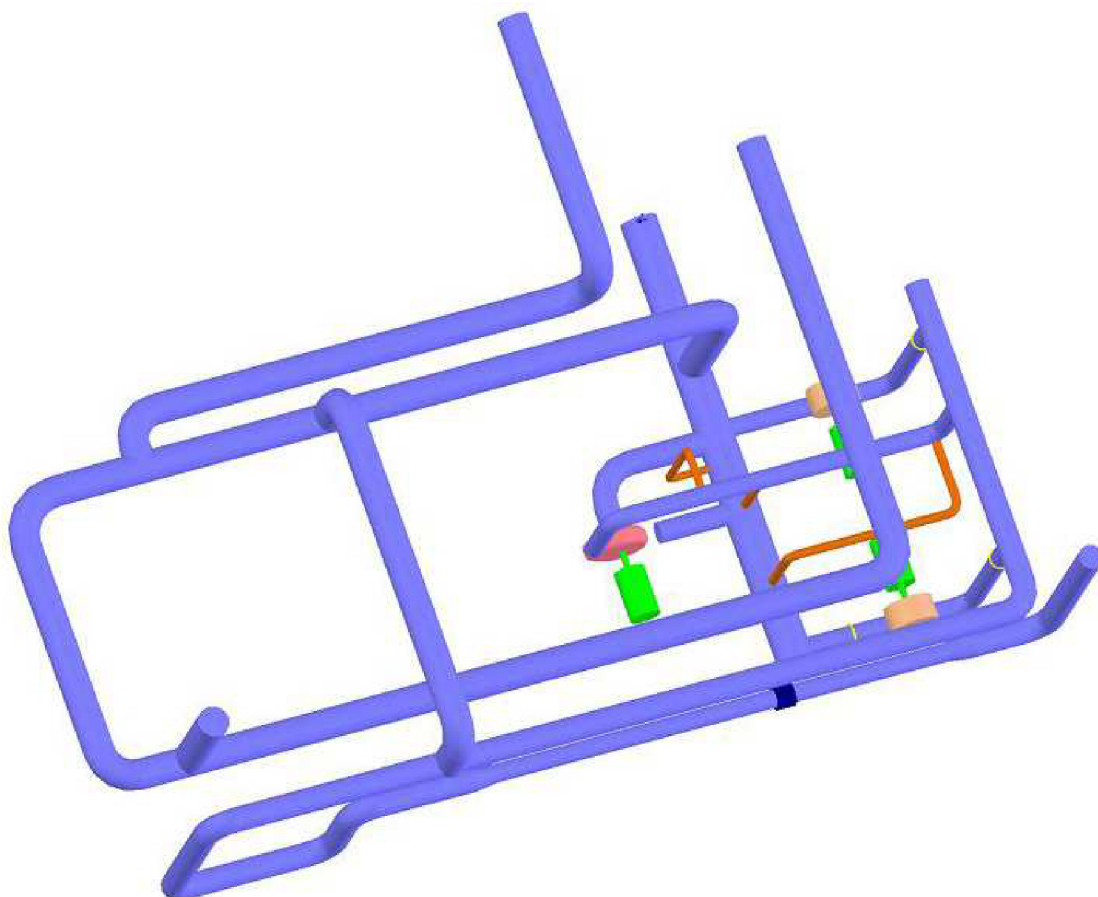
*Obr. (3.1) 3D model univerzální měřicí stanice – část v suterénu – pohled ze schodiště*



*Obr. (3.2) 3D model univerzální měřicí stanice – detail zapojení čerpadel a regulačních obtoků*

Na obrázcích (3.1), (3.2) a (3.3) je znázorněn 3D model části měřicí univerzální stanice nacházející se v suterénu laboratoře OFI. Barevně jsou zde odlišeny jednotlivé komponenty:

- světle modrá – jednotlivé potrubní úseky
- tmavě modrá – indukční průtokoměr
- žlutá – místa tlakových odběrů
- světle červená – čerpadla, kde tmavší odstín představuje nízkotlaké čerpadlo a světlejší odstín čerpadla vysokotlaká
- zelená – elektromotory jednotlivých čerpadel
- oranžová – regulační obtoky

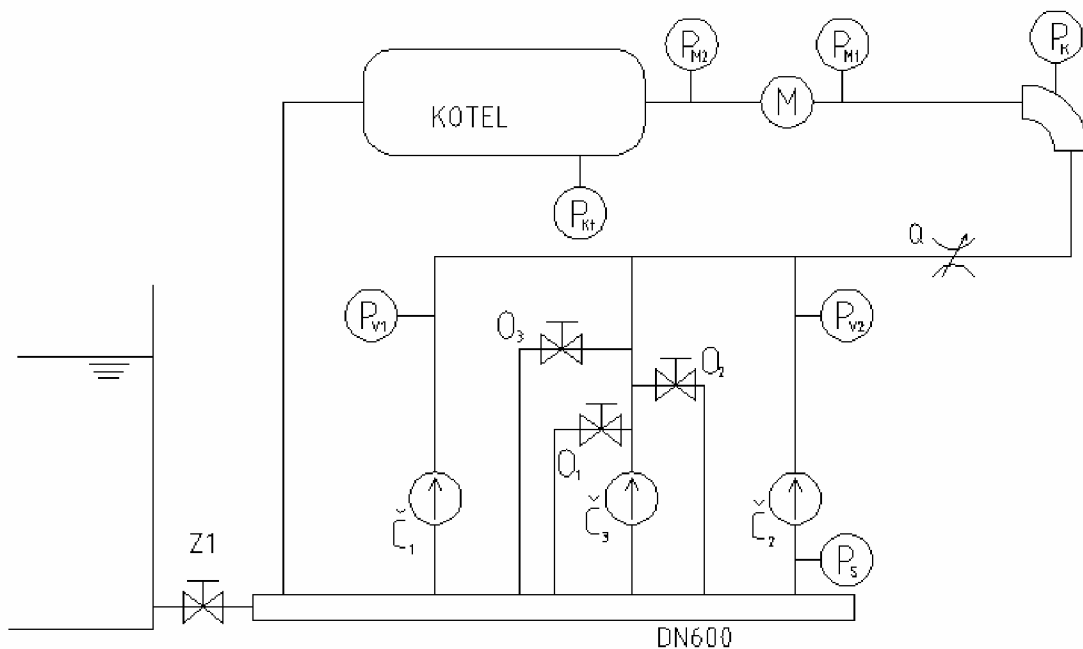


*Obr. (3.3) 3D model univerzální měřicí stanice – kompletní zobrazení*

## 4 Experimentální měření

Cílem experimentálního měření bylo změření charakteristiky univerzální měřicí stanice v laboratoři OFI. Byly měřeny příslušné hodnoty tlaku a průtoku, z nichž byla dopočítána celková charakteristika tratě a vytvořen matematický model univerzální zkušební stanice.

### 4.1 Schéma měřené tratě



Obr. (4.1) Schéma univerzální měřicí stanice

Vysvětlení jednotlivých označení z obrázku (4.1):

- Č<sub>1</sub> – vysokotlaké čerpadlo M 201
- Č<sub>2</sub> – vysokotlaké čerpadlo M 202
- Č<sub>3</sub> – nízkotlaké čerpadlo M 203
- O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> – regulační obtoky
- Q – indukční průtokoměr



- M – model
- $Z_1$  – uzávěr oddělující zásobní nádrž; v průběhu měření uzavřen
- $p_S$  – tlakový odběr na sání
- $p_{V1}$ ,  $p_{V2}$  – tlakové odběry na výtlaku
- $p_K$  – tlakový odběr v koleně před napojením přívodního potrubí na model
- $p_{M1}$ ,  $p_{M2}$  – tlakové odběry před a za ventilem představující model
- $p_{Kt}$  – tlakový odběr v kotli

## 4.2 Popis měřené tratě

Univerzální měřicí stanice se skládá ze zásobní nádrže, z které je plněna měřená potrubní trať. Při průběhu měření je přívod od zásobní nádrže uzavřen. Ze zásobní nádrže vede sací trouba o světlosti DN600, ke které jsou paralelně připojena tři čerpadla, nízkotlaké, vysokotlaké a vysokotlaké se stočeným kolem. Výtláčná potrubí čerpadel o světlosti DN300 jsou napojena na společnou větev o světlosti DN400. Výtláčná část potrubí nízkotlakého čerpadla je spojena se sací troubou DN600 dvěma obtoky o světlosti DN150 a jedním obtokem DN125.

Společná výtláčná větev čerpadel DN400 je zúžena na světlost indukčního průtokoměru DN300 a opět rozšířena na světlost DN400. Poté je vyvedena z prostoru suterénu do prostoru laboratoře, kde na ni navazuje koleno DN400.

