

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta Strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



Bakalářská práce

Tlaková ztráta zvláštních hydraulických prvků

Autor bakalářské práce:

Jakub Dostál

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Kolínský

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **p. Jakuba Dostála**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Tlaková ztráta zvláštních hydraulických prvků**

název anglicky: **Pressure drop of special hydraulic components**

Zásady pro vypracování:

- 1) Navrhněte geometrii zkratu potrubní cesty, případně varianty tohoto zkratu.
- 2) Pro vybrané varianty zkratu proměřte tlakové poměry potrubní sítě pro různé průtoky.
- 3) Stanovte ztrátové součinitele jednotlivých úseků potrubní sítě.
- 4) Výsledky měření zpracujte a kriticky zhodnoťte.

Rozsah průvodní zprávy: přibližně 30 stran včetně obrázků

Rozsah grafických prací:

Seznam doporučené literatury:

Dle průběžných konzultací s vedoucím práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kolínský

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou práci včas, je povinen tuto skutečnost předem písemně zdůvodnit, pokud bude omluva (předaná prostřednictvím studijního oddělení děkanovi) děkanem uznána, určí děkan studentovi náhradní termín konání státní závěrečné zkoušky (zůstávají dva termíny SZZ). Pokud tuto skutečnost student řádně neomluví, nebo omluva nebude děkanem uznána, určí děkan studentovi termín pro opakování státní závěrečné zkoušky. SZZ je možné opakovat pouze jednou (SZŘ čl. 22, odst. 3, 4)

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne:

.....

Student

.....
Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112

.....
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 30. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především Ing. Janu Kolínskému za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat také dalším zaměstnancům Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, kteří byli ochotni podělit se o své pracovní a pedagogické zkušenosti.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na oblast hemodynamiky, konkrétně na problematiku arteriovenózního (A-V) zkratu. A-V zkrat je propojení žíly a tepny prováděné v těle pacienta, který má nastoupit na hemodialýzu.

Práce je založena na experimentu, jehož úkolem je popsat chování A-V zkratu, když jím protéká tekutina. Cílem je proměřit tlakové ztráty A-V zkratu a určit jeho ztrátové součinitele při různých variantách zapojení.

Klíčová slova

A-V zkrat, arteriovenózní zkrat, hemodynamika, hydromechanika, hydrodynamika, tlaková ztráta, měření tlaku, zvláštní hydraulické prvky.

Abstract

The bachelor work is focused on the area of hemodynamics, especially on the issue of arteriovenous (A-V) shunt. A-V shunt is a connection between vein and artery, which is realized in body of a patient, who is about to undergo hemodialysis.

The work is based on an experiment, whose mission is to describe behaviour of A-V shunt, while fluid flows through it. The aim is to measure pressure drop of A-V shunt and define its drop coefficient for different variants of connection.

Key words

A-V shunt, arteriovenous shunt, hemodynamics, hydromechanics, hydrodynamics, pressure drop, pressure measurement, special hydraulic components.

Obsah

1	Seznam použitých symbolů.....	- 10 -
1.1	Základní symboly	- 10 -
1.2	Význam indexů.....	- 11 -
2	Úvod.....	- 12 -
2.1	Motivace	- 12 -
2.2	Cíl práce.....	- 13 -
2.3	Analytický popis problému	- 14 -
2.3.1	Rovnice kontinuity	- 14 -
2.3.2	Bernoulliho rovnice.....	- 14 -
3	Experimentální řešení.....	- 17 -
3.1	Popis měřicí trati.....	- 17 -
3.1.1	Model A-V zkratu	- 18 -
3.1.2	Čerpadlo	- 19 -
3.1.3	Tlakové snímače.....	- 19 -
3.1.4	Model periferie	- 21 -
3.2	Přehled variant zapojení	- 24 -
3.3	Postup prací	- 26 -
3.3.1	Stanovení ztráty periferie a určení průtoku	- 26 -
3.3.2	Měření variant A-V zkratu v síti	- 29 -
3.3.3	Měření samotného A-V zkratu	- 30 -
4	Analýza experimentu a výsledky	- 31 -
4.1	Stanovení konstant a rozměrů.....	- 31 -
4.2	Rovnice a vztahy pro jednotlivé varianty	- 32 -
4.2.1	Varianta <i>po směru</i> s periferií.....	- 32 -
4.2.2	Varianta <i>proti směru</i> s periferií	- 35 -

4.2.3	Varianta <i>po směru</i> bez periferie	- 37 -
4.2.4	Varianta <i>proti směru</i> bez periferie	- 38 -
4.3	Výsledky a jejich zhodnocení.....	- 39 -
4.3.1	Varianta <i>po směru</i> s periferií.....	- 39 -
4.3.2	Varianta <i>proti směru</i> s periferií	- 41 -
4.3.3	Varianta <i>po směru</i> bez periferie	- 43 -
4.3.4	Varianta <i>proti směru</i> bez periferie	- 48 -
4.3.5	Porovnání všech měřených variant	- 53 -
5	Závěr.....	- 56 -
5.1	Shrnutí pracovních úkonů.....	- 56 -
5.2	Diskuze výsledků.....	- 56 -
5.3	Možné budoucí navazující práce	- 57 -
6	Přehled použitých zdrojů.....	- 58 -
7	Přílohy	- 59 -
7.1	Kalibrace tlakových snímačů.....	- 59 -
7.2	Hodnoty pro jednotlivé varianty	- 61 -
7.2.1	Varianta jen s periferií.....	- 61 -
7.2.2	Varianta <i>po směru</i> s periferií.....	- 62 -
7.2.3	Varianta <i>proti směru</i> s periferií	- 63 -
7.2.4	Varianta <i>po směru</i> bez periferie	- 64 -
7.2.5	Varianta <i>proti směru</i> bez periferie	- 65 -

1 Seznam použitých symbolů

1.1 Základní symboly

Symbol	Jednotka	Význam
\dot{Q}	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový tok
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudění
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita použité tekutiny – vody
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota použité tekutiny – vody
d_{char}	$[m]$	Charakteristický rozměr pro výpočet Re
d	$[m]$	Vnitřní průměr potrubí měřicí trati
L	$[m]$	Délkové rozměry úseků měřicí trati
Re	$[1]$	Reynoldsovo číslo
λ	$[1]$	Součinitel třecích ztrát
ξ	$[1]$	Ztrátový součinitel pro místní ztrátu
p_{zt}	$[Pa]$	Třecí ztráta s rozměrem tlaku
p_{zm}	$[Pa]$	Místní ztráta s rozměrem tlaku
Δp	$[Pa]$	Tlaková ztráta, rozdíl tlaku
U	$[V]$	Napětí na čerpadle pro regulaci průtoku
k	$[Pa \cdot mV^{-1}]$	Statická citlivost tlakového snímače

1.2 Význam indexů

Index	Význam
X_{Σ}	Veličina X se vztahuje ke společné části trati Například průtok: \dot{Q}_{Σ}
X_{per}	Veličina X se vztahuje k periférii Například průtok: \dot{Q}_{per}
X_{AV}	Veličina X se vztahuje k A-V zkratu Například průtok: \dot{Q}_{AV}
L_{po}	Délky jednotlivých úseků při variantě <i>po směru</i> Například: L_{1po}
L_{proti}	Délky jednotlivých úseků při variantě <i>proti směru</i> Například: L_{1proti}
X_B	Hodnoty X se vztahují k variantě <i>po směru</i> s periférií Například ztrátový součinitel: ξ_{AVB}
X_C	Hodnoty X se vztahují k variantě <i>proti směru</i> s periférií Například ztrátový součinitel: ξ_{AVC}
X_D	Hodnoty X se vztahují k variantě <i>po směru</i> bez periferie Například ztrátový součinitel: ξ_{AVD}
X_E	Hodnoty X se vztahují k variantě <i>proti směru</i> bez periferie Například ztrátový součinitel: ξ_{AVE}
ξ_{AV}	Ztrátový součinitel A-V zkratu pro rozdělení proudu Například pro variantu <i>po směru</i> s periférií: ξ_{BAV}
ξ'_{AV}	Ztrátový součinitel A-V zkratu pro spojení proudu Například pro variantu <i>po směru</i> s periférií: ξ'_{BAV}
ξ_{AVX}	Celkový ztrátový součinitel A-V zkratu pro danou variantu Například pro variantu <i>po směru</i> s periférií: ξ_{AVB}
Δp_{ij}	Rozdíl tlaku mezi snímačem i a j Například mezi snímačem 5 a 3: Δp_{53}

2 Úvod

2.1 Motivace

[1]

Bakalářská práce je zaměřena na oblast hemodynamiky, což je vědecká disciplína zabývající se prouděním krve v různých částech těla a za různých okolností.

Hlavním zkoumaným problémem je tak zvaný arteriovenózní zkrat (zkráceně jen A-V zkrat, nebo anglicky A-V shunt). Jedná se o vytvoření komunikace (přemostění) mezi tepnou a žílou, které je nutné pro napojení pacienta na dialyzační přístroj při hemodialýze.

Hemodialýza je postup, při kterém je krev čištěna právě pomocí dialyzačního přístroje (tak zvané umělé ledviny). Tento proces nahrazuje přirozenou funkci ledvin, kterou je odstranění odpadních látek z krve, u pacientů, kteří tuto schopnost ztratili. Během děje se krev odvádí jednou jehlou do přístroje a očištěná se pak druhou jehlou vrací zpět do těla. Hluběji je tento princip oblastí zkoumání medicíny.

V bakalářské práci se tedy zaměřím na již zmíněný A-V zkrat z hlediska technického. Z člověka není možné odčerpát celý objem krve najednou, filtrace tedy probíhá většinou v pěti cyklech. To znamená, že během pár hodin je třeba přečerpát přibližně 25 litrů krve. V žíle je tedy nutný zvýšený průtok, kterého se docílí vytvořením A-V zkratu. K největším tlakovým ztrátám v cévním systému dochází v periferních oblastech těla, které jsou protkány vlásečnicemi. Jedná se o velmi úzké kapilární žíly, na kterých vlivem záhybů a malých průměrů dochází ke zmíněným ztrátám. Propojením tepny s žílou se tato oblast obejde a v žíle značně stoupne průtok. Ten tak dosahuje hodnot 500 až 1 000 ml/min, oproti běžným řádově desítkám až pár stovkám ml/s. Odčerpání krve tedy probíhá rychleji, než kdyby byla odebírána pouze klasicky z žíly.

2.2 Cíl práce

Cílem práce bylo proměřit chování A-V zkratu v závislosti na průtoku při různých možnostech jeho zapojení a zaměřit se především na tlakové ztráty tohoto prvku v síti. Tedy v případě, kdy tekutina neprotéká pouze daným prvkem, ale část proudu pokračuje v jiné větvi. Záměrem bylo sledovat rozdíly při uspořádání *po směru* a *proti směru*, které odpovídají skutečnému provedení arteriovenózního zkratu.

Zkoumání chování A-V zkratu zapojeného v síti nebylo jediným záměrem bakalářské práce. Dalším cílem bylo popsat A-V zkrat jako samostatný prvek trati, tedy jako by se jednalo o dvě zvláštní kolena. Úkolem bylo se opět zaměřit zvlášť na dva případy. A to sice na případ, kdy je první odbočení *po směru*, a na případ, kdy je naopak toto odbočení *proti směru* proudu.

Výsledkem celé bakalářské práce by mělo být určení ztrátových součinitelů pro všechny čtyři výše popsané varianty.

2.3 Analytický popis problému

Hydrodynamika je vědní disciplína, která se zabývá prouděním kapalin a plynů. Při proudění musí být, stejně jako ve fyzice obecně, zachovány zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. V oblasti mechaniky tekutin jsou tyto zákony charakterizovány dvěma základními rovnicemi, a sice rovnicí kontinuity a Bernoulliho rovnicí.

2.3.1 Rovnice kontinuity

[2]

Rovnice kontinuity je vyjádření zákona zachování hmotnosti. Pokud se zabýváme nestlačitelnými tekutinami, tedy tekutinami se stálou hustotou, musí být jejich průtok konstantní. Vychází se z rovnosti hmotnostních toků ve dvou různých průřezech:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.3.1 - 1)$$

Hmotnostní tok se vyjádří jako součin hustoty a objemového toku. Objemový tok se označuje buď \dot{V} , nebo častěji \dot{Q} :

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{Q} = \rho \cdot \frac{V}{t} = \rho \cdot \frac{A \cdot l}{t} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.3.1 - 2)$$

Po dosazení rovnice (2.3.1 - 2) do rovnice (2.3.1 - 1) a podělení hustotou, která je konstantní, získáváme vztah:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \quad (2.3.1 - 3)$$

což je rovnice kontinuity.