Od tohoto kolena již následuje přívodní potrubí na model, model a zaústění do sacího kotle. Přívodní potrubí na model a zaústění do kotle je již specifické příslušnému měřenému modelu.

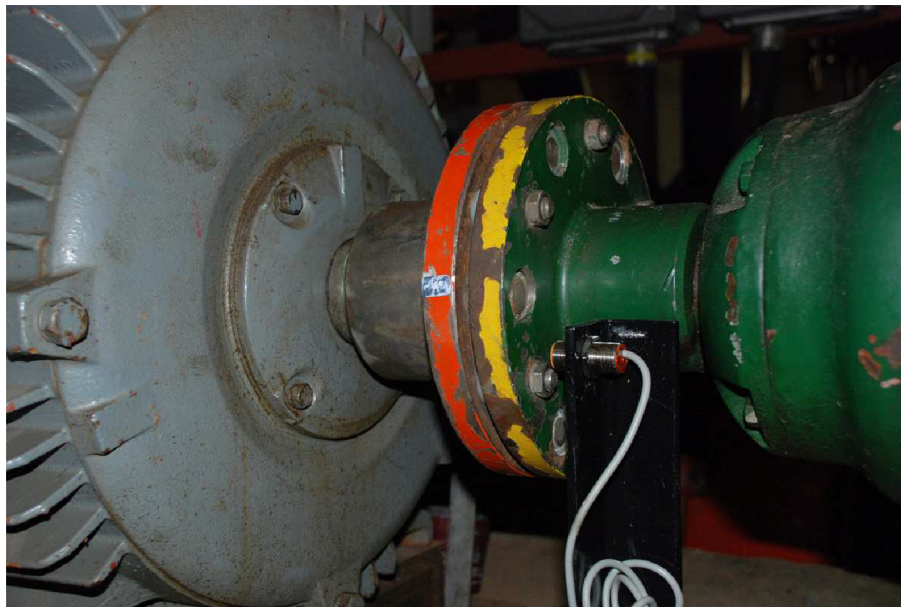
Ze sacího kotle o objemu  $10,8 \text{ m}^3$  je vyvedeno potrubí o světlosti DN500 zpět do suterénu laboratoře, kde je zavedeno zpět do sací trouby DN600.

## 4.3 Měřené veličiny

$p_S$	[kPa]	tlak na sání
$p_{V1}$	[kPa]	tlak na výtlaku; umístění na výtláčné větvi čerpadla 201
$p_{V2}$	[kPa]	tlak na výtlaku; umístění na výtláčné větvi čerpadla 202
$p_K$	[kPa]	tlak v koleně před přívodním potrubím na model

$p_{M1}$	[kPa]	tlak před modelem
$p_{M2}$	[kPa]	tlak za modelem
$p_{Kt}$	[kPa]	tlak v sacím kotli
$Q_M$	[l/s]	průtok modelem
$n$	[ $\text{min}^{-1}$ ]	otáčky oběžného kola čerpadla, snímač viz obrázky (4.2)
$t$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	teplota vody v sacím kotli

Hodnoty tlaků na výtlaku čerpadla  $p_{V1}$  a  $p_{V2}$  se odlišovaly řádově do 1% a v dalších uvedených výpočetních vztazích je uvedena už jejich průměrná hodnota  $p_V$ .



Obr. (4.2) Snímač otáček oběžného kola

#### 4.4 Použitá měřící technika

**SP1** – snímač tlaku na výtlaku čerpadla s motorem M202, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 4 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 0036969

**SP2** – snímač tlaku na výtlaku čerpadla s motorem M201, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 4 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 0320840

**SP3** – snímač tlaku na sání obou čerpadel, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 1,6 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 148401198

**SP4** – snímač tlaku v koleně, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 2,5 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 0320839

**SP5** – snímač tlaku před regulačním ventilem, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 2,5 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 114261197

**SP6** – snímač tlaku za regulačním ventilem, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 1,6 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 148421198

**SP7** – snímač tlaku v kotli, DMP 331, výrobce BD SENSORS s.r.o., rozsah 1,6 bar A, přesnost  $\pm 0,25$  % z rozsahu, výstup (0-20) mA, výrobní číslo 148371198

**SQ** – magneticko-indukční průtokoměr KROHNE se snímačem IFS 4000 a převodníkem SC 100 AS, DN 300, výrobce KROHNE - Holandsko,  $Q_{max} = 500$  l/s, přesnost  $\pm 0,2$  % z měřené hodnoty pro  $v > 1$  m /s, výstup (0 – 20) mA, výrobní číslo A 9212740

**ST** – snímač teploty HSO-502 1A2L, výrobce HIT Uherské Hradiště, rozsah (0 – 50) °C, přesnost  $\pm 0,1$  % z rozsahu, výstup (4 – 20) mA, výrobní číslo LA 338

**SO** – snímač otáček SYRELEC IACMN1805E1 ve spojení s 6-ti místným programovatelným čítačem (měřičem kmitočtu) OM 601 UQC , výrobce ORBIT MERRET spol. s r.o., rozsah (0 – 1000) ot/min, přesnost  $\pm 0,01$  % z rozsahu, výstup (0 – 20) mA, výrobní číslo 061013005

**NZ** – stejnosměrný napájecí zdroj pro snímače tlaku a teploty typ T124P50N 24V / 1A, výrobce DIAMETRAL Praha, výrobní číslo 4

**PC** – 386 s měřicí kartou PCL 812 – PG, výrobce Advantech Co., OS DOS, max. chyba A/D převodníku  $\pm 0,015\%$  z měřené hodnoty + digit, výrobní číslo 920400001

**KU** – přípojovací karta k PC typ PCLD – 780, výrobce Advantech Co., výrobní číslo L93B0700

Měření bylo prováděno s využitím měřicího programu INMES 812, verze 911127, č. licence pro VUT v Brně OFI V. K.: 1A0039.

Frekvence vzorkování: 10 Hz, doba měření: 30 s.

## 4.5 Postup měření

Měření probíhalo pouze při zapojeném nízkotlakém čerpadle, vysokotlaká čerpadla byla odstavena. Škracením průtoku pomocí třicestného ventilu představujícího model byla vždy proměřena celá charakteristická křivka případné varianty zapojení regulačních obtoků.

Varianty zapojení obtoku jsou znázorněny v tabulce (4.1) postupně tak, jak byly proměřovány.

varianta	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
<b>obtok 1 (DN150)</b>	zav.	otev.	otev.	zav.	zav.	otev.	otev.	zav.
<b>obtok 2 (DN125)</b>	zav.	zav.	otev.	otev.	otev.	otev.	zav.	zav.
<b>obtok 3 (DN150)</b>	zav.	zav.	zav.	zav.	otev.	otev.	otev.	otev.

*Tab.(4.1) Proměřované varianty zapojení regulačních obtoků*

Postup aplikovaný při měření:

1. Připojení měřicích přístrojů a snímačů; vyvedení jejich signálu k počítači v řídicí kabině.

2. Naplnění měřicí tratě ze zásobní nádrže a uzavření přívodu.
3. Odvzdušnění měřicí tratě a snímačů.
4. Kontrola funkce snímačů tlaku a kontrola nastavení nuly průtoku.
5. Kontrola otevření a zavření ventilů na regulačních obtocích podle měřené varianty.
6. Spuštění asynchronního motoru čerpadla. Kontrola otáček čerpadla.
7. Nastavení průtoku škrcením pomocí regulačního ventilu představujícího model.
8. Kontrola ustálení tlaků, průtoku a otáček.
9. Vlastní měření nastaveného bodu. Měření bodu probíhá po dobu 30-ti sekund vzorkovací frekvencí 10Hz. Po 30-ti sekundách se v programu po opuštění nabídky „MĚŘENÍ“ aktivuje okno pro uložení parametrů měřeného bodu.
10. Pokračovat v bodě 7, dokud nejsou změřeny všechny požadované body.
11. Odstavení čerpadla.
12. Po ustálení měření tlakové difference při odstaveném čerpadle.
13. Změna otevření a zavření ventilů regulačních obtoků dle další varianty nastavení
14. Pokračovat v bodě 5, dokud nejsou proměřeny všechny varianty.
15. Uložení časově středních měřených hodnot pro další zpracování.

## 5 Zpracování naměřených hodnot

### 5.1 Určení výšek tlakových odběrů

Z naměřených statických hodnot, tj. při odstaveném čerpadle a nulovém průtoku, byly stanoveny jednotlivé geodetické výšky tlakových odběrů vztaženy k výšce tlakového odběru na sání čerpadla  $p_s$ , který byl uvažován jako nulová vztážná rovina. K výpočtu byl použit vztah pro měrnou energii mezi dvěma body:

$$Y = \frac{p_s - p_x}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_s^2} - \frac{1}{S_x^2} \right) + (H_s - H_x) \cdot g \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.1)$$

kde veličiny s indexem  $S$  se vztahují k místu tlakového odběru na sání čerpadla  $p_s$ , veličiny s indexem  $X$  k místu tlakového odběru, jehož výška je zjišťována. Dále pak platí:  $Q = 0 \Rightarrow Y = 0$

$$\text{Z toho tedy vyplývá: } H_x = \frac{p_s - p_x}{g \cdot \rho} \quad [\text{m}] \quad (5.2)$$

Jednotlivé výšky jsou uvedeny v tabulce (5.1).

místa tlakových odběrů	$p_s$	$p_{v1}$	$p_{v2}$	$p_K$	$p_{M1}$	$p_{M2}$	$p_{Kt}$
geodetická výška $H$ [m]	0,00	1,80	1,74	6,24	6,05	6,03	5,18

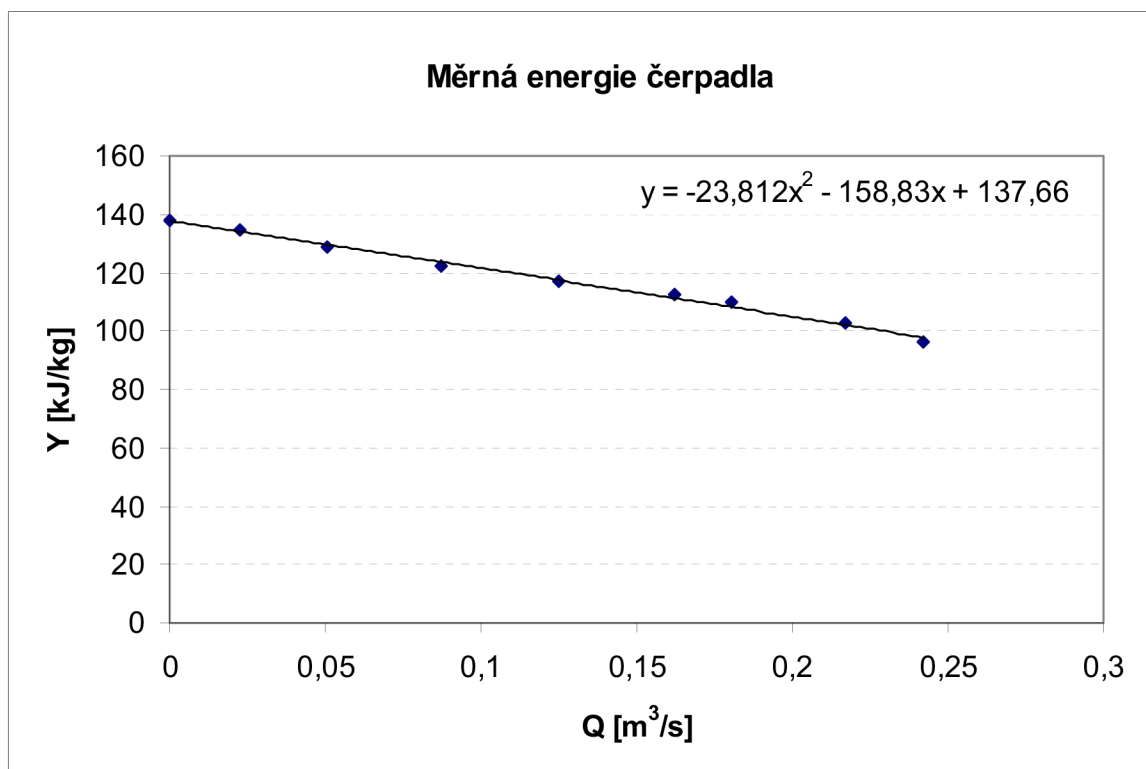
Tab.(5.1) Geodetické výšky tlakových odběrů

### 5.2 Charakteristika nízkotlakého čerpadla

Z měřených tlaků na výtlačku a sání čerpadla ( $p_v$  a  $p_s$ ) a z průtoku při uzavřených všech regulačních obtocích byla podle vztahu (5.3) stanovena měrná energie čerpadla.

$$Y_c = \frac{p_v - p_s}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \left( \frac{1}{S_v^2} - \frac{1}{S_s^2} \right) + g \cdot (H_v - H_s) \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.3)$$

Takto byly vypočítány hodnoty měrné energie pro všechny body a vyneseny do grafu v závislosti na průtoku  $Q$ , viz obrázek (5.1)



Obr. (5.1) Charakteristika nízkotlakého čerpadla

Jak je již vidět z obrázku (5.1), byly charakteristické body proloženy pomocí kvadratické regresní křivky a stanovena charakteristická rovnice ve tvaru polynomu 2. stupně.

### 5.3 Určení odporových součinitelů hlavního potrubí

Pro možnost jednoduchého přepočtu charakteristik univerzální měřící stanice pro jednotlivé zapojení čerpadel byly ze známých tlaků a průtoku (viz. kapitola (4.3)) vypočítány jednotlivé odporové součinitele  $R$ .

Ze vztahu (5.4) byla stanovena ztrátová měrná energie  $Y_z$  pro jednotlivé úseky mezi tlakovými odběry.

$$Y_z = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{Q_M^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right) + (H_1 - H_2) \cdot g \quad \left[ \frac{J}{kg} \right], \quad (5.4)$$

kde veličiny s indexem 1 představují hodnoty získané v počátku úseku a veličiny s indexem 2 hodnoty v koncovém místě úseku.

Kinetická část energie v místech tlakových odběrů na sání a na výtlaku čerpadla ( $p_S, p_V$ ) z důvodu umístění těchto odběrů mimo hlavní proud byla uvažována jako nulová. Při výpočtu byl tedy průtok v těchto místech brán též jako nulový.

Pro určení hodnoty odporových součinitelů jednotlivých úseků byl použit upravený vztah (2.2) ve tvaru:

$$R = \frac{Y_z}{Q_M^2} [m^{-4}] \quad (5.5)$$

Pomocí vztahu (5.5) byly vypočítány odporové součinitele potrubních úseků pro jednotlivé průtoky odpovídající měřeným bodům. Tyto hodnoty byly vyneseny do grafu v závislosti na kvadrátu průtoku. Vynesené body byly pomocí lineární regrese proloženy přímkou o rovnici  $y = a \cdot x + b$ .

V tomto případě jednotlivé členy rovnice představují:  $y$  - ztrátovou měrnou energii  $Y_z$ ,  $x$  - kvadrát průtoku  $Q_M^2$ , konstanta  $b$  je nulová nebo velmi blízká nule a směrnice  $a$  představuje hledaný odporový součinitel daného úseku.

Jednotlivé hodnoty odporových součinitelů jsou uvedeny v tabulce (5.2).

odporový součinitel	hodnota [ $m^{-4}$ ]	popis
$R_{V-K}$	127,4	úsek mezi výtlakem a měřeným kolenem
$R_{K-M1}$	102,49	přívodní potrubí k modelu
$R_{M2-Kt}$	364,67	zaústění od modelu do kotle
$R_{Kt-S}$	151,65	spojení kotle a sací trouby

Tab.(5.2) Hodnoty odporových součinitelů jednotlivých úseků

## 5.4 Odporový součinitel modelu

Další podmínkou pro celkovou charakteristiku univerzální měřicí stanice je stanovení odporového součinitele modelu. Tento odporový součinitel je však pro každý proměřovaný bod charakteristiky různý podle toho, jak byl model uzavírán.