2.3.2 Bernoulliho rovnice

[2]

Bernoulliho rovnice je vyjádření zákona zachování energie. Změna celkové energie soustavy je rovna rozdílu přivedeného tepla a vykonané práce:

$$\Delta E = Q - W \quad (2.3.2 - 1)$$

Celková energie tekutiny je rovna součtu vnitřní energie U , potenciální energie E_p , kinetické energie E_k a tlakové energie E_t :

$$E = U + E_p + E_k + E_t [J] \quad (2.3.2 - 2)$$

Vnitřní energie ideálních tekutin závisí pouze na teplotě a určí se jako součin hmotnosti, měrné tepelné kapacity při stálém objemu a termodynamické teploty:

$$U = m \cdot c_V \cdot T \quad (2.3.2 - 3)$$

Potencionální energie je rovna práci, která je nutná k přemístění tělesa o určité hmotnosti m do výšky h v gravitačním poli s tíhovým zrychlením g :

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.3.2 - 4)$$

Kinetická energie se určí dle známého vzorce:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.3.2 - 5)$$

Tlaková energie odpovídá práci, kterou musí vykonat píst k protlačení tělesa (tekutiny) do prostoru s tlakem p . Tato práce je rovna součinu síly F a dráhy pístu l . Sílu F lze následně rozepsat jako součin tlaku p a plochy pístu A . Součin plochy A a délky l se rovná objemu V pístem protlačeného tělesa (tekutiny):

$$E_t = F \cdot l = p \cdot A \cdot l = p \cdot V \quad (2.3.2 - 6)$$

Při výpočtech se ale běžně používá spíše měrná energie, což je energie vztažená na jednotku hmotnost:

$$e = u + e_p + e_k + e_t \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (2.3.2 - 7)$$

Jelikož jsou měrné energie vztažené na jednotku hmotnosti, stačí vzorce pouze podělit hmotností. Protože je objem roven podílu hmotnosti k hustotě, bude pak pro měrnou tlakovou energii platit:

$$e_t = \frac{p}{\rho}$$

Pro dvě libovolná místa 1 a 2 v tekutině (prostoru obecně) platí, že celkový rozdíl energie mezi oběma místy je roven součtu rozdílů jejích jednotlivých složek:

$$\Delta e_{12} = \Delta u_{12} + \Delta e_{p_{12}} + \Delta e_{k_{12}} + \Delta e_{t_{12}} \quad (2.3.2 - 8)$$

Po dosažení jednotlivých vztahů do rovnice (2.3.2 - 8) získáme vztah:

$$(u_2 - u_1) + g \cdot (y_2 - y_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = q - w \quad (2.3.2 - 9)$$

Výška h ve složce potenciální energie je zde dána rozdílem y-ových souřadnic y_1 a y_2 mezi danými místy.

Pokud nebudeme uvažovat přívod tepla ($q = 0$) a konání práce ($w = 0$), zůstane teplota konstantní ($u_1 = u_2$). Po úpravě vztahu (2.3.2 – 9) pak získáme Bernoulliho rovnici vyjádřenou ve formě měrných energií:

$$g \cdot y_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot y_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.3.2 - 10)$$

Pokud rovnici (2.3.2 – 10) vynásobíme hustotou, získáme Bernoulliho rovnici ve formě, kde každý člen má rozměr tlaku:

$$\rho \cdot g \cdot y_1 + p_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho}{2} = \rho \cdot g \cdot y_2 + p_2 + \frac{v_2^2 \cdot \rho}{2} \quad (2.3.2 - 11)$$

Při průtoku reálné tekutiny potrubím dochází k disipaci energie. Rozšířená Bernoulliho rovnice v rozměru měrných energií pak má tvar:

$$g \cdot y_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot y_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_{z_{12}} \quad (2.3.2 - 12)$$

Použijeme-li Bernoulliho rovnici v tlakové formě, promítně se do ní ztrátová energie v podobě ztrátového tlaku:

$$\rho \cdot g \cdot y_1 + p_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho}{2} = \rho \cdot g \cdot y_2 + p_2 + \frac{v_2^2 \cdot \rho}{2} + p_{z_{12}} \quad (2.3.2 - 13)$$

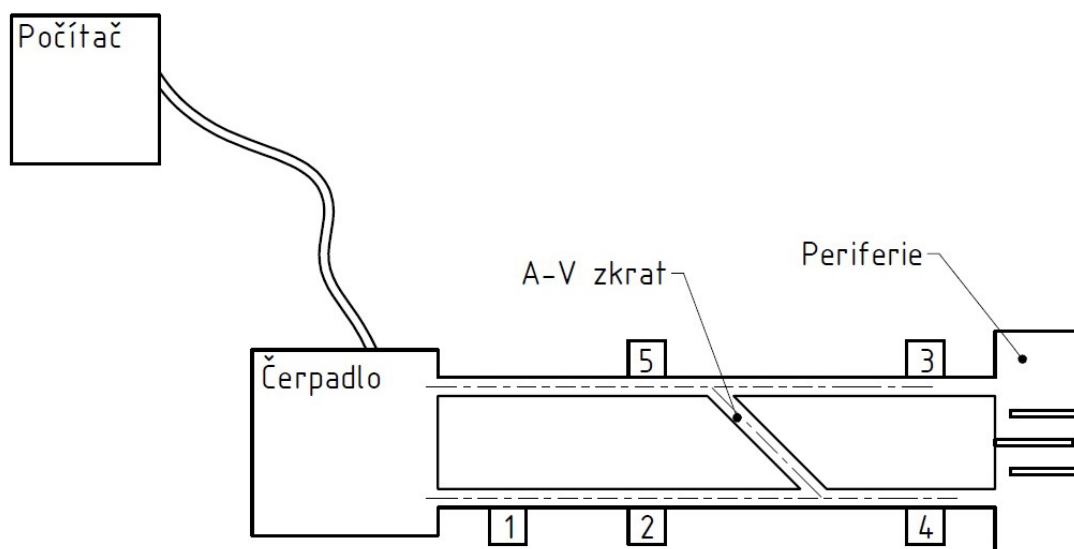
V bakalářské práci bude podstatná právě Bernoulliho rovnice v tlakové formě. Vzhledem k tomu, že celá měřicí trať je ve vodorovné poloze, a všechny její části jsou tedy ve stejné výšce, z rovnice vypadnou členy představující potenciální energii. Získám tak tento tvar rozšířené Bernoulliho rovnice:

$$p_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho}{2} = p_2 + p_{z_{12}} + \frac{v_2^2 \cdot \rho}{2} \quad (2.3.2 - 14)$$

3 Experimentální řešení

3.1 Popis měřicí trati

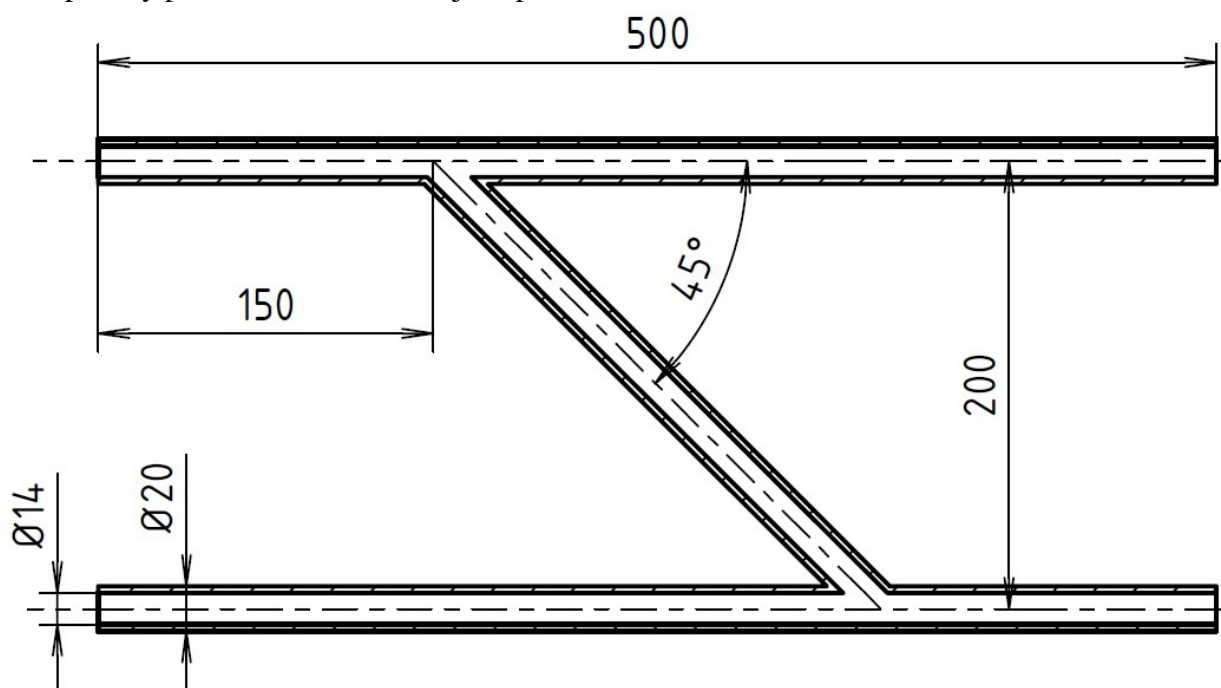
Mnou použitá soustava se skládala z následujících částí. Aktivním členem bylo počítačem ovládané čerpadlo, které bylo prostřednictvím hadic propojeno s měřicí trati. Samotná měřicí trať byla sestavena z potrubí o vnějším průměru 20mm a vnitřním průměru 14mm a umožňovala vyjmutí její části délky 500mm v obou směrech, jejichž osová vzdálenost byla 200mm. Rozměry mnou navrženého členu potrubí, představujícího jednu z možností provedení A-V zkratu, se pak odvíjely od těchto parametrů měřicí trati. Všechny části trati byly z průhledného materiálu – průhledné gumové hadice a potrubí, model A-V zkratu a periferie z plexiskla. Schéma celé soustavy je zobrazeno na obrázku č. 3-1. Čtverečky s čísly rozmístěné podél potrubí znázorňují tlakové snímače. Čísla odpovídají skutečnému číselnému označení snímačů v laboratoři.



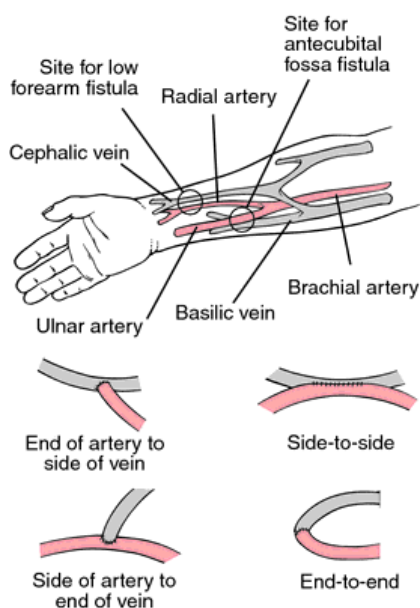
Obrázek č. 3-1: Schéma měřicí trati

3.1.1 Model A-V zkratu

Zpravidla se A-V zkrat provádí na nedominantní horní končetině na předloktí, přičemž existuje několik možností propojení žíly a tepny v těle pacienta. Pro měření bylo nutné vytvořit soustavu potrubí, která by se svým provedením co možná nejvíce podobala skutečnosti. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl pro potrubí uspořádané do tvaru písmene N. Tvar a rozměry byly navrženy s ohledem na měřicí soustavu, která byla k dispozici. Výměnný model A-V zkratu je znázorněn na obrázku č. 3-2. Další v praxi používané způsoby provedení A-V zkratu jsou patrné z obrázku č. 3-3.



Obrázek č. 3-2: Mnou měřené provedení A-V zkratu



Obrázek č. 3-3: Přehled používaných provedení A-V zkratu [3]

3.1.2 Čerpadlo

Pro vytvoření proudu bylo použito pulzní čerpadlo, jehož pomocí jsem mohl měnit nejen hodnoty toku, ale i jeho časový průběh. Důležitou vlastností čerpadla je lineární závislost průtoku na elektrickém napětí. Přes počítač jsem tedy měnil hodnotu napětí, která byla přímo úměrná generovanému průtoku. U čerpadla použitého při experimentu platí, že maximální napětí 4 V odpovídá průtoku 90 ml/s. Z této znalosti lze snadno určit vztah pro přepočet napětí na průtok:

$$\dot{Q}_{\Sigma}[\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}] = U[\text{V}] \cdot 22,5 \quad (3.1.2 - 1)$$

3.1.3 Tlakové snímače

Existuje spousta druhů tlakových snímačů. Základní dělení snímačů je podle toho, zda se k měření využívá definiční princip měřené veličiny, či nikoliv. V případě tlaku je definičním principem síla na plochu, popřípadě hydrostatický tlak. Snímače vycházející přímo z definičního principu se nazývají etalony.

Podle funkčního principu a definičních vztahů lze tlakoměry rozdělit do následujících skupin. Zvonové a pístové snímače jsou etalonové tlakoměry sloužící ke kalibraci dalších (deformačních) snímačů. U zvonových se měří zdvih zvonu. Zvon je v podstatě válec ponořený dnem vzhůru do kapaliny a v klidu plove na hladině. Je-li pod zvon přiveden tlak, začne se zvon zvedat a tlak je úměrný jeho zdvihu L ($p = L \cdot \rho \cdot g$). Pístové snímače využívají rovnováhu mezi tlakem způsobeným závažím působícím na píst o známé ploše a tlakem přivedeným pod píst. Elektrické tlakové snímače využívají tlakové závislosti elektrické veličiny. V praxi nejběžněji používané jsou však tlakoměry deformační, kde tlaku odpovídá deformace pružného prvku. Nejčastěji se jedná o trubicové a membránové snímače tlaku. [4]

Další možností dělení senzorů je podle toho, zda měří tlak absolutní, nebo diferenční (tlakové rozdíly).

V našem případě byly použity deformační membránové snímače TSZ od výrobce BHV Sensory. Jedná se o senzory absolutního tlaku, které mohou být použity pro statická i dynamická měření tlaku. Jejich základním prvkem je nerezová membrána s polovodičovým čidlem a výstupem ze snímačů je elektrické napětí. [5]

Protože mezi měřeným tlakem a výstupním napětím senzoru platí přímá úměrnost, lze napětí snadno přepočítat na tlak. K tomuto převodu bylo ale nutné před samotným měřením každý tlakoměr kalibrovat. Kalibrace byla provedena jednoduchou metodou. Senzor jsem pomocí závitů na jeho měřicí části našrouboval ke dnu dlouhé trubky z plexiskla, na kterou jsem udělal výškovou stupnici. Do trubky jsem postupně přiléval vodu a pro danou výšku hladiny h odečítal výstupní napětí. Tlak jsem snadno určil pomocí vztahu pro hydrostatický tlak:

$$p_h = h \cdot \rho \cdot g$$

Následně jsem vytvořil graf závislosti tlaku na výstupním napětí, v Excelu proložil lineární spojnicí a vygeneroval rovnici přímky. Rovnice přímky má tvar:

$$y = k \cdot x + c,$$

kde k odpovídá tangentě úhlu mezi přímkou a osou x ; c je posun ve směru osy y . Hodnotu k lze použít jako převodní konstantu napětí na tlak pro daný snímač. Tím jsem získal rovnici tlaku jako funkce napětí:

$$p_i = k_i \cdot U_i + c_i,$$

kde index i značí obecný snímač.

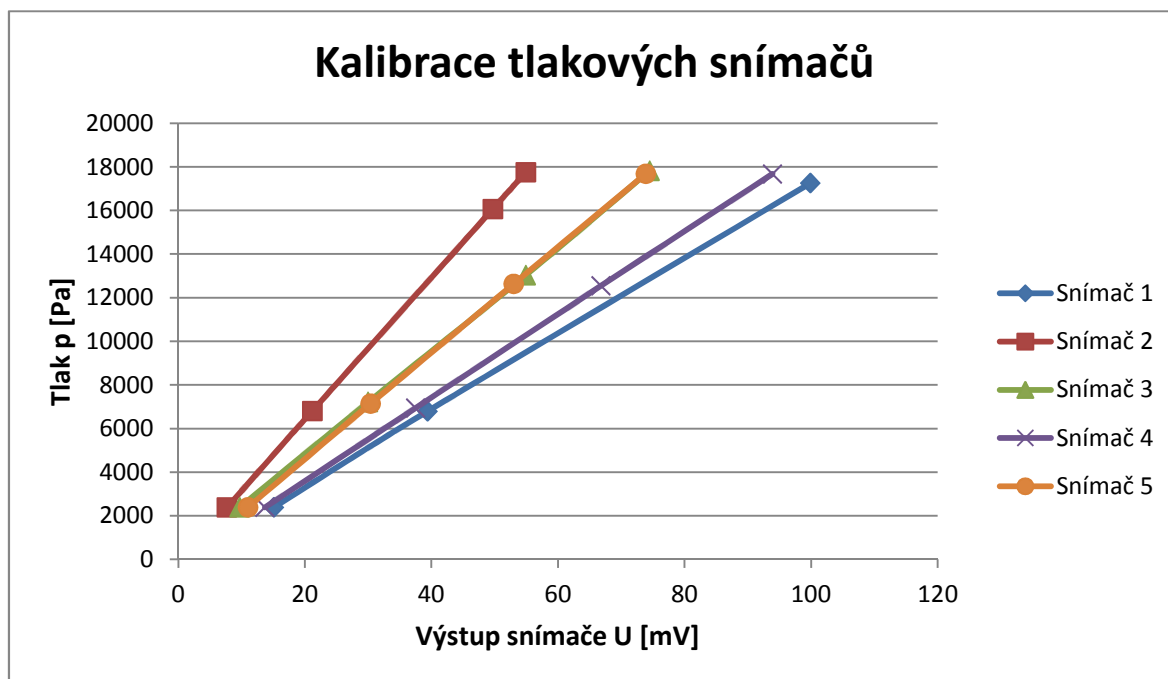
Při zjišťování přírůstku nemá konstanta c žádný vliv (její derivace je rovna nule). Vztah pro určení rozdílu tlaku potom tedy je:

$$\Delta p_i [Pa] = k_i \cdot \Delta U_i [mV],$$

přičemž konstanta k_i je statická citlivost tlaku na napětí pro daný snímač i .

Kalibrační křivky snímačů jsou vyneseny v grafu č. 3-1.

Kompletní data ke kalibraci jsou uvedena v příloze 7.1. Z grafu závislosti tlaku na výstupním napětí snímače (tak zvaná statická charakteristika) jsem pro jednotlivé tlakové snímače určil rovnici přímky a zjistil statickou citlivost.



Graf č. 3-1: Kalibrace tlakových snímačů

3.1.4 Model periferie

Periferie je část měřicí trati, ve které se proud začíná vracet zpět do čerpadla. Aby se celkový průtok dělil do A-V zkratu a periferie v rozumném poměru, potřeboval jsem periferní část s takovými vlastnostmi, aby na ní byla vhodná tlaková ztráta. Rozumným poměrem proudu se rozumí takový poměr, aby periferií neprocházela naprostá většina proudu a A-V zkratem pouze jeho minoritní část, nebo naopak, a hodnoty byly vůbec měřitelné. Oběma větvemi by měl procházet přibližně srovnatelný proud.

Proud, respektive rychlost proudění, závisí na rozdílu tlaku, jak je patrné z rovnice (2.3.2 – 14):

$$2 \cdot \frac{p_1 - (p_2 + p_{z12})}{\rho} = v_2^2 - v_1^2 \quad (3.1.4 - 1)$$

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot \frac{p_1 - (p_2 + p_{z12})}{\rho}} \quad (3.1.4 - 2)$$

Ze vzorce (3.1.4 – 2) vyplývá, že čím menší je hodnota ztrátového tlaku mezi místy 1 a 2, tím větší je rychlost proudění, tedy i průtok.

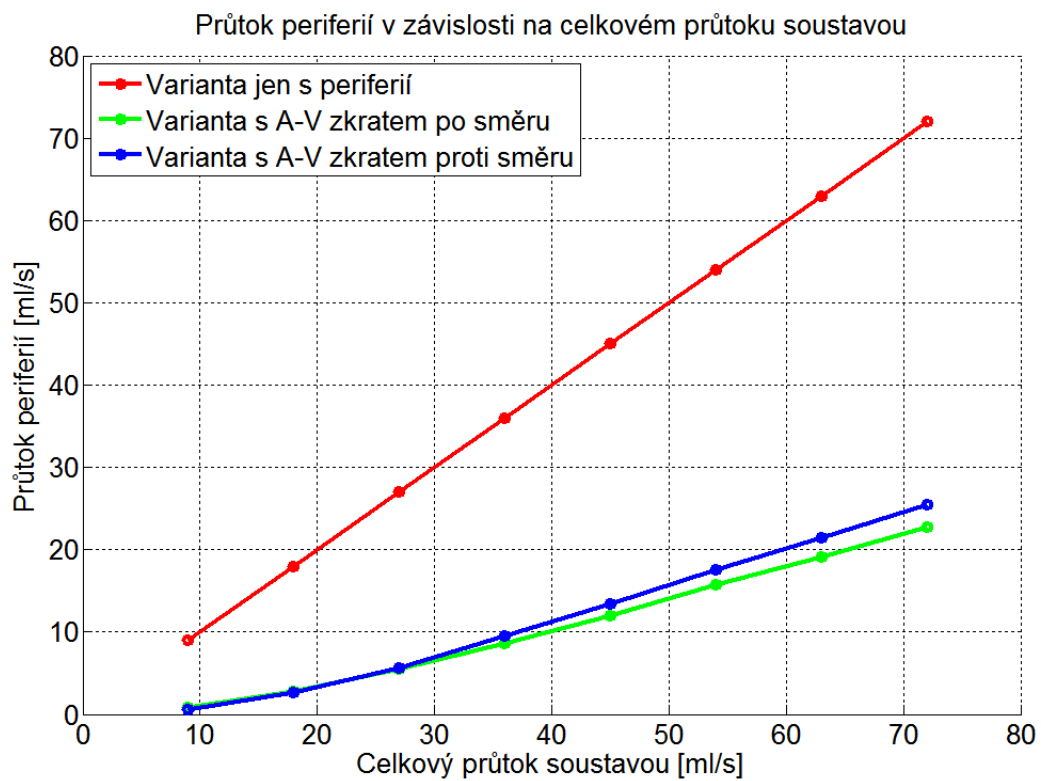
Původní periferní část netvořila dostatečnou tlakovou ztrátu, většina proudu tedy procházela přes ni a A-V zkratem protékalo minimum. Z tohoto důvodu jsem musel

vytvořit periferii s větší tlakovou ztrátou. Periferii jsem navrhl ve tvaru domečku a dovnitř umístil několik přepážek, které tvořily odpor vůči proudu. Do dna domečku jsem vytvořil otvor pro vypouštění kapaliny z měřicí trati, do jeho horní části zase otvor pro odvodu vzduchu. Mnou vyrobená periferie je na obrázku č. 3-4.



Obrázek č. 3-4: Periferie

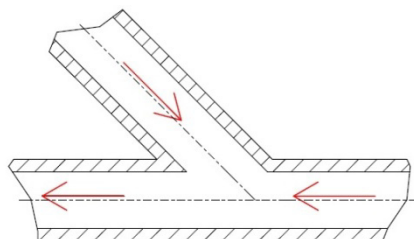
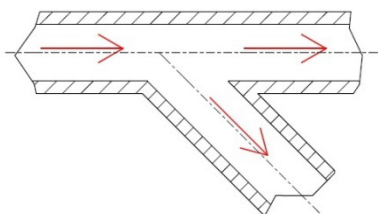
V grafu č. 3-2 je znázorněna závislost průtoku periferie na celkovém průtoku soustavou. Z této závislosti je patrné, že periferií protékala v režimech po směru i proti směru přibližně třetina celkového průtoku. Zbytek, tedy dvě třetiny průtoku generovaného čerpadlem, protékal A-V zkratem. Tento poměr průtoků byl pro měření vyhovující. Přímka varianty se samotnou periferií nemá hlubší význam, v grafu je vynesena pouze pro přehlednost. Tvoří osu grafu. Varianty měření budou vysvětleny v kapitole 3.2.



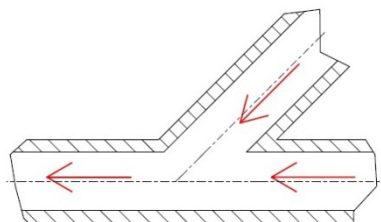
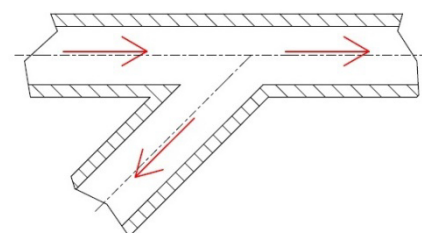
Graf č. 3-2: Závislost průtoku periferií na celkovém průtoku soustavou

3.2 Přehled variant zapojení

Při experimentu jsem proměřil celkem pět variant zapojení. Konkrétně se jednalo o případ A-V zkratu zapojeného v síti s periferií a případ samotného A-V zkratu. Oba případy byly měřeny ve dvou variantách, které se od sebe lišily směrem rozdělení (tedy i opětovného spojení) proudu. Varianty zapojení jsem se rozhodl pracovně nazvat právě podle směru rozdělení proudu přitékajícího do modelu A-V zkratu – tedy varianta *po směru* a *proti směru*. Znázornění těchto variant je na obrázcích č. 3-5 a č. 3-6.



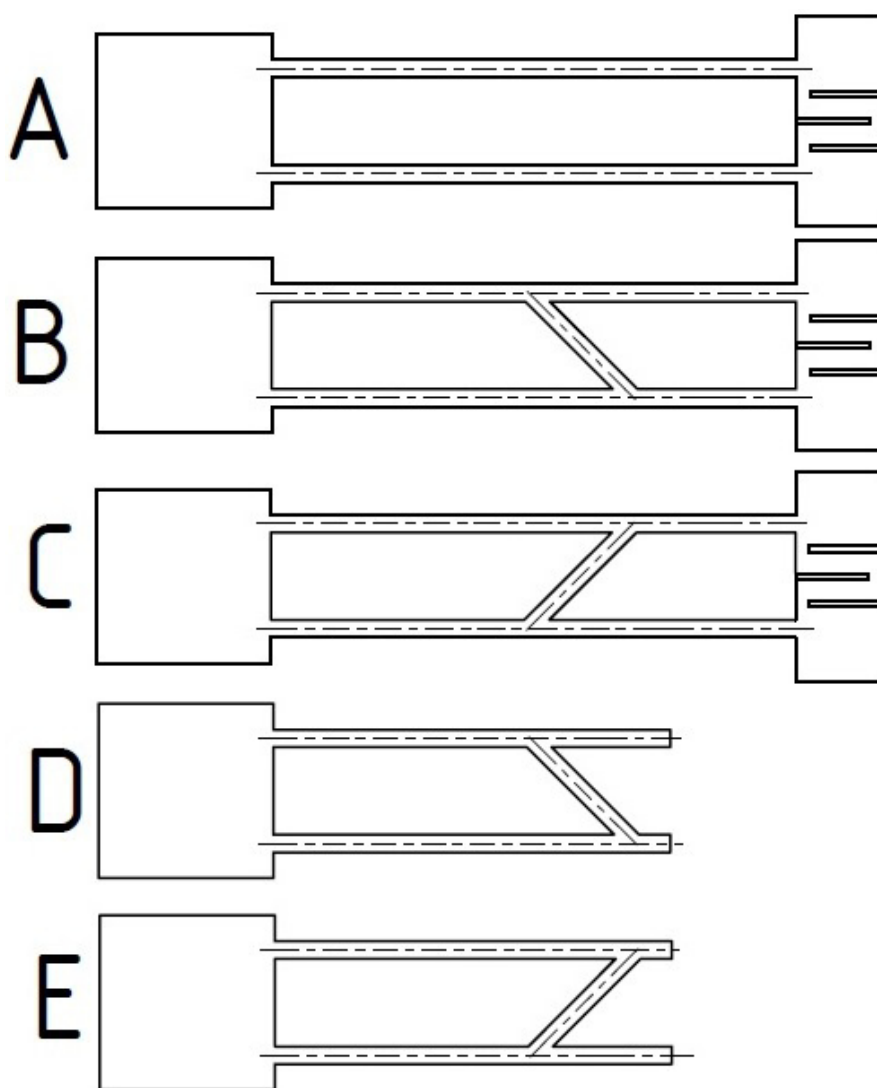
Obrázek č. 3-5: Varianta po směru



Obrázek č. 3-6: Varianta proti směru

Jakousi pomocnou variantou byl případ bez výměnné části představující A-V zkrat, tedy samotné periferní části měřicí trati. Tato varianta sloužila pro určení průtoku v obou větvích při zmíněných čtyřech hlavních případech měření. Tomuto problému se podrobně věnuje kapitola 3.3.1.