Jeho stanovení je obdobné jako stanovení odporových součinitelů úseků tratě a jeho ztrátová měrná energie je počítána ze vztahu (5.3). V tomto případě se výpočetní vztah velmi zjednoduší, neboť platí:  $S_{M1} = S_{M2}$  a  $H_{M1} = H_{M2}$

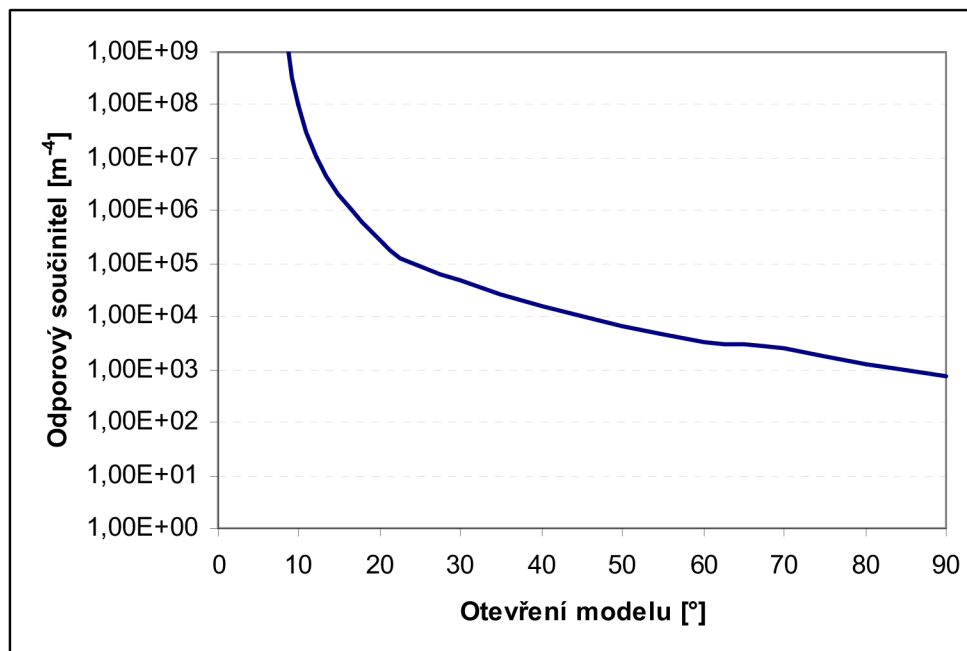
Výsledný vztah pak vypadá takto:

$$Y_z = \frac{p_{M1} - p_{M2}}{\rho} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.6)$$

Výsledná hodnota odporového součinitele se dále stanoví podle vztahu (5.5) pro každý bod zvlášť. Výsledný rozsah odporového součinitele v závislosti na otevření modelu je uveden v tabulce (5.3) a průběh je znázorněn na obrázku (5.2).

otevření modelu [°]	0-10	20	30	40	50	60	70	80	90
$R_M [m^{-4}]$	$\infty$	271381	49810	15260	6599	3411	2491	1303	751

Tab.(5.3) Odporový součinitel v závislosti na otevření modelu



Obr. (5.2) Závislost odporového součinitele na otevření modelu



Obr. (5.3) Stupnice otevření modelu

## 5.5 Odporové součinitele regulačních obtoků

Hodnoty jednotlivých odporových součinitelů regulačních obtoků nemohly být stanoveny přímo z naměřených hodnot kvůli absenci měřených hodnot průtoku jednotlivými obtoky. Z tohoto důvodu musely být tyto hodnoty průtoku stanoveny výpočtem vycházejícího ze znalosti charakteristiky čerpadla při zavřených obtocích a charakteristiky čerpadla při otevření jednoho příslušného obtoku, který byl počítán.

### 5.5.1 Stanovení hodnot průtoku regulačními obtoky

Pro stanovení hodnot průtoků regulačními obtoky se vyjde ze znalosti charakteristické rovnice čerpadla, která byla již stanovena i se ztrátami na sacím a výtlačném potrubí a při uzavřených všech regulačních obtocích ve tvaru  $Y_c = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C$ .

Dále se podle vztahu (5.7) stanoví měrná energie při otevřeném právě jednom měřeném regulačním obtoku  $Y_{\check{c},O_i}$  pro všechny proměřované body (varianty měření V2, V4, V8 – viz tabulka (4.1)).

$$Y_{\check{c},O_i} = \frac{p_V - p_S}{\rho} + \frac{Q_M^2}{2} \left( \frac{1}{S_V^2} - \frac{1}{S_S^2} \right) + g \cdot (H_V - H_S) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.7)$$

V tomto vztahu, jak již bylo uvedeno v kapitole (5.3), je opět zanedbána kinetická část měrné energie v místech odběrů pro tlakové snímače na sání a výtlaku čerpadla.

Poté se z charakteristické rovnice pro čerpadlo vyjádří průtok ve tvaru:

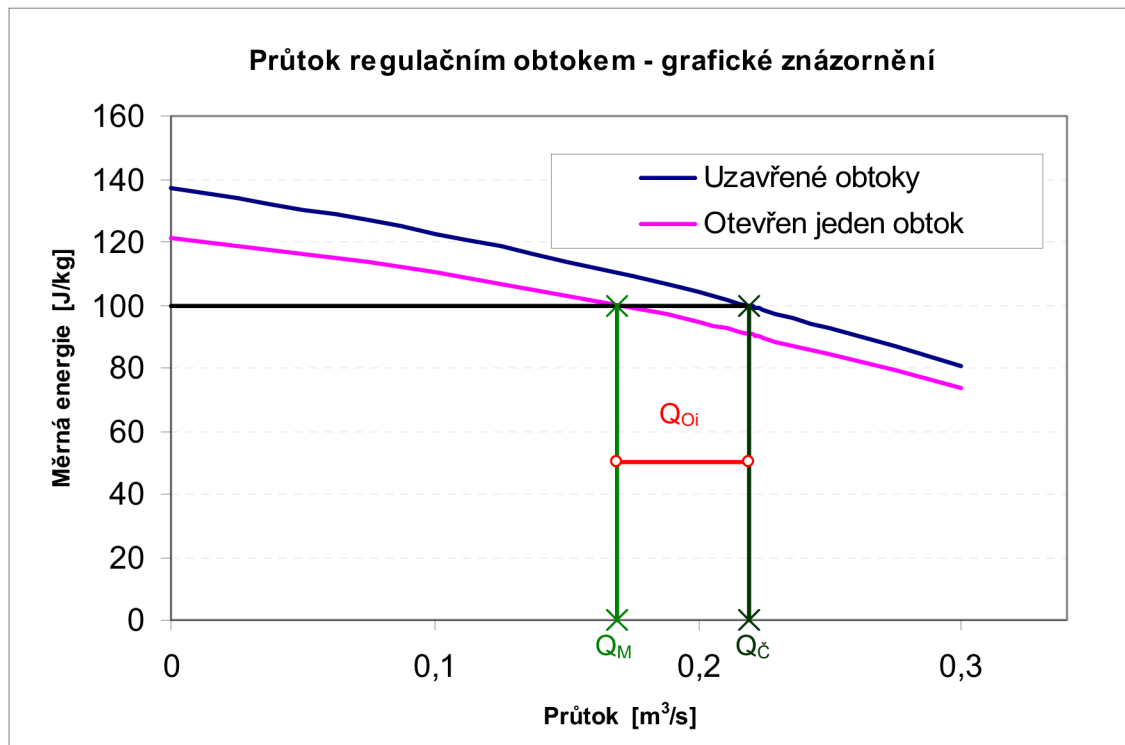
$$Q = \frac{-B + \text{sign}(A) \cdot \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot (C - Y)}}{2 \cdot A} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (5.8)$$

Pokud se místo  $Y$  dosadí do rovnice (5.8)  $Y_{\check{c},O_i}$  (měrná energie čerpadla při otevřeném  $i$ -tém obtoku) postupně všech měřených bodů, dostaneme průtok čerpadlem  $Q_{\check{c}}$ .

Nyní se od průtoku čerpadlem  $Q_{\check{c}}$  odečte měřený průtok jdoucí na model  $Q_M$ , a tím se získá hodnota průtoku přes  $i$ -tý regulační obtok  $Q_{O_i}$ .

$$Q_{O_i} = Q_{\check{c}} - Q_M \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (5.9)$$

Na obrázku (5.4) je graficky znázorněn postup výpočtu jednotlivých průtoků regulačními obtoky. Legenda k obrázku:  $Q_M$  – měřený průtok modelem,  $Q_{\check{c}}$  – průtok čerpadlem,  $Q_{O_i}$  – průtok  $i$ -tým obtokem.



Obr.(5.4) Grafické znázornění výpočtu průtoku regulačním obtokem

### 5.5.2 Výpočet odporových součinitelů regulačních obtoků

Stanovení hodnot odporových součinitelů regulačních obtoků je velmi podobné výpočtu odporových součinitelů úseků hlavní větve univerzální měřící stanice, které je uvedeno v kapitole (5.3).