Kompletní schematický přehled variant zapojení je znázorněn na obrázku č. 3-7.



Obrázek č. 3-7: Přehled variant zapojení

Varianta A je případ bez A-V zkratu, B představuje variantu s A-V zkratem *po směru*, C variantu s A-V zkratem *proti směru*, D variantu samotného A-V zkratu *po směru* a E samotný A-V zkrat *proti směru*.

3.3 Postup prací

Zpracování bakalářské práce bylo založeno především na experimentu. Takto získaná data bylo poté nutné vyhodnotit a analyzovat. Jednotlivé kroky tohoto procesu jsou popsány v následujících kapitolách.

3.3.1 Stanovení ztráty periferie a určení průtoku

Při měření v síti bylo nutné určit, v jakém poměru se čerpadlem generovaný proud dělí na průtok A-V zkratem a průtok periferií. Právě z tohoto důvodu jsem provedl i měření samotné periferie. Ze změřených hodnot tlakových ztrát jsem pak byl schopen aproximací určit průtok periferií. Pro toto určení jsem vycházel z následující úvahy. Celková tlaková ztráta periferie je složena z místních ztrát, způsobených přítokem do periferní nádoby a přepážkami v ní (obecně tvarem měřicí trati), a ztrát třecích, způsobených prouděním tekutiny v potrubí.

Zatímco místní ztráta závisí na kvadrátu rychlosti proudění, třecí ztráta závisí na první mocnině rychlosti. Tuto skutečnost lze ověřit dosazením do následujících rovnic.

Vztah pro místní ztrátu má tento tvar:

$$p_{z_m} = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (3.3.1 - 1)$$

Vztah pro třecí ztrátu má tvar:

$$p_{z_t} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (3.3.1 - 2)$$

Pokud Reynoldsovo číslo nepřesáhne hodnotu 2 300, určí se součinitel třecích ztrát následovně:

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad Re \leq 2\,300 \quad (3.3.1 - 3a)$$

Leží-li hodnota Reynoldsova čísla v intervalu od 2 300 do 80 000, vypočítá se součinitel třecích ztrát takto:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}; \quad 2300 < Re \leq 80\,000 \quad (3.3.1 - 3b)$$

Ve větších hodnotách Reynoldsova čísla se mnou prováděná měření nepohybovala.

Reynoldsovo číslo určíme pomocí vztahu:

$$Re = \frac{v \cdot d_{char}}{\nu} \quad (3.3.1 - 4)$$

Charakteristický rozměr se určí jako čtyřnásobek průtočné plochy podělený smočeným obvodem. Při proudění v trubce je roven jejímu průměru:

$$d_{char} = \frac{4 \cdot A}{O} = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot d} = d \quad (3.3.1 - 5)$$

Pokud dosadíme vztahy (3.3.1 - 3) a (3.3.1 - 4) do rovnice (3.3.1 - 2), získáme vzorec pro výpočet třecí ztráty v této podobě:

$$p_{zt} = \frac{32 \cdot \nu \cdot l}{d^2} \cdot \rho \cdot v \quad (3.3.1 - 6)$$

Celková tlaková ztráta má charakter místní ztráty i třecí ztráty. Usoudil jsem tedy, že vztah mezi takovou ztrátou a průtokem by bylo možné charakterizovat kvadratickou rovnicí:

$$\Delta p_{per} = a \cdot \dot{Q}_{per}^2 + b \cdot \dot{Q}_{per}, \quad (3.3.1 - 7)$$

kde člen \dot{Q}_{per} značí průtok periferií. Člen Δp_{per} představuje tlakovou ztrátu na periférii a jedná se o přímo měřený rozdíl tlaku mezi tlakovým snímačem 3 a 4 (Δp_{34}), jak lze vidět na obrázku č. 3-1.

$$\Delta p_{per} = \Delta p_{34} = p_3 - p_4 \quad (3.3.1 - 8)$$

Tvar rovnice (respektive koeficienty a a b) byl určen v programu MATLAB pomocí tak zvaného fitování funkce. Průtok periferií pak je řešením kvadratické rovnice:

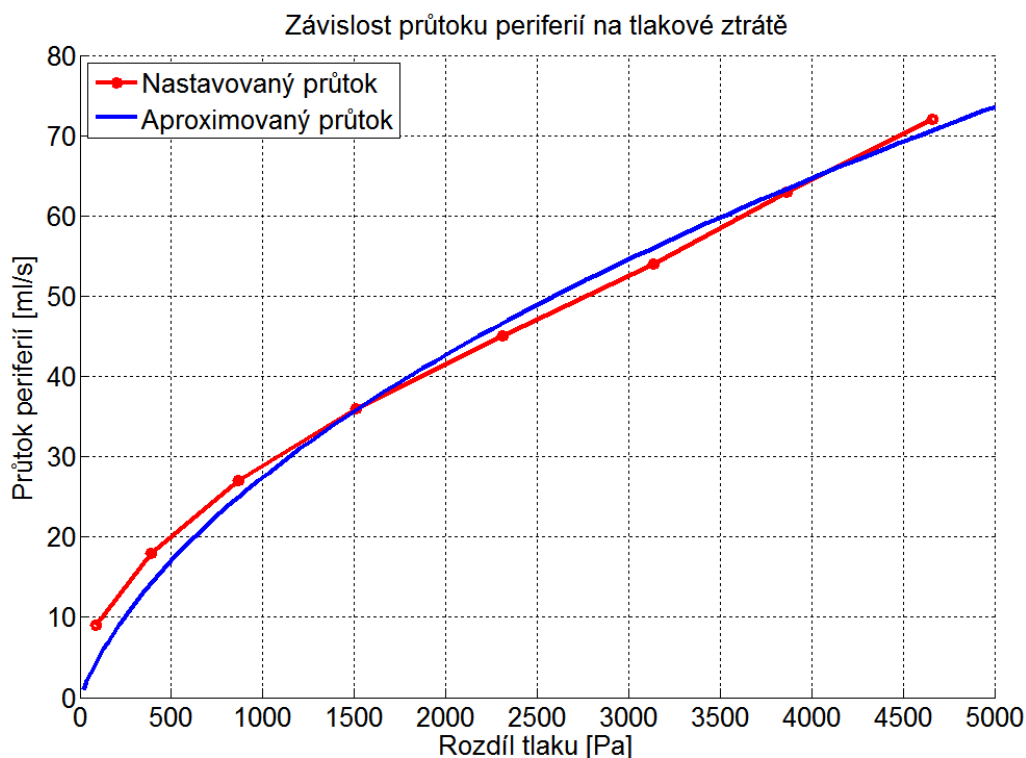
$$a \cdot \dot{Q}_{per}^2 + b \cdot \dot{Q}_{per} - \Delta p_{per} = 0$$

$$\dot{Q}_{per} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4 \cdot a \cdot \Delta p_{per}}}{2 \cdot a} \quad (3.3.1 - 9)$$

Řešením jsou 2 hodnoty, z nichž jedna je kladná a druhá záporná. Z logiky věci je jasné, že průtok se bude rovnat kladné hodnotě řešení rovnice.

Protože jsem v tomto režimu měření (samotná periferie v měřicí trati) znal skutečnou hodnotu průtoku přímo nastavovanou na čerpadle (proud se nikam nedělil),

je možné právě tento skutečný průtok snadno porovnat s průtokem určeným aproximací z naměřených hodnot tlakových ztrát periferie. Porovnání skutečného a aproximovaného průtoku je znázorněno v grafu č. 3-3.



Graf č. 3-3: Závislost skutečného (nastavovaného) a aproximovaného průtoku na tlakové ztrátě

Dalo by se tedy říci, že jsem tlakovou ztrátu periferie (v mém případě ztráta mezi tlakovým snímačem 3 a 4) použil jako průtokoměr. Od celkového průtoku, který byl přímo dán hodnotou napětí nastavenou na čerpadle (viz. kapitola 3.1.2), jsem při každém měření mohl odečíst průtok periferií (\dot{Q}_{per}) a získat tak průtok A-V zkratem (\dot{Q}_{AV}):

$$\dot{Q}_{AV} = \dot{Q}_{\Sigma} - \dot{Q}_{per} \quad (3.3.1 - 10)$$

Pro výpočty je potřeba znát rychlost proudění v obou větvích měřicí trati. Po stanovení průtoků lze rychlosti určit snadno.

Průtok (v našem případě pracujeme s objemovými průtoky) je objem tekutiny, který proteče za jednotku času. Lze ho jednoduchou úpravou vyjádřit jako součin plochy průřezu potrubí a rychlosti:

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot l}{t} = A \cdot v \quad (3.3.1 - 11)$$

Má-li potrubí kruhový průřez (plochu $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$), vypočítá se rychlost proudění pomocí následujícího vztahu:

$$v = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot d^2} \quad (3.3.1 - 12)$$

3.3.2 Měření variant A-V zkratu v síti

U obou variant zapojení (u varianty *po směru* i *proti směru*) se proud dělil. Dle obrázku č. 3-7 se jedná o varianty *B* a *C*. Celkový průtok soustavou \dot{Q}_Σ se určí z napětí nastaveného na čerpadle podle (3.1.2 – 1). Dále průtok periferií \dot{Q}_{per} určí pomocí vztahu (3.3.1 – 9) a průtok A-V zkratem \dot{Q}_{AV} potom pomocí vzorce (3.3.1 – 10). Pak po dosazení průtoků do vztahu (3.3.1 – 12) mohu vypočítat rychlost proudění periferií:

$$v_{per} = \frac{4 \cdot \dot{Q}_{per}}{\pi \cdot d^2} \quad (3.3.2 - 1)$$

a A-V zkratem:

$$v_{AV} = \frac{4 \cdot \dot{Q}_{AV}}{\pi \cdot d^2} \quad (3.3.2 - 2)$$

Rychlost ve společné části trati se vypočítá přímo z průtoku nastavovaného na čerpadle takto:

$$v_\Sigma = \frac{4 \cdot \dot{Q}_\Sigma}{\pi \cdot d^2} \quad (3.3.3 - 3)$$

Pro výpočet jednotlivých třecích ztrát bude třeba stanovit také součinitele třecích ztrát. Zde je opět nutné použít příslušný vzorec v závislosti na hodnotě Reynoldsova čísla, buď (3.3.1 – 3a), nebo (3.3.1 – 3b). Reynoldsovo číslo se opět určí podle vzorce (3.3.1 – 4), přičemž charakteristický rozměr je roven vnitřnímu průměru potrubí měřicí trati – viz vzorec (3.3.1 – 5).

Pro místní ztrátu platí výše uvedený vztah (3.3.1 – 1) a pro třecí ztrátu platí vztah (3.3.1 – 2).

3.3.3 Měření samotného A-V zkratu

Při těchto variantách zapojení v síti chybí periferie (dle obrázku č. 3-7 se jedná o varianty *D* a *E*), průtok A-V zkratem je proto roven průtoku celou soustavou, čili průtoku nastavovanému na čerpadle. Pro rychlost proudění v celé trati bude tedy platit:

$$v_{AV} = v_{\Sigma} = \frac{4 \cdot \dot{Q}_{\Sigma}}{\pi \cdot d^2} \quad (3.3.3 - 1)$$

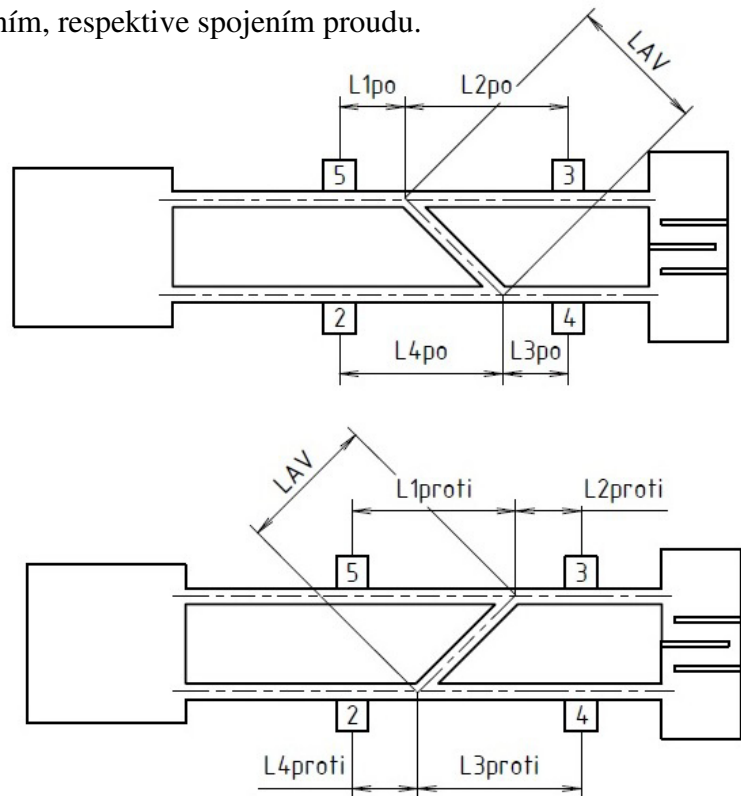
Pro výpočty dalších hodnot platí tytéž vztahy a zásady jako při měření variant A-V zkratu v síti.