Vzhledem k paralelnímu zapojení regulačních obtoků k hlavní měřící větvi může být uvažováno, že ztrátová měrná energie celé hlavní měřící větve bude shodná se ztrátovou měrnou energií každého jednotlivého regulačního obtoku. Pro její výpočet byl použit vztah (5.4), který byl upraven přímo pro výpočet ztrátové měrné energie mezi výtlačkem (napojením regulačních obtoků) a sáním čerpadla (zaústěním regulačních obtoků).

$$Y_z = \frac{p_v - p_s}{\rho} + (H_1 - H_2) \cdot g \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.10)$$

Pokud jsou tedy hodnoty ztrátové měrné energie jednotlivých regulačních obtoků a průtoky v nich známy, mohou být podle vztahu (5.11) stanoveny přímo hodnoty

odporových součinitelů jednotlivých obtoků. Minimální hodnoty odporových součinitelů jsou uvedeny v tabulce (5.4).

$$R_{O_i} = \frac{Y_Z}{Q_{O_i}^2} \quad [m^{-4}] \quad (5.11)$$

regulační obtok	obtok 1 (DN150)	obtok 2 (DN125)	obtok 3 (DN150)
odpor. součinitel $R_{O_i}$ [ $m^{-4}$ ]	16 913	47 096	3 641

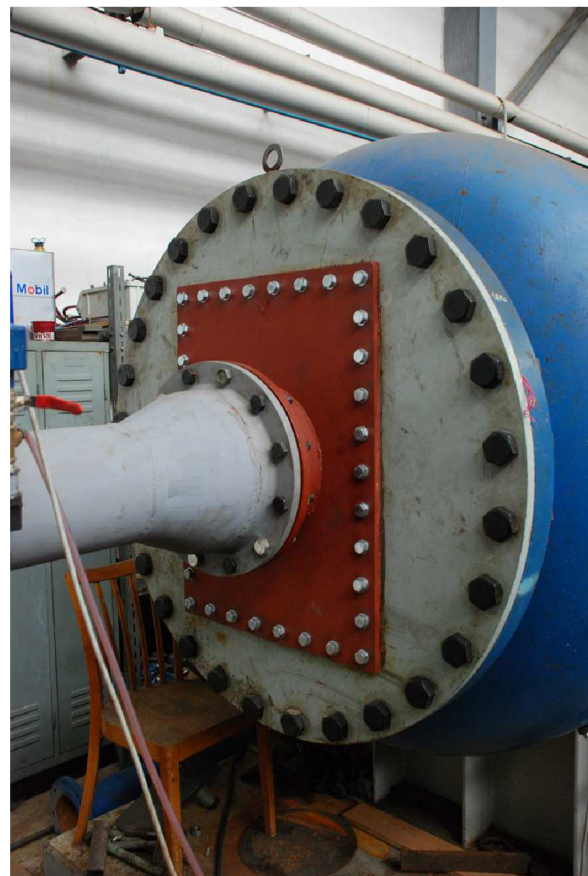
Tab.(5.4) Hodnoty odporových součinitelů jednotlivých regulačních obtoků

## 5.6 Parametry tratě při provozu nízkotlakého čerpadla

Každý model, který je zkoušen na univerzální stanici, má vlastní přívodní potrubí. Toto přívodní potrubí je napojeno na koleno DN400, které je umístěno v hlavním prostoru laboratoře, viz obrázek (5.5).



Obr. (5.5) Koleno DN400



Obr. (5.6) Zaústění do kotle



Obr. (5.7) Napojení přívodního potrubí modelu (šedé)  
na koleno DN400 (modré)

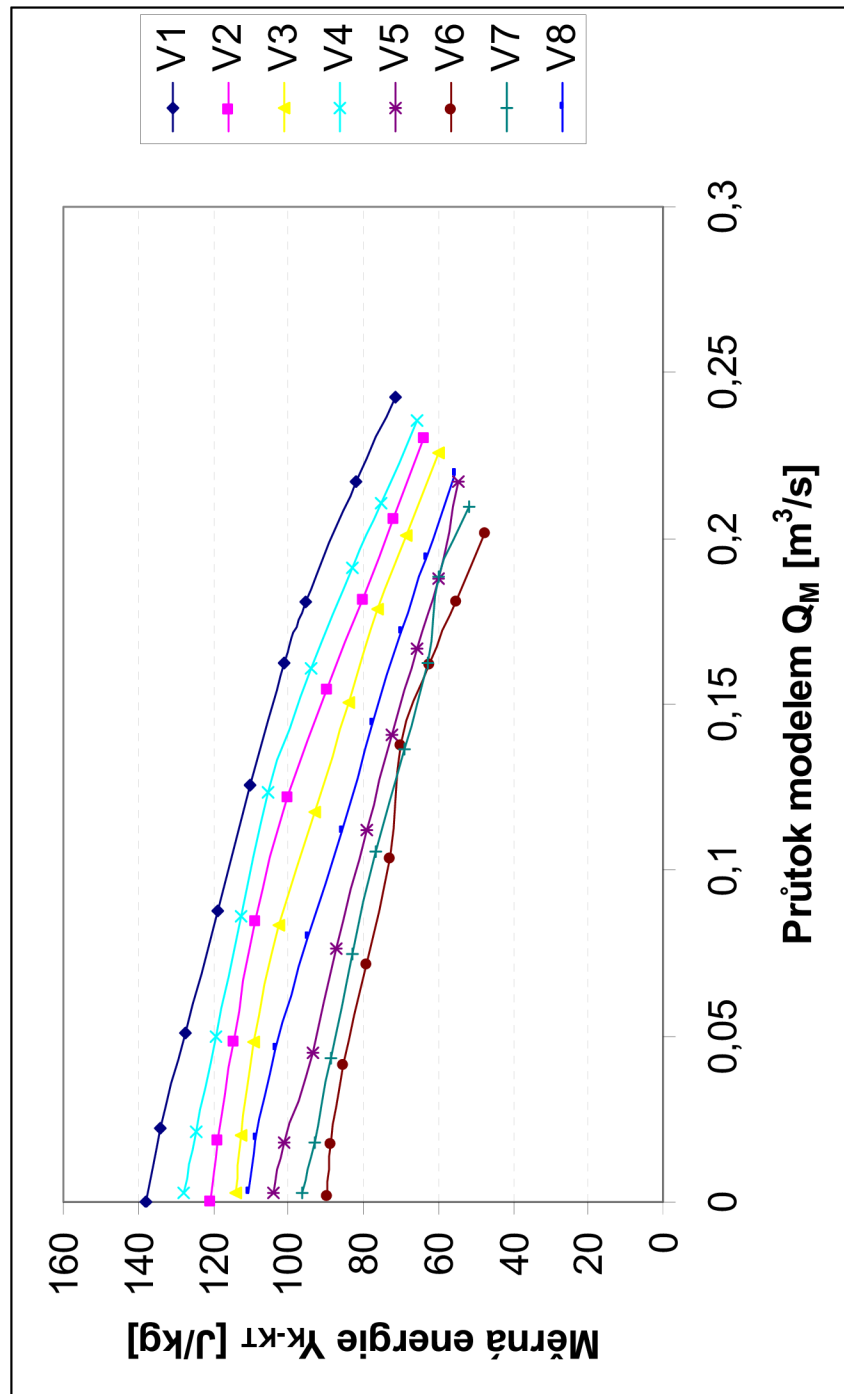
Dále je pak u každého modelu zaústění do sacího kotle, které je opět pro každý model individuální, např. obrázek (5.6).

Z těchto důvodů byl stanoven rozdíl měrných energií mezi kolenem DN400 a sacím kotlem. Tato změna obsahuje převážně měrnou energii zpracovanou modelem a dále ztrátovou měrnou energii přívodního a odvodního potrubí modelu.

Pro nízkotlaké čerpadlo byla tato změna měrné energie z naměřených bodů a to pomocí vztahu:

$$Y_{K-Kt} = \frac{p_K - p_{Kt}}{\rho} + \frac{Q_M^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_K^2} \right) + g \cdot (H_K - H_{Kt}) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (5.12)$$

Výpočet podle vztahu (5.12) provedeme pro všechny měřené body všech testovaných variant nastavení regulačních obtoků a vyneseme hodnoty do grafu v závislosti na průtoku modelem  $Q_M$ , viz obrázek (5.8).



Obr. (5.8) Změna měrné energie mezi kolenem a sacím kotlem při provozu nízkotlakého čerpadla

## 6 Provoz vysokotlakých čerpadel

Pokud jsou z předchozích výpočtů odporové součinitele celé univerzální měřicí stanice známy, mohou být při znalosti průtokových charakteristik vysokotlakých čerpadel vypočteny dosažitelné parametry měřicí tratě právě při provozu těchto čerpadel.

Výpočetní algoritmus je pro obě vysokotlaká čerpadla shodný, liší se pouze v průtokové charakteristice čerpadla a maximální hodnotě průtoku  $Q_{max}$ , který může čerpadlo dosáhnout. Proto zde je uveden pouze algoritmus pro obecné čerpadlo, do kterého bude možné dosazení vstupních hodnot pro konkrétní vysokotlaké čerpadlo.