4 Analýza experimentu a výsledky

4.1 Stanovení konstant a rozměrů

Hustota vody:	$\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	(při 20°C)
Kinematická viskozita vody:	$\nu = 1,016 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	(při 20°C)
Vnitřní průměr potrubí:	$d = 14 \text{ mm} = 0,014 \text{ m}$	
Délkové rozměry:	$L_{AV} = \frac{0,2}{\sin 45^\circ} = 0,283 \text{ m}$	(z geometrie)
	$L_{1po} = 0,1 + 0,15 = 0,25 \text{ m}$	
	$L_{2po} = 0,35 + 0,1 = 0,45 \text{ m}$	
	$L_{3po} = 0,1 + 0,15 = 0,25 \text{ m}$	
	$L_{4po} = 0,35 + 0,1 = 0,45 \text{ m}$	
	$L_{1proti} = 0,1 + 0,35 = 0,45 \text{ m}$	
	$L_{2proti} = 0,15 + 0,1 = 0,25 \text{ m}$	
	$L_{3proti} = 0,1 + 0,35 = 0,45 \text{ m}$	
	$L_{4proti} = 0,15 + 0,1 = 0,25 \text{ m}$	

Délky jsou pro přehlednost znázorněny na obrázku č. 4-1. Vždy se jedná o délku mezi tlakovým snímačem a rozdělením, respektive spojením proudu.



Obrázek č. 4-1: Délky použité při výpočtech

4.2 Rovnice a vztahy pro jednotlivé varianty

4.2.1 Varianta *po směru* s periferií

Tlaková ztráta mezi snímačem 5 a 3 je složena ze tří složek. Dvě složky jsou třecí ztráty, a to konkrétně třecí ztráta na délce L_{1po} při rychlosti proudění v_{Σ} a třecí ztráta na délce L_{2po} , zde již ale pouze při rychlosti v_{per} . Třetí složkou je místní ztráta na rozdělení proudu zapojení *po směru* při zohlednění pouze rychlosti periferní částí v_{per} . Při použití vztahu (3.3.1 – 2) pro třecí ztrátu získám následující vztah:

$$\Delta p_{53B} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{Bper} + \lambda_{Bper} \cdot \frac{L_{2po}}{d} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 1)$$

Analogicky lze sestavit rovnici pro tlakovou ztrátu mezi snímačem 4 a 2. Celková ztráta bude složena z třecí ztráty na délce L_{3po} při rychlosti v_{per} , místní ztráty na sloučení proudu zapojení *po směru* (sloučení je nyní proti směru) při zohlednění pouze rychlosti periferní částí v_{per} a opět třecí ztráty na délce L_{4po} již při rychlosti proudění v_{Σ} . Potom dostanu tuto rovnici:

$$\Delta p_{42B} = \lambda_{Bper} \cdot \frac{L_{3po}}{d} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{Bper} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 2)$$

Další rovnicí, kterou je možné použít, je vztah pro tlakovou ztrátu mezi snímačem 5 a 2. Zde jsou dvě možné smyčky, o to sice cesta přes periferii a cesta přes A-V zkrat.

Cestou přes periferii se bude tlaková ztráta Δp_{52} skládat ze ztrát Δp_{53} , tlakové ztráty periferie Δp_{per} a Δp_{42} . Tlaková ztráta periferie je totéž co Δp_{34} – viz (3.3.1 – 8).

Po dosazení získám tuto rovnici:

$$\begin{aligned} \Delta p_{52B} = & \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{Bper} + \lambda_{Bper} \cdot \frac{L_{2po}}{d} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{B34} + \\ & + \lambda_{Bper} \cdot \frac{L_{3po}}{d} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{Bper} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \end{aligned} \quad (4.2.1 - 3)$$

Cestou přes A-V zkrat se bude tlaková ztráta Δp_{52} skládat z pěti složek. Budou jimi tři třecí ztráty, a to třecí ztráta na délce L_{1po} při rychlosti v_{Σ} , třecí ztráta v A-V zkratu na délce L_{AV} při rychlosti v_{AV} a třecí ztráta na délce L_{4po} opět při rychlosti v_{Σ} . Zbylé dvě

složky budou místní ztráty, a sice místní ztráta na rozdělení proudu zapojení *po směru* při zohlednění pouze rychlosti A-V zkratu v_{AV} a místní ztráta opětovného sloučení proudu zapojení *po směru* opět při zohlednění pouze rychlosti A-V zkratu v_{AV} . Získávám tak čtvrtou rovnici pro variantu *po směru* s periferií:

$$\Delta p_{52B} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{BAV} + \lambda_{BAV} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{BAV}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{BAV} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 4)$$

Do rovnic lze pro jednotlivé místní ztráty dosadit veličiny podle vzorce (3.3.1 – 1).
Vztahy pro jednotlivé místní ztráty budou následující:

$$\Delta p_{Bper} = \xi_{Bper} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 5)$$

$$\Delta p'_{Bper} = \xi'_{Bper} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 6)$$

$$\Delta p_{BAV} = \xi_{BAV} \cdot \frac{v_{BAV}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 7)$$

$$\Delta p'_{BAV} = \xi'_{BAV} \cdot \frac{v_{BAV}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1 - 8)$$

Po dosazení vztahů (4.2.1 – 5) až (4.2.1 – 8) do rovnic (4.2.1 – 1) až (4.2.1 – 4) a další úpravě získám následující soustavu čtyř rovnic:

$$\Delta p_{53B} = \xi_{Bper} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot (\lambda_{\Sigma} \cdot L_{1po} \cdot v_{\Sigma}^2 + \lambda_{Bper} \cdot L_{2po} \cdot v_{Bper}^2) \quad (4.2.1 - 9)$$

$$\Delta p_{42B} = \xi'_{Bper} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot (\lambda_{Bper} \cdot L_{3po} \cdot v_{Bper}^2 + \lambda_{\Sigma} \cdot L_{4po} \cdot v_{\Sigma}^2) \quad (4.2.1 - 10)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{52B} = & (\xi_{Bper} + \xi'_{Bper}) \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1po} + L_{4po}) + \\ & + \lambda_{Bper} \cdot \frac{v_{Bper}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{2po} + L_{3po}) + \Delta p_{B34} \end{aligned} \quad (4.2.1 - 11)$$

$$\Delta p_{52B} = (\xi_{BAV} + \xi'_{BAV}) \cdot \frac{v_{BAV}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{BAV} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{BAV}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1po} + L_{4po}) \quad (4.2.1 - 12)$$

Jak je patrné, v rovnicích (4.2.1 – 9) až (4.2.1 – 12) zbývají pouze 4 neznámé. Těmi jsou právě ztrátové součinitele, které jsem chtěl zjistit. Pro periferii jsem schopen určit ztrátový součinitel jak pro rozdělení proudu, tak i pro jeho opětovné spojení zvlášť. Jedná se o dvě neznámé hodnoty, které se vyskytují dokonce ve třech rovnicích. Určit ztrátový součinitel periferie ale není cílem práce.

Mnohem podstatnější je ztrátový součinitel A-V zkratu. Zde ale nastává drobný problém, protože v jedné rovnici se vyskytují dvě neznámé hodnoty. Jedná se o ztrátový součinitel A-V zkratu pro rozdělení proudu a ztrátový součinitel A-V zkratu pro spojení proudu. Vzhledem k tomu, že není možné určit každou hodnotu zvlášť, nezbyvá nic jiného, než tyto hodnoty uvažovat společně. Oba ztrátové součinitele se vztahují k A-V zkratu, jejich součtem tedy získám celkový ztrátový součinitel A-V zkratu pro konkrétní variantu zapojení:

$$\xi_{AV_B} = \xi_{BAV} + \xi'_{BAV} \quad (4.2.1 - 13)$$

Pokud bych chtěl zjistit zvlášť ztrátový součinitel A-V zkratu pro rozdělení proudu a pro jeho opětovné spojení, řešením by bylo použití dalšího tlakového snímače. Ten by bylo nutné umístit do střední části A-V zkratu, tedy mezi rozdělení a spojení proudu.

Dosadím-li vztah (4.2.1 – 13) do rovnice (4.2.1 – 12) a upravím, mohu vypočítat ztrátový součinitel A-V zkratu pro zapojení *po směru* v síti vypočítat následovně:

$$\xi_{AV_B} = \frac{2}{\rho \cdot v_{BAV}^2} \cdot \left\{ \Delta p_{52B} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot [\lambda_{BAV} \cdot L_{AV} \cdot v_{BAV}^2 + \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1p0} + L_{4p0}) \cdot v_{\Sigma}^2] \right\} \quad (4.2.1 - 14)$$

4.2.2 Varianta proti směru s periferií

Všechny rovnice budou sestaveny analogicky jako pro případ *po směru* s periferií popsaný v kapitole 4.2.1.

Pro rozdíly tlaku mezi jednotlivými snímači budou tedy platit tyto rovnice:

$$\Delta p_{53C} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{Cper} + \lambda_{Cper} \cdot \frac{L_{2proti}}{d} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 1)$$

$$\Delta p_{42C} = \lambda_{Cper} \cdot \frac{L_{3proti}}{d} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{Cper} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 2)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{52C} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{Cper} + \lambda_{Cper} \cdot \frac{L_{2proti}}{d} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{C34} + \\ + \lambda_{Cper} \cdot \frac{L_{3proti}}{d} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{Cper} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \end{aligned} \quad (4.2.2 - 3)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{52C} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{CAV} + \lambda_{CAV} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{CAV}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{CAV} + \\ + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \end{aligned} \quad (4.2.2 - 4)$$

Za jednotlivé místní ztráty lze opět dosadit následující vztahy:

$$\Delta p_{Cper} = \xi_{Cper} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 5)$$

$$\Delta p'_{Cper} = \xi'_{Cper} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 6)$$

$$\Delta p_{CAV} = \xi_{CAV} \cdot \frac{v_{CAV}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 7)$$

$$\Delta p'_{CAV} = \xi'_{CAV} \cdot \frac{v_{CAV}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.2 - 8)$$

Po dosazení vztahů (4.2.2 – 5) až (4.2.2 – 8) do rovnic (4.2.2 – 1) až (4.2.2 – 4) a další úpravě získám, podobně jako v kapitole 4.2.1, následující soustavu čtyř rovnic:

$$\Delta p_{53C} = \xi_{Cper} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot (\lambda_{\Sigma} \cdot L_{1proti} \cdot v_{\Sigma}^2 + \lambda_{Cper} \cdot L_{2proti} \cdot v_{Cper}^2) \quad (4.2.2 - 9)$$

$$\Delta p_{42C} = \xi'_{Cper} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot (\lambda_{Cper} \cdot L_{3proti} \cdot v_{Cper}^2 + \lambda_{\Sigma} \cdot L_{4proti} \cdot v_{\Sigma}^2) \quad (4.2.2 - 10)$$

$$\Delta p_{52C} = (\xi_{Cper} + \xi'_{Cper}) \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1proti} + L_{4proti}) + \\ + \lambda_{Cper} \cdot \frac{v_{Cper}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{2proti} + L_{3proti}) + \Delta p_{C34} \quad (4.2.2 - 11)$$

$$\Delta p_{52C} = (\xi_{CAV} + \xi'_{CAV}) \cdot \frac{v_{CAV}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{CAV} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{CAV}^2}{2} \cdot \rho + \\ + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1proti} + L_{4proti}) \quad (4.2.2 - 12)$$

Určit ztrátový součinitel periferie není náplní práce. Stejně jako v předchozí kapitole se tedy zaměřím na ztrátový součinitel A-V zkratu. Celkový ztrátový součinitel A-V zkratu pro tuto variantu zapojení lze stanovit součtem ztrátového součinitele pro rozdělení proudu a ztrátového součinitele pro opětovné spojení proudu jako:

$$\xi_{AVC} = \xi_{CAV} + \xi'_{CAV} \quad (4.2.2 - 13)$$

Pokud dosadím vztah (4.2.2 - 13) do rovnice (4.2.2 - 12), získám po úpravě následující výraz pro výpočet ztrátového součinitele A-V zkratu pro zapojení *proti směru* v síti:

$$\xi_{AVC} = \frac{2}{\rho \cdot v_{CAV}^2} \cdot \left\{ \Delta p_{52C} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot [\lambda_{CAV} \cdot L_{AV} \cdot v_{CAV}^2 + \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1proti} + L_{4proti}) \cdot v_{\Sigma}^2] \right\} \quad (4.2.2 - 14)$$

4.2.3 Varianta *po směru* bez periferie

U variant bez periferie nejsou tlakové snímače 3 a 4 vůbec součástí měřicí trati. Smysl má tedy jediná rovnice pro rozdíl tlaku, a to mezi snímačem 5 a 2, přičemž se jedná o cestu přes A-V zkrat. S ohledem na skutečnost, že se proud nikde nedělí, bude celou měřicí tratí protékat proud stejnou rychlostí. Tato rovnice pak bude mít tvar:

$$\Delta p_{52D} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{DAV} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{DAV} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4po}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.3 - 1)$$

Pro místní ztráty mohou použít následující vztahy:

$$\Delta p_{DAV} = \xi_{DAV} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.3 - 2)$$

$$\Delta p'_{DAV} = \xi'_{DAV} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.3 - 3)$$

Pokud dosadím vztahy (4.2.3 - 2) a (4.2.3 - 3) do rovnice (4.2.3 - 1), získám po úpravě takovouto rovnici:

$$\Delta p_{52D} = (\xi_{DAV} + \xi'_{DAV}) \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1po} + L_{AV} + L_{4po}) \quad (4.2.3 - 4)$$

Celkový ztrátový součinitel samotného A-V zkratu při zapojení *po směru* lze stanovit součtem dvou ztrátových součinitelů. Tentokrát se však nebude jednat o rozdělení a spojení proudu, ale v podstatě o ztrátové součinitele dvou zvláštních (ostrých) kolen. Přesto, že A-V zkrat není zapojený v síti, bude mít jeho celkový ztrátový součinitel podobný tvar jako v předchozích dvou případech:

$$\xi_{AVD} = \xi_{DAV} + \xi'_{DAV} \quad (4.2.3 - 5)$$

Dosadím-li vztah (4.2.3 - 5) do rovnice (4.2.3 - 4), mohu po úpravě vypočítat ztrátový součinitel samotného A-V zkratu pro zapojení *po směru* vypočítat takto:

$$\xi_{AVD} = \frac{2}{\rho \cdot v_{\Sigma}^2} \cdot \Delta p_{52D} - \frac{\lambda_{\Sigma}}{d} \cdot (L_{1po} + L_{AV} + L_{4po}) \quad (4.2.3 - 6)$$

4.2.4 Varianta *proti směru* bez periferie

Jelikož periferie není součástí trati, budu mít opět pouze jednu rovnici. Ta bude mít pro variantu *proti směru* následující tvar:

$$\Delta p_{52E} = \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{1proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_{EAV} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{AV}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p'_{EAV} + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{L_{4proti}}{d} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.4 - 1)$$

Pro místní ztráty mohu opět s využitím vzorce (3.3.1 – 1) napsat tyto vztahy:

$$\Delta p_{EAV} = \xi_{EAV} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.4 - 2)$$

$$\Delta p'_{EAV} = \xi'_{EAV} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.4 - 3)$$

Po dosazení vztahů (4.2.4 – 2) a (4.2.4 – 3) do rovnice (4.2.4 – 1) a následující úpravě, získám tuto rovnici:

$$\Delta p_{52E} = (\xi_{EAV} + \xi'_{EAV}) \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2} \cdot \rho + \lambda_{\Sigma} \cdot \frac{v_{\Sigma}^2}{2 \cdot d} \cdot \rho \cdot (L_{1proti} + L_{AV} + L_{4proti}) \quad (4.2.4 - 4)$$

Celkový ztrátový součinitel samotného A-V zkratu při zapojení *proti směru* je, stejně jako v případě *po směru*, možné stanovit součtem ztrátových součinitelů dvou zvláštních kolen. Zde budou mít kolena oproti předchozímu případu pouze opačný směr, podoba vztahu zůstane stejná:

$$\xi_{AVE} = \xi_{EAV} + \xi'_{EAV} \quad (4.2.4 - 5)$$

Pokud dosadím vztah (4.2.4 – 5) do rovnice (4.2.4 – 4), mohu z ní vyjádřit ztrátový součinitel samotného A-V zkratu pro zapojení *proti směru*:

$$\xi_{AVE} = \frac{2}{\rho \cdot v_{\Sigma}^2} \cdot \Delta p_{52E} - \frac{\lambda_{\Sigma}}{d} \cdot (L_{1proti} + L_{AV} + L_{4proti}) \quad (4.2.4 - 6)$$

4.3 Výsledky a jejich zhodnocení

Po proměření všech variant zapojení, které byly popsány v kapitole 3.2, je možné se s použitím rovnic a vztahů uvedených v předchozích kapitolách dopracovat k výsledkům. Cílem bylo určit ztrátové součinitele A-V zkratu pro jeho různé, v mém případě čtyři, varianty zapojení. Všechny varianty jsem postupně proměřil pro osm různých hodnot průtoků. Aby byly varianty vzájemně porovnatelné, použil jsem pro každou z nich stejnou sadu průtoků. V této části bakalářské práce jsou uvedeny a okomentovány výsledky, ke kterým jsem se po zpracování naměřených dat dopracoval.

4.3.1 Varianta *po směru* s periferií

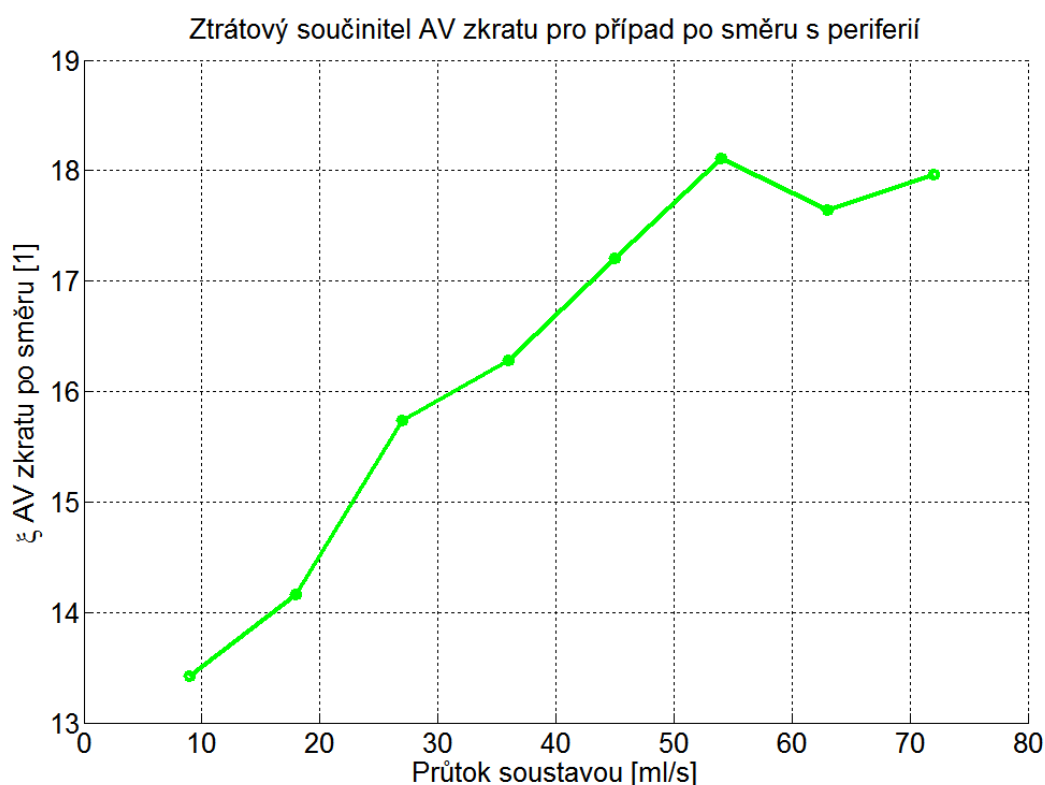
Hodnoty celkového průtoku, průtoku A-V zkratem, z nich určené hodnoty rychlostí a především výsledné hodnoty ztrátového součinitele pro variantu *po směru* s periferií jsou uvedeny v tabulce č. 4-1.

Vedle hodnot v tabulce č. 4-1 jsou všechny hodnoty naměřených tlakových ztrát, vypočítaných rychlostí proudění, dosahovaných Reynoldsových čísel a součinitelů třecích ztrát uvedeny v příloze 7.2.2.

Varianta <i>po směru</i> s periferií (varianta B)								
Celkový průtok Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Průtok A-V zkratem Q_{BAV} [ml/s]	8,2	15,2	21,5	27,4	33,0	38,3	43,9	49,3
Rychlost v A-V zkratu v_{BAV} [m/s]	0,053	0,099	0,140	0,178	0,215	0,249	0,285	0,320
Ztrátový součinitel ξ_{AVB} [1]	13,36	14,17	15,75	16,31	17,22	18,13	17,67	17,99

Tabulka č. 4-1: Hodnoty pro variantu *po směru* s periferií

Graf č. 4-1 je grafickým znázorněním závislosti určeného ztrátového součinitele na celkovém průtoku.



Graf č. 4-1: Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu pro variantu po směru s periferií na celkovém průtoku soustavou

Ztrátový součinitel A-V zkratu pro variantu *po směru* s periferií s rostoucím průtokem soustavou také rostl. Při nárůstu průtoku o 60 ml/s vzrostl ztrátový součinitel o 4,5. Ve mnou měřené oblasti průtoku má závislost přibližně lineární charakter. Nelze však s jistotou říci, jak by tato závislost vypadala pro větší průtoky. A-V zkrat je zvláštní hydraulický prvek a ze získaných hodnot je vidět, že jeho ztrátový součinitel bude, na rozdíl od ztrátových součinitelů jednoduchých prvků, záviset na průtoku. Je ale poměrně nepravděpodobné, že by ztrátový součinitel neustále rostl. Dá se tedy předpokládat, že pro vyšší hodnoty průtoku by se nakonec na nějaké hodnotě ustálil. Tendence ustálit se je možná trochu patrná již pro poslední tři měření.

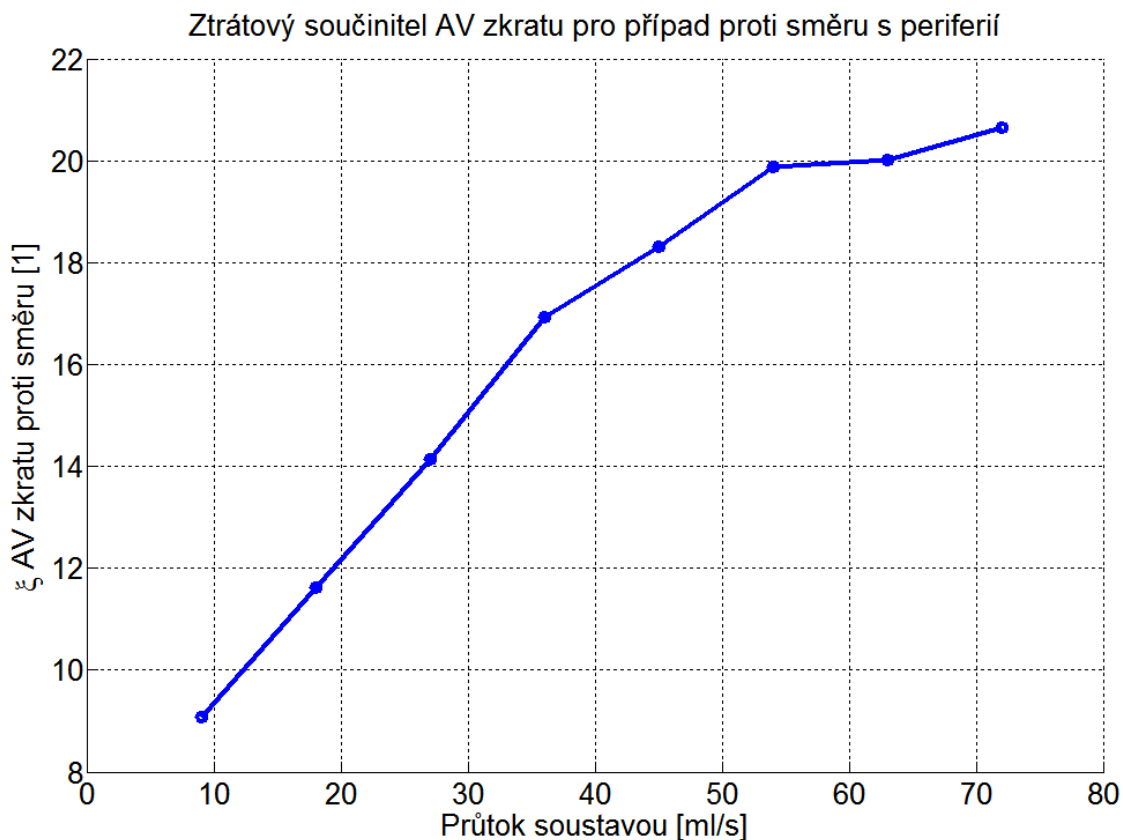
4.3.2 Varianta *proti směru s periferií*

V tabulce č. 4-2 je opět uveden výběr hodnot při měření A-V zkratu v zapojení *proti směru s periferií*. Všechny hodnoty se pak nacházejí v příloze 7.2.3.

Varianta <i>proti směru s periferií</i> (varianta C)								
Celkový průtok Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Průtok A-V zkratem Q_{CAV} [ml/s]	8,5	15,4	21,3	26,5	31,6	36,4	41,5	46,5
Rychlost v A-V zkratu v_{CAV} [m/s]	0,055	0,100	0,139	0,172	0,205	0,237	0,270	0,302
Ztrátový součinitel ξ_{AVC} [1]	9,02	11,61	14,16	16,95	18,33	19,89	20,04	20,67

Tabulka č. 4-2: Hodnoty pro variantu *po směru s periferií*

Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu na celkovém průtoku soustavou pro tuto variantu zapojení je vynesena do grafu č. 4-2.



Graf č. 4-2: Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu pro variantu proti směru s periferií na celkovém průtoku soustavou

Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu pro variantu *proti směru* s periferií má stejně jako v předchozím případě rostoucí charakter. Graf má opět v měřeném spektru průtoků přibližně lineární charakter. Tentokrát ale roste mnohem rychleji než u varianty *po směru*. Při zvýšení průtoku o 60 ml/s stouplá hodnota ztrátového součinitele asi o 11,5. Opět však nepředpokládám, že by ztrátový součinitel rostl do nekonečna. Pravděpodobně by také došlo k ustálení. Již pro poslední tři měřené případy neroste hodnota ztrátového součinitele tak intenzivně jako v první polovině grafu.