### 6.1 Algoritmus výpočtu

Je znám rozsah odporového součinitele modelu  $R_M$ , dále potom celkový odporový součinitel tratě  $R_T$ . Tito dva součinitele představují úseky zapojené sériově a můžeme je tedy sčítat podle vztahu (6.1).

$$R_{T+M} = R_T + R_M \quad [m^{-4}] \quad (6.1)$$

Regulační obtoky jsou k hlavní větvi připojeny paralelně, proto musí být jejich odporové součinitele  $R_{O_i}$  sečteny podle vztahu (6.2), čímž získáme celkový odporový součinitel zkušební tratě  $R_C$ :

$$R_C = \left( \frac{1}{\sqrt{R_{T+M}}} + \sum \frac{1}{\sqrt{R_{O_i}}} \right)^{-2} \quad [m^{-4}] \quad (6.2)$$

Pokud je regulační obtok uzavřen, je hodnota jeho odporového součinitele  $R_{O_i}$  rovna nekonečnu.

Po uplatnění těchto předpokladů dostaneme vztahy pro měrnou energii čerpadla  $Y_C$ , kterou zde kvůli nepřesnosti při proložení kvadratickou funkcí nahradíme polynomickou funkcí třetího řádu, a celkovou ztrátovou měrnou energii tratě  $Y_{Tc}$ :

$$Y_C = A \cdot Q_C^3 + B \cdot Q_C^2 + C \cdot Q_C + D \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6.3)$$

$$Y_{Tc} = R_C \cdot Q_C^2 \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6.4)$$



Při výpočtu se vyjde z toho, že tyto dvě měrné energie jsou si rovny. Na počátku za průtok  $Q_{\check{c}}$  dosadíme přibližnou nenulovou hodnotu, spočítáme měrnou energii čerpadla  $Y_{\check{c}}$  a ztrátovou měrnou energii tratě  $Y_{Tc}$ . Poté v programu MS EXCEL pomocí nástroje „Hledání řešení“ měníme hodnotu průtoku  $Q_M$  tak, aby platila podmínka (6.5).

$$Y_{\check{c}} - Y_{Tc} = 0 \quad (6.5)$$

Vysokotlaká čerpadla však při zvyšování průtočnosti tratě začínají při určitém průtoku  $Q_{max}$  kavitovat a průtok čerpadlem se již dál nezvyšuje. Z tohoto důvodu musí být do výpočtu průtoku modelem  $Q_M$  zavedena podmínka:

$$\text{když } Q_{\check{c}} < Q_{max}, \text{ potom } Q_{\check{c}} = Q_{\check{c}}$$

$$\text{jinak } Q_{\check{c}} = Q_{max}$$

Pokud je znám průtok čerpadlem, stanoví se průtok modelem, který se vypočítá pomocí vztahů:

$$Q_{\check{c}} = Q_M + \Sigma Q_{Oi} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.6)$$

$$Y_{\check{c}} = R_{Oi} \cdot Q_{Oi}^2 \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6.7)$$

Z předchozích vztahů již může být vyjádřen průtok modelem  $Q_M$ :

$$Q_M = Q_{\check{c}} - \Sigma \sqrt{\frac{Y_{\check{c}}}{R_{Oi}}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.8)$$

Nyní již může být stanoven tlakový spád mezi kolenem DN400 a sacím kotlem. K výpočtu je použit upravený vztah pro výpočet ztrátové měrné energie:

$$\Delta p_{K-Kt} = \rho \cdot (R_{K-M1} + R_{M2-Kt} + R_M) \cdot Q_M^2 \quad [Pa] \quad (6.9)$$

Změna měrné energie mezi kolenem DN400 a sacím kotlem  $Y_{K-Kt}$  pak vyplývá ze vztahu:

$$Y_{K-Kt} = \frac{\Delta p_{K-Kt}}{\rho} + \frac{Q_M^2}{2 \cdot S_K^2} + g \cdot (H_K - H_{Kt}) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6.10)$$

## 6.2 Hodnoty použité při výpočtu

### 6.2.1 Specifikace zkušební tratě

Celkový odporový součinitel hlavní větve  $R_T$  se spočítá dle vztahu:

$$R_T = R_{V-K} + R_{K-M1} + R_{M2-Kt} + R_{Kt-S} \quad [m^{-4}], \quad (6.11)$$

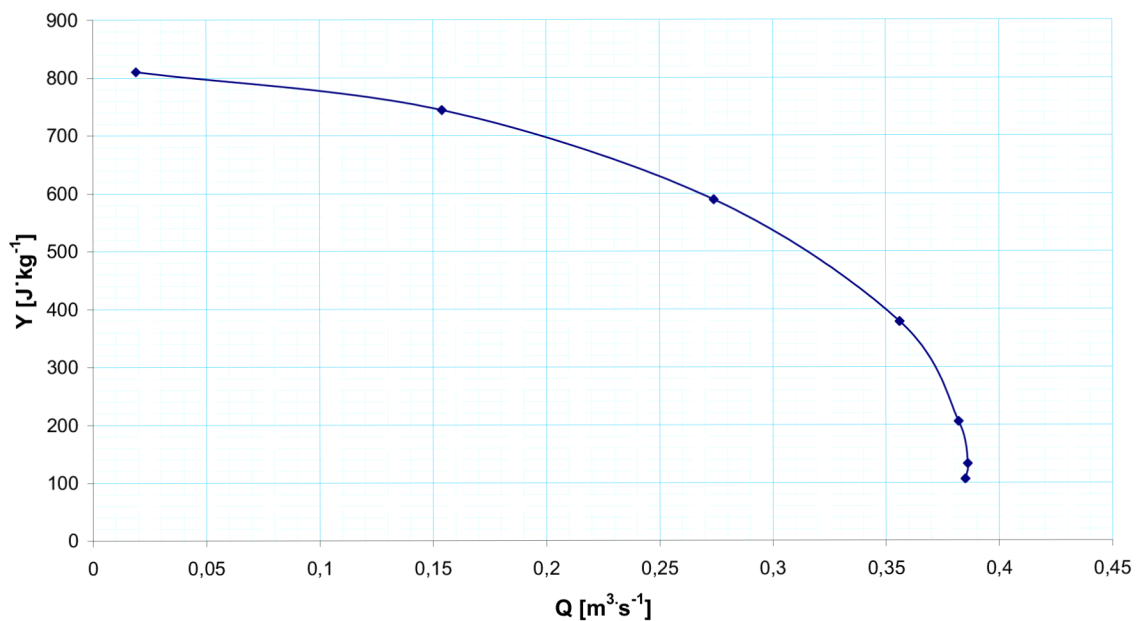
kde hodnoty odporových součinitelů  $R_{V-K}$ ,  $R_{K-M1}$ ,  $R_{M2-Kt}$ ,  $R_{Kt-S}$  jsou uvedeny v kapitole (5.3) v tabulce (5.2).

Rozsah velikosti odporového součinitele modelu  $R_M$  je uveden v kapitole (5.4) v tabulce (5.3).

Hodnoty odporových součinitelů regulačních obtoků  $R_{Oi}$  jsou uvedeny v kapitole (5.5.2) v tabulce (5.4).

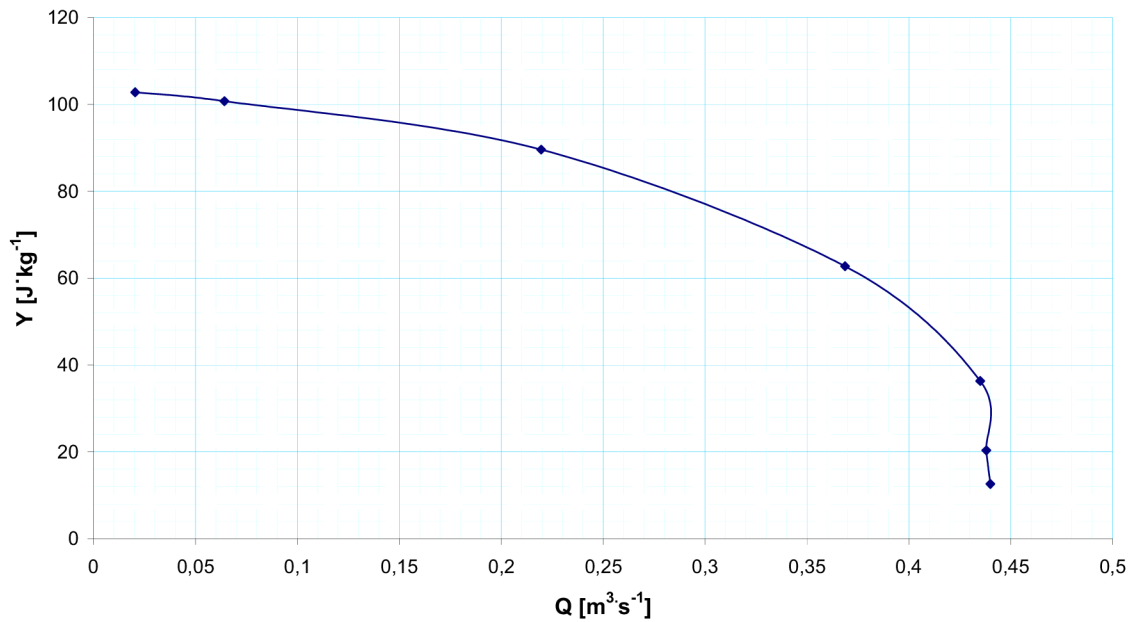
### 6.2.2 Specifikace vysokotlakých čerpadel