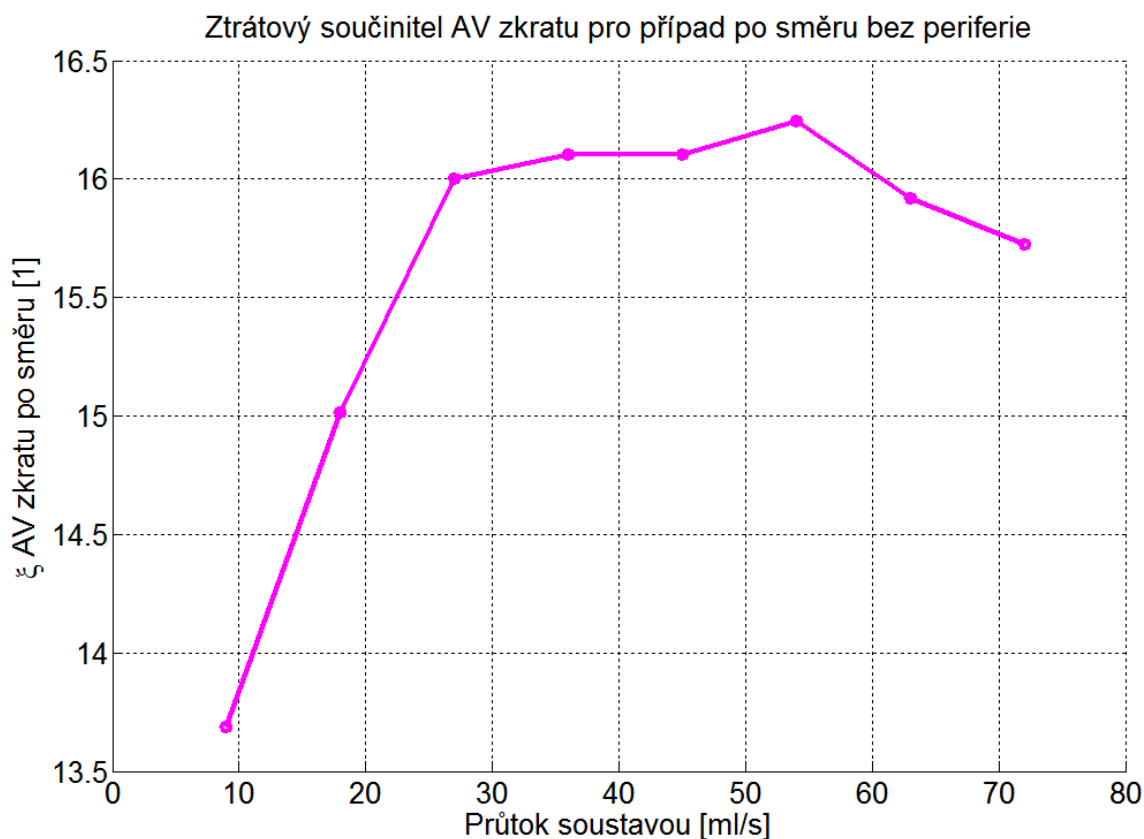
4.3.3 Varianta *po směru* bez periferie

Vybrané hodnoty při měření samotného A-V zkratu *po směru* jsou uvedeny v tabulce č. 4-3. Kompletní tabulku všech hodnot lze opět nalézt v příloze 7.2.4.

Varianta <i>po směru</i> bez periferie (varianta D)								
Celkový průtok Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Průtok A-V zkratem Q_{DAV} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost v A-V zkratu v_{DAV} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Ztrátový součinitel ξ_{AVD} [1]	13,63	15,03	16,02	16,13	16,13	16,27	15,94	15,75

Tabulka č. 4-3: Hodnoty pro variantu *po směru* bez periferie

V grafu č. 4-3 je zobrazena závislost výsledného spočítaného ztrátového součinitele samotného A-V zkratu *po směru* na celkovém průtoku soustavou.



Graf č. 4-3: Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu pro variantu po směru bez periferie na celkovém průtoku soustavou

U varianty *po směru* bez periferie představuje A-V zkrat v měřicí trati v podstatě jen dvě zvláštní kolena. Tato kolena mají na rozdíl od běžných kolien, která jsou hladce zahnutá, ostré zalomení. Jedná se ale pouze o tento samotný prvek, není zapojen v síti, a není zde tedy vliv žádného dělení a spojování proudu, jako tomu bylo u variant *po směru* a *proti směru* s periferií.

Protože A-V zkrat při této variantě zapojení je téměř běžným hydraulickým prvkem, tím spíše by jeho ztrátový součinitel měl být konstantní. Tento předpoklad se měřením, jak je z grafu č. 4-3 patrné, potvrdil. Pouze hodnoty ztrátového součinitele pro první dva nejmenší průtoky jsou o poznání nižší. To může být nejspíše způsobeno tím, že při takto malých průtocích se pohybujeme ve velmi malých tlakových rozdílech (viz. příloha). Proto i malá odchylka měřené hodnoty tlakového rozdílu od hodnoty skutečné může způsobit velkou procentuální chybu.

Pakliže chci určit konstantní hodnotu ztrátového součinitele samotného A-V zkratu, mám v podstatě dvě možnosti. První možností je určit ztrátový součinitel klasickým aritmetickým průměrem. Problém ale je, že každá hodnota se na výsledku podílí stejnou vahou. Tedy i hodnoty ztrátového součinitele pro nejnižší průtoky, které mohly být ovlivněny velkou procentuální chybou, jak jsem již zmínil výše.

Čistě aritmetickým průměrem bych získal tuto hodnotu ztrátové součinitele samotného A-V zkratu při zapojení *po směru*:

$$\overline{\xi_{AVD}} = 13,6$$

Druhou a přesnější možností je určit konstantní hodnotu ztrátového součinitele s ohledem na vliv jednotlivých hodnot místních ztrát. Místní ztrátu určím tak, že od celkové tlakové ztráty odečtu ztráty třecí. Vezmu-li si rovnici pro ztrátový součinitel samotného A-V zkratu *po směru* bez periferie (4.2.3 – 6), získám po úpravě do vhodného tvaru toto:

$$\xi_{AVD} = \frac{2}{\rho \cdot v_{\Sigma}^2} \cdot \left[\Delta p_{52D} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1po} + L_{AV} + L_{4po}) \cdot v_{\Sigma}^2 \right] \quad (4.3.3 - 1)$$

Jak je z rovnice (4.3.3 – 1) patrné, místní tlaková ztráta odpovídá velké závorce, tedy:

$$p_{z_{mD}} = \Delta p_{52D} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1po} + L_{AV} + L_{4po}) \cdot v_{\Sigma}^2 \quad (4.3.3 - 2)$$

Toto je místní tlaková ztráta ze změřených hodnot.

Po vyjádření z rovnice (4.3.3 – 1) získám pro místní ztrátu také tento vztah:

$$p_{z_{mD}} = v_{\Sigma}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \xi_{AVD} \quad (4.3.3 - 3)$$

Budu-li uvažovat konstantní hodnotu ztrátového součinitele (který chci určit), bude místní ztráta funkcí pouze kvadrátu rychlosti vynásobeného konstantou:

$$p_{z_{mD}} = v_{\Sigma}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \overline{\xi_{AVD}} \quad (4.3.3 - 4)$$

Pokud stanovím konstantu d :

$$d = \overline{\xi_{AVD}} \cdot \frac{\rho}{2}, \quad (4.3.3 - 5)$$

je možné vztah mezi místní ztrátou a rychlostí proudění charakterizovat kvadratickou rovnicí:

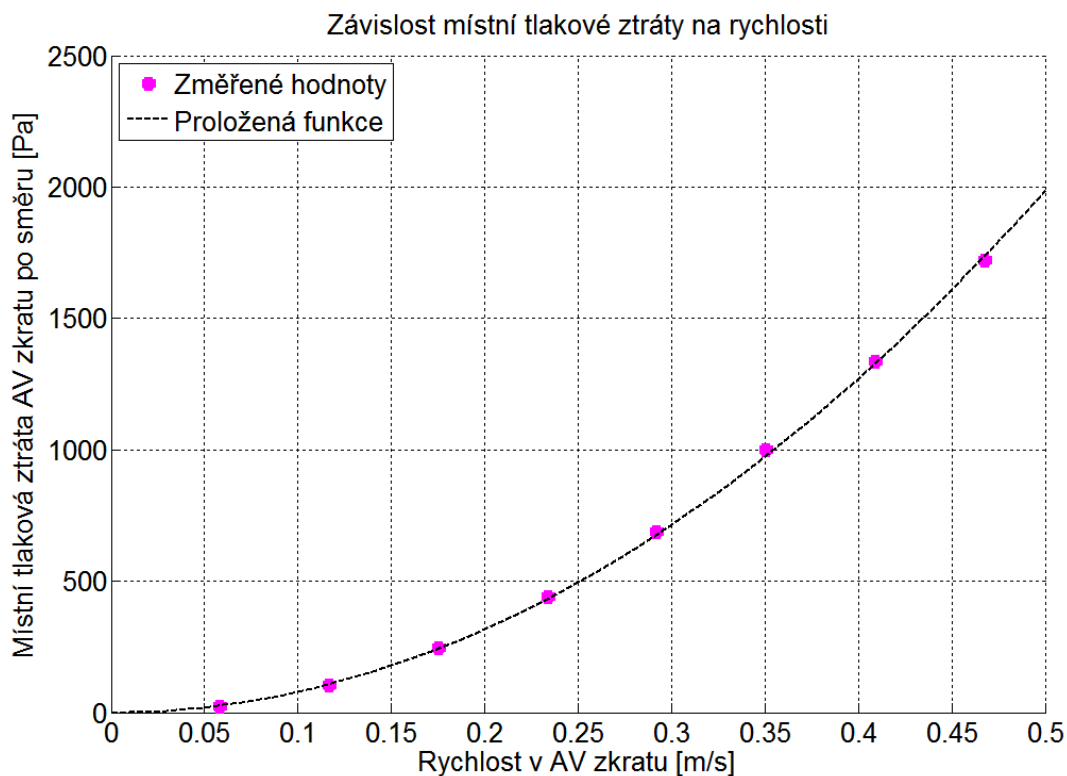
$$p_{z_{mD}} = d \cdot v_{\Sigma}^2 \quad (4.3.3 - 6)$$

Koeficient d byl, stejně jako při určování průtoku v kapitole 3.3.1, určen v programu MATLAB pomocí tak zvaného fitování funkce.

Konstantní hodnota ztrátového součinitele A-V zkratu pro zapojení *po směru* bez periferie se pak určí z rovnice (4.3.3 – 5) snadno:

$$\overline{\xi_{AVD}} = \frac{2 \cdot d}{\rho} \quad (4.3.3 - 7)$$

V grafu č. 4-4 je vynesena místní tlaková ztráta v závislosti na rychlosti proudění A-V zkratem. Je zde zobrazena místní tlaková ztráta určená ze změřených hodnot dle rovnice (4.3.3 – 2) a místní tlaková ztráta určená aproximací v programu MATLAB jako kvadratická funkce (4.3.3 – 6).

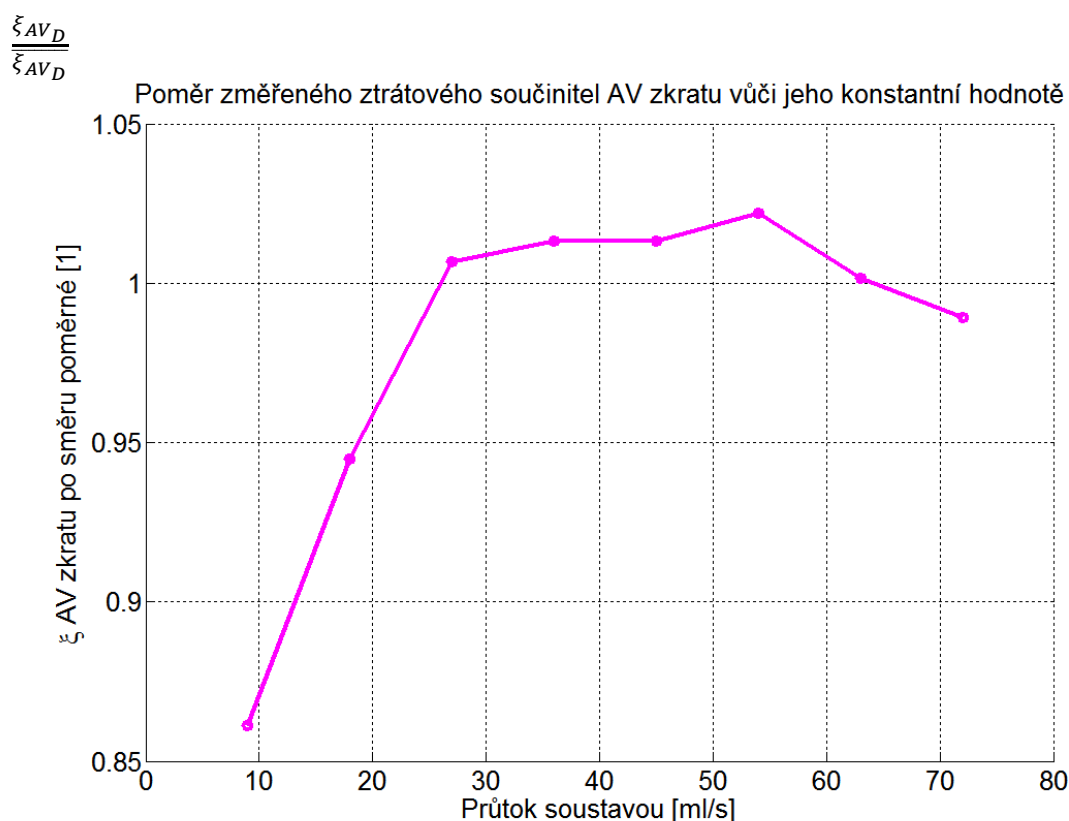


Graf č. 4-4: Závislost místní tlakové ztráty A-V zkratu pro variantu po směru bez periferie na rychlosti proudění A-V zkratem

V programu MATLAB byla stanovena konstanta d pro tento průběh kvadratické funkce a z ní jsem pak určil ztrátový součinitel samotného A-V zkratu při zapojení *po směru*. Dospěl jsem tak k této hodnotě:

$$\overline{\xi_{AV_D}} = 15,9$$

Pro zhodnocení přesnosti určení této konstantní hodnoty jsem sestrojil graf č. 4-5. V něm je znázorněn poměr jednotlivých spočítaných hodnot ztrátového součinitele k této konstantě pro různé průtoky, tedy:



Graf č. 4-5: Poměr změřeného ztrátového součinitele samotného A-V zkratu *po směru* vůči jeho konstantní hodnotě v závislosti na celkovém průtoku soustavou

Z grafu č. 4-5 je vidět, že ani největší odchylka, které bylo dosaženo při nejnižším průtoku, nepřesáhla 15%. Od měření pro třetí průtok již hodnota ztrátového součinitele kolísala kolem určené konstantní hodnoty s odchylkou v řádu jednotek procent. Ztrátový součinitel samotného A-V zkratu *po směru* by se tedy nejspíš ustálil právě kolem mnou určené hodnoty 15,9.