Čerpadlo M 201 - Univerzální zkušební stanice VUT Brno D=465 mm 6.03.2007



Obr. (6.1) Charakteristika vysokotlakého čerpadla M 201

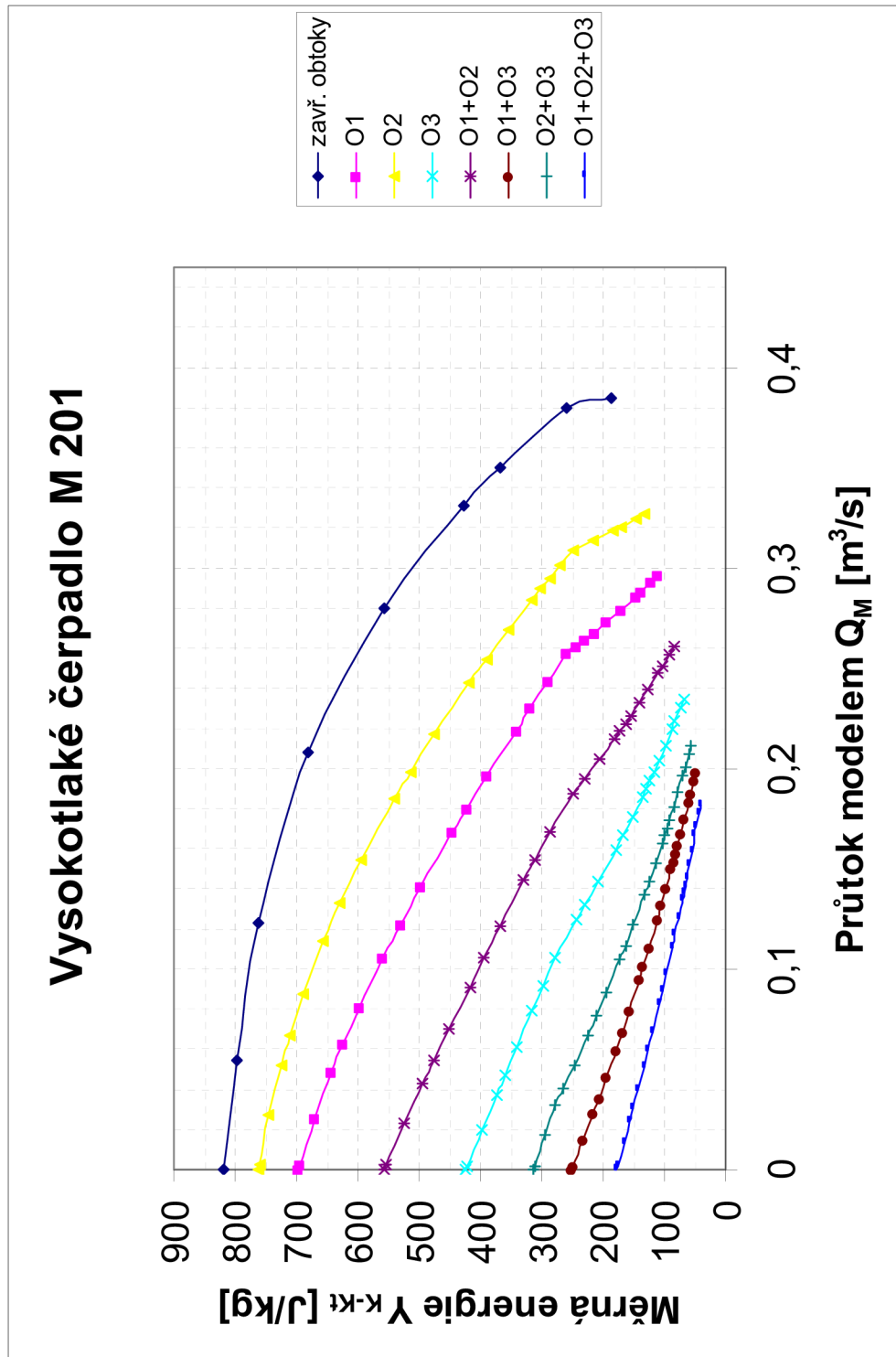
Čerpadlo M 202 - Univerzální zkušební stanice VUT Brno 28.02.2007



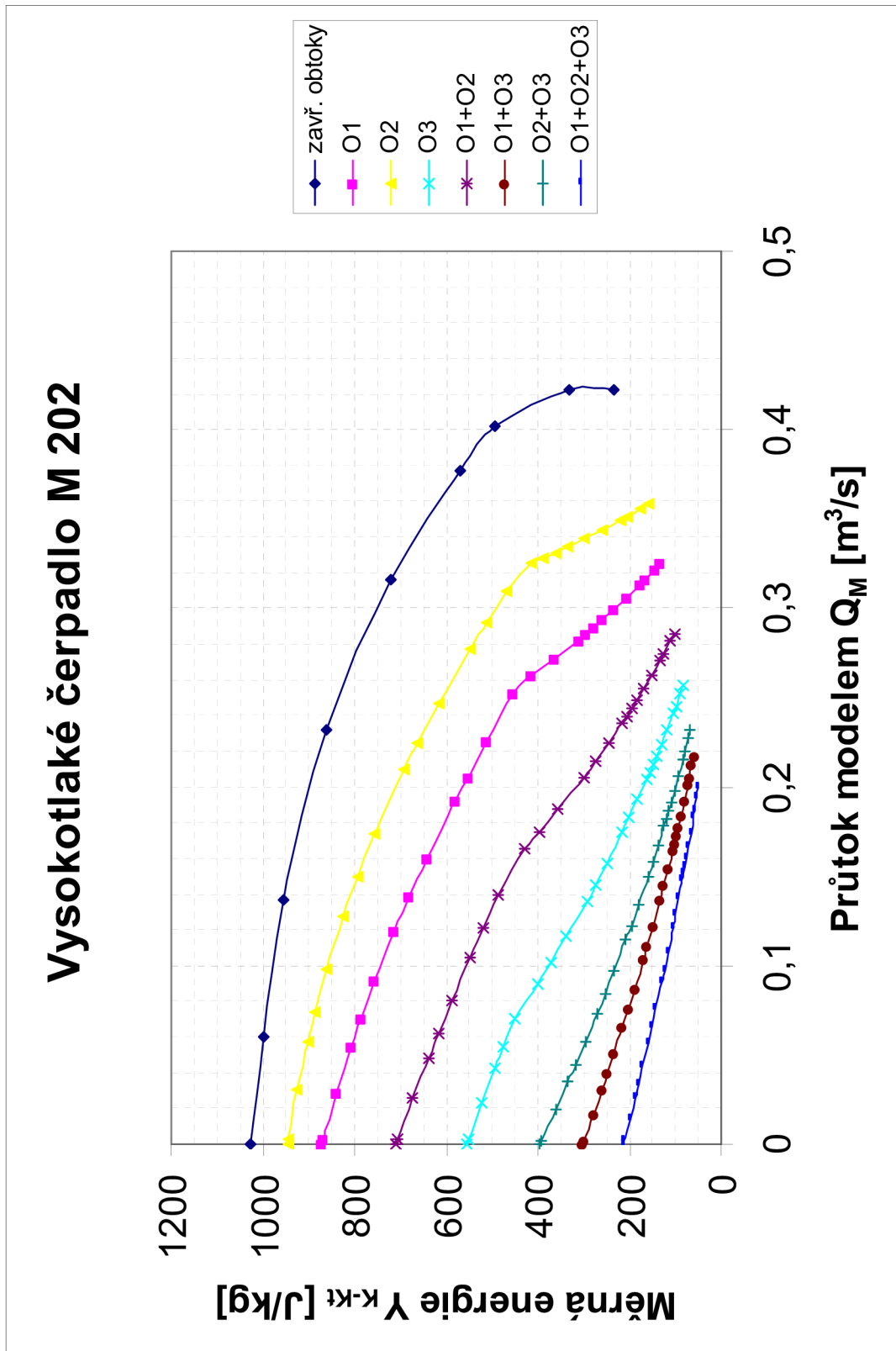
Obr. (6.2) Charakteristika vysokotlakého čerpadla M 202

Charakteristická rovnice čerpadla	
M 201	$Y = -9\,483,829\,402 \cdot Q^3 + 1\,095,982\,413 \cdot Q^2 - 423,873\,371 \cdot Q + 818,032\,401$
M 202	$Y = -6\,368,473\,146 \cdot Q^3 + 674,476\,644 \cdot Q^2 - 474,167\,907 \cdot Q + 1\,017,888\,185$
Maximální dosažitelný průtok	
M 201	$Q_{max} = 0,385 \text{ m}^3$
M 202	$Q_{max} = 0,44 \text{ m}^3$

### 6.3 Výsledné charakteristiky vysokotlakých čerpadel



Obr. (6.3) Měrná energie mezi kolenem DN400 a sacím kotlem při provozu vysokotlakého čerpadla M 201



Obr. (6.3) Měrná energie mezi kolenem DN400 a sacím kotlem při provozu vysokotlakého čerpadla M 202

## 7 Závěry a shrnutí

Diplomová práce se zabývá stanovením matematického modelu univerzální stanice v laboratoři VUT FSI OFI.

První část je věnována sestavení teoretického modelu tratě. V tomto modelu byly odporové součinitele některých částí tratě (regulační obtoky) stanoveny pomocí tzv. metody ekvivalentních délek. Jak z praktického měření vyplývá, může být tato metoda použita pouze pro první přiblížení, jelikož její přesnost je velmi závislá na přesnosti podkladu, z nichž se vychází pro její výpočet. I s ohledem na tuto skutečnost se hodnoty z teoretického modelu velmi blížily hodnotám z praktického měření.

Další část se zabývá vytvořením 3D modelu univerzální zkušební stanice. 3D model byl vytvořen pouze pro hlavní část nacházející se v suterénu laboratoře, protože část v prostoru laboratoře se z velké části mění dle aktuálně měřeného modelu, stabilní zůstává pouze koleno DN400 a sací kotel. Model byl vytvořen v softwaru SolidWorks a představuje pouze hlavní využívané větve. V budoucnu by měl sloužit pro první zorientování při úpravě či změně potrubní tratě univerzální měřicí stanice.

Poslední část je věnována experimentu, při kterém byla univerzální zkušební stanice měřena při spuštěném nízkotlakém čerpadle. Výsledky z tohoto měření následně posloužily pro stanovení tlakových a průtokových charakteristik univerzální stanice i při provozu vysokotlakých čerpadel.

Jako největší problém se ukázal chybějící tlakový odběr na výtlačné větvi nízkotlakého čerpadla. Ke stanovení měrné energie čerpadla byl tedy použit průměr hodnot tlaku z tlakových odběrů na výtlačných větvích vysokotlakých čerpadel při uzavřených všech regulačních obtocích, jelikož tyto obtoky jsou napojeny na výtlačnou větev nízkotlakého čerpadla ještě před tlakovými odběry. Hodnota tlaku na vstupu do regulačního obtoku musela tedy být stanovena výpočtem pomocí grafu velikosti ztrát v T-kusech uvedených v literatuře [2]. Tento výpočet z hlediska velmi přibližné znalosti ztrátových součinitelů T-kusů není velmi přesný, ale v kontextu celé charakteristiky tratě se vliv jeho nepřesnosti příliš neprojevuje.

Dalším problémem je řazení významných místních odporů blízko za sebou. Tyto odpory představují podstatnou část zmařené energie na rozdíl od reálných přivaděčů turbín, kde převládají délkové ztráty třením. Dále se tyto odpory velmi výrazně vzájemně ovlivňují a mají vliv na vypovídající hodnotu veličin měřených v jejich blízkosti. Například soubor hodnot odporových součinitelů regulačních obtoků se značně lišil pro různé varianty zapojení. Proto byly ze souboru těchto hodnot vyřazeny na první pohled nereálné hodnoty a ze zbývajících byl vypočten průměr. Rozdíl mezi průměrnou a příslušnou hodnotou činil maximálně cca 20%. Ale i takhle velká chyba vzhledem k hodnotě odporového součinitele hlavní větve tratě neměla přílišný vliv na změnu charakteristiky zkušební stanice.

Pomocí znalosti průtokových charakteristik vysokotlakých čerpadel a odporových součinitelů celé univerzální stanice byly stanoveny průtokové a tlakové charakteristiky mezi kolenem DN400 a sacím kotlem i pro provoz těchto čerpadel. Postup výpočtu je podrobně popsán v kapitole (6.1). Ve výsledných charakteristikách je vidět výrazné stržení výsledných křivek z důvodu kavitace čerpadel.

Další možnost regulace spádu a průtoku na model, kterou se již tato práce nezabývá, je škrcení čerpadel pomocí ventilů umístěných na jejich výtlačných větvích. Při dalším měření zkušební stanice by bylo vhodné pro získání přesnějších výsledků umístění tlakového odběru i na výtlačnou větev nízkotlakého čerpadla nejlépe před napojení regulačních obtoků.

Doufám, že tato práce bude vhodným podkladem pro obsluhu univerzální měřicí stanice a bude z ní možné čerpat potřebné informace.

## 8 Seznam použitého značení

<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Rozměr</i>
$\rho$	hustota	$\text{kg.m}^{-3}$
$v$	střední rychlost	$\text{m.s}^{-1}$
$S$	průtočná plocha	$\text{m}^2$
$Q$	průtok	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$g$	gravitační zrychlení	$\text{m.s}^{-2}$
$p$	tlak	Pa
$\alpha$	Coriolisovo číslo	-
$Y$	měrná energie	$\text{J.kg}^{-1}$
$R$	odporový součinitel	$\text{m}^{-4}$
$\lambda$	třecí součinitel	-
$D$	průměr potrubí	m
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$\xi$	ztrátový součinitel místního odporu	-
$l_e$	ekvivalentní délka místního odporu	m
$Y_{z,M}$	ztráta měrné energie v místním odporu	$\text{J.kg}^{-1}$
$Y_{Tc}$	celková ztrátová měrná energie tratě	$\text{J.kg}^{-1}$
$Y_{\check{c}}$	měrná energie čerpadla	$\text{J.kg}^{-1}$
$R_T$	odporový součinitel hlavní větve tratě	$\text{m}^{-4}$
$R_C$	celkový odporový součinitel dané varianty zapojení	$\text{m}^{-4}$
$R_i$	ztrátové součinitele jednotlivých částí tratě	$\text{m}^{-4}$
$R_{oi}$	ztrátové součinitele jednotlivých obtoků	$\text{m}^{-4}$
$R_M$	ztrátový součinitel modelu	$\text{m}^{-4}$
$Q_i$	průtok jednotlivými částmi tratě	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$Q_{oi}$	průtok jednotlivými obtoky	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$Q_{\max}$	maximální průtok čerpadla, než začne kavitovat	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$n$	otáčky oběžného kola nízkotlakého čerpadla	$\text{s}^{-1}$



<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Rozměr</i>
t	teplota vody v sacím kotli	°C
H	výška místa od vztažné roviny	m
K	index označující koleno DN400	-
Kt	index označující sací kotel	-
M1	index označující místo těsně před modelem	-
M2	index označující místo těsně za modelem	-
V1, V2	indexy místa tlak. odběrů na výtlaku vysokotl. čerpadel	-
S	index místa tlakového odběru na sání čerpadel	-

## 9 Seznam použité literatury

---

- [1] DEBRECZENI, O. *Potrubiční technika - provizorní učební texty*. Brno : VUT, 2005.  
Fakulta strojního inženýrství.
- [2] Kolář, V; Vinopal, St. *Hydraulika průmyslových armatur*, SNTL-SVTL, Praha 1963,  
L 13-E1-IV-41/2057.
- [3] Chudý, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M. *Meranie technických veličín*,  
1. vydanie, Bratislava: STU, 1999, 688 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] ŠOB,F.: *Hydromechanika*; učební text VUT Brno – FSI, Akademické  
nakladatelství CERM, Brno 2002, ISBN 80-214-2037-5.

## 10 Seznam příloh

---

### Příloha č. 1 - CD

- diplomová práce – elektronická verze (pdf)
- protokol.xls – kompletní výpočet v programu MS EXCEL
- 3dmodel.SLDPRT – 3D model stanice v programu SolidWorks 2006