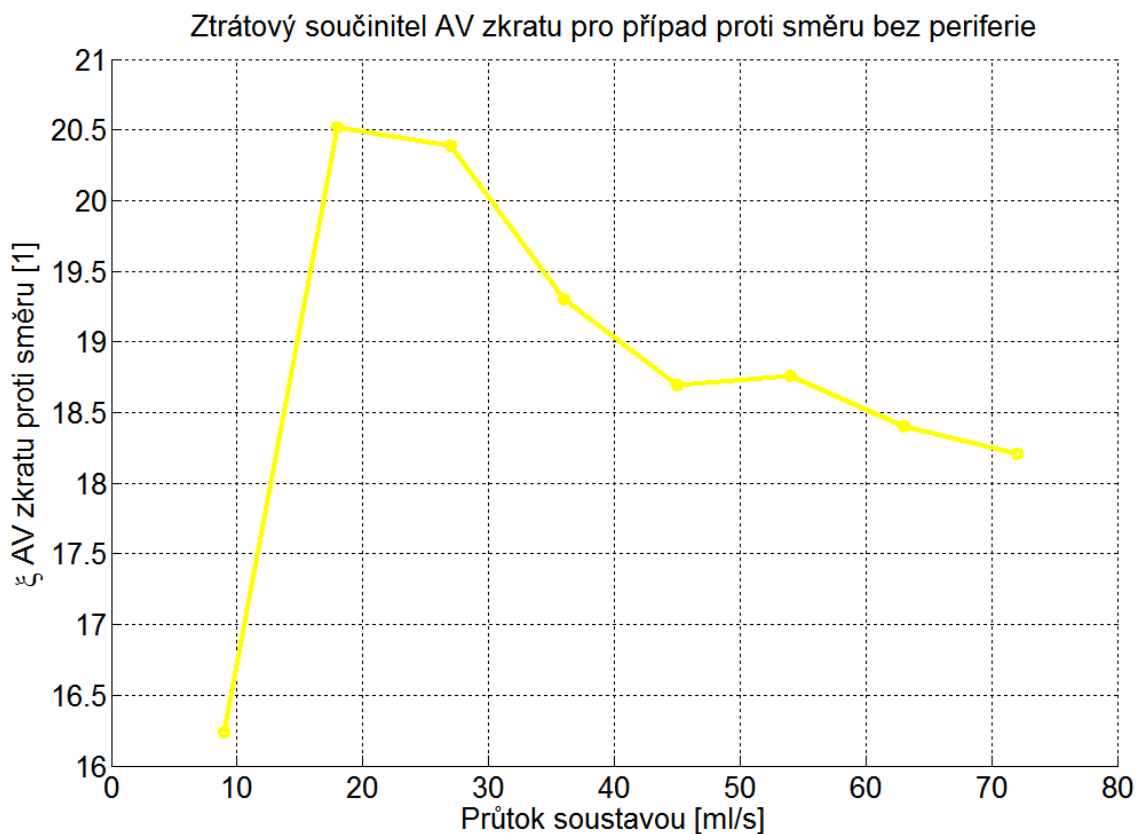
4.3.4 Varianta *proti směru* bez periferie

Vybrané hodnoty při měření samotného A-V zkratu *proti směru* jsou uvedeny v tabulce č. 4-4. Tabulku všech změřených a vypočtených hodnot je opět možné nalézt v příloze 7.2.5.

Varianta <i>proti směru</i> bez periferie (varianta E)								
Celkový průtok Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Průtok A-V zkratem Q_{EAV} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost v A-V zkratu v_{EAV} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Ztrátový součinitel ξ_{AVE} [1]	16,19	20,55	20,42	19,33	18,73	18,79	18,43	18,23

Tabulka č. 4-4: Hodnoty pro variantu *proti směru* bez periferie

Závislost ztrátového součinitele samotného A-V zkratu *proti směru* na celkovém průtoku soustavou je vynesena v grafu č. 4-6.



Graf č. 4-6: Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu pro variantu proti směru bez periferie na celkovém průtoku soustavou

I u varianty *proti směru* bez periferie představuje A-V zkrat v měřicí trati opět jen dvě zvláštní kolena. Oproti variantě *po směru* bez periferie se liší pouze v jejich pořadí.

Ani při této variantě zapojení není A-V zkrat příliš zvláštním hydraulickým prvkem. Jeho ztrátový součinitel by tedy měl být opět konstantní. Při pohledu do grafu č. 4-6 se může zdát, že tato teorie není potvrzena. Jak je ale vidět, výrazně se liší pouze hodnoty pro první tři nejnižší průtoky. To jsou, jak již bylo popsáno v kapitole 4.3.3, měření potenciálně zatížená největší procentuální chybou. Pro další měření již ztrátový součinitel kolísá v poměrně úzkém pásmu hodnot.

Pokud bych chtěl určit konstantní hodnotu ztrátového součinitele samotného A-V zkratu, jsou zde opět dvě možnosti. První možností je určení ztrátového součinitele aritmetickým průměrem. Takto bych získal tuto hodnotu ztrátového součinitele samotného A-V zkratu při zapojení *proti směru*:

$$\overline{\xi_{AVE}} = 18,8$$

Z důvodu popsaného již v kapitole 4.3.3 raději určím konstantní hodnotu ztrátového součinitele s ohledem na vliv jednotlivých hodnot místních ztrát. Místní ztrátu určím odečtením třetí ztráty celkové tlakové ztráty. Když použiji rovnici pro ztrátový součinitel samotného A-V zkratu *proti směru* bez periferie (4.2.4 – 6), získám po úpravě do vhodného tvaru toto:

$$\xi_{AV_E} = \frac{2}{\rho \cdot v_{\Sigma}^2} \cdot \left[\Delta p_{52E} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1proti} + L_{AV} + L_{4proti}) \cdot v_{\Sigma}^2 \right] \quad (4.3.4 - 1)$$

Místní tlaková ztráta určená ze změřených hodnot se tedy rovná následujícímu členu:

$$p_{z_{mE}} = \Delta p_{52E} - \frac{\rho}{2 \cdot d} \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (L_{1proti} + L_{AV} + L_{4proti}) \cdot v_{\Sigma}^2 \quad (4.3.4 - 2)$$

Po vyjádření z rovnice (4.3.4 – 1) získám pro místní ztrátu také vztah:

$$p_{z_{mE}} = v_{\Sigma}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \xi_{AV_E} \quad (4.3.4 - 3)$$

Opět budu uvažovat konstantní hodnotu ztrátového součinitele, místní ztráta bude proto funkcí pouze kvadrátu rychlosti vynásobeného konstantou:

$$p_{z_{mE}} = v_{\Sigma}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \overline{\xi_{AV_E}} \quad (4.3.4 - 4)$$

Stanovím-li konstantu e :

$$e = \overline{\xi_{AV_E}} \cdot \frac{\rho}{2}, \quad (4.3.4 - 5)$$

mohu vztah mezi místní ztrátou a rychlostí proudění charakterizovat kvadratickou rovnicí:

$$p_{z_{mE}} = e \cdot v_{\Sigma}^2 \quad (4.3.4 - 6)$$

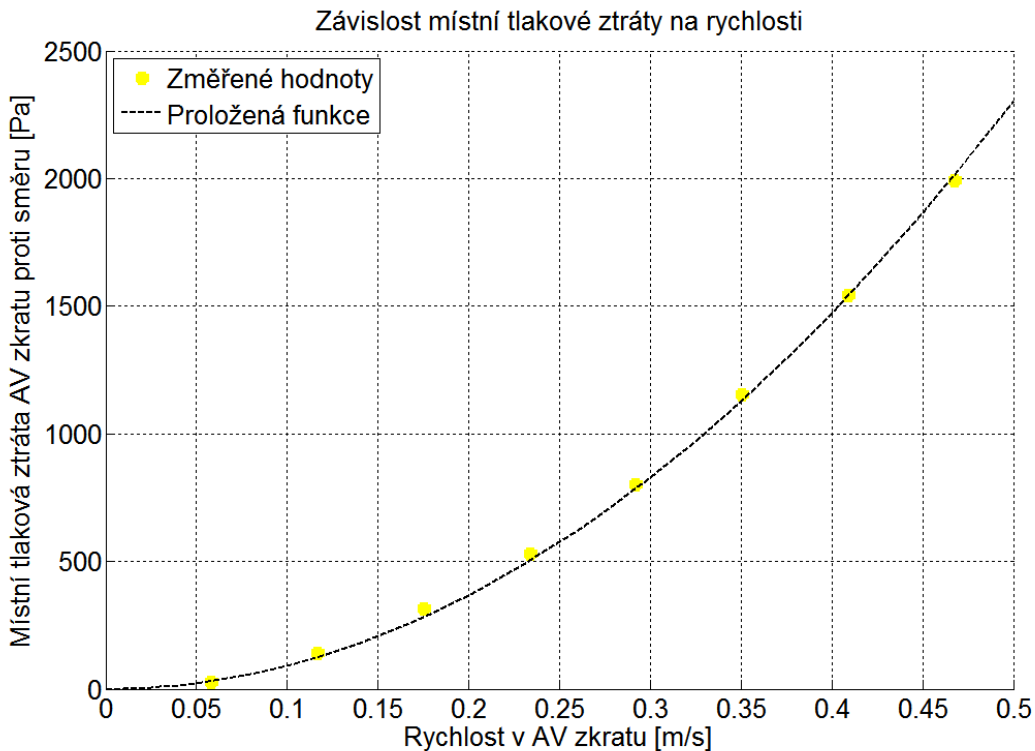
Koeficient e jsem opět určil v programu MATLAB pomocí fitování funkce.

Konstantní hodnotu ztrátového součinitele A-V zkratu pro zapojení *proti směru* bez periferie mohu snadno určit z rovnice (4.3.4 – 5):

$$\overline{\xi_{AV_E}} = \frac{2 \cdot e}{\rho} \quad (4.3.4 - 7)$$

Do grafu č. 4-7 jsem vynesl místní tlakovou ztrátu v závislosti na rychlosti proudění A-V zkratem. Je zde zobrazena místní tlaková ztráta určená ze změřených hodnot dle

rovnice (4.3.4 – 2) a místní tlaková ztráta určená aproximací v programu MATLAB jako kvadratická funkce (4.3.4 – 6).



Graf č. 4-7: Závislost místní tlakové ztráty A-V zkratu pro variantu proti směru bez periferie na rychlosti proudění A-V zkratem

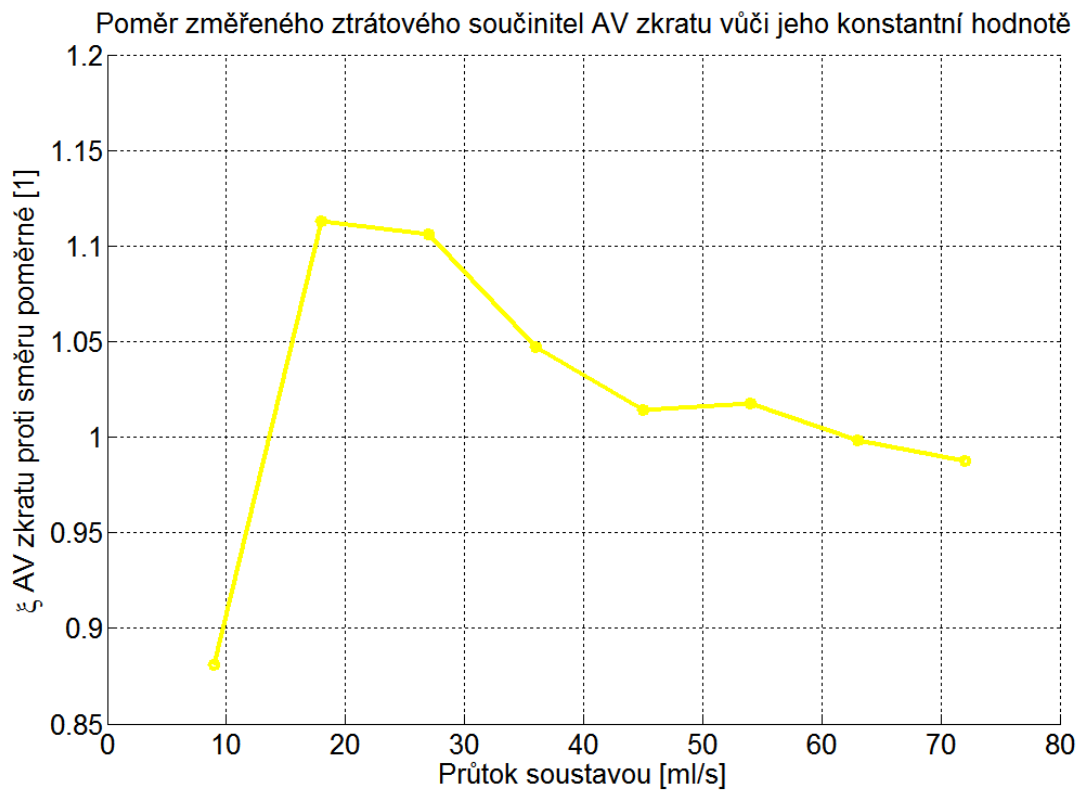
Pomocí konstanty e , která byla stanovena programem MATLAB, jsem za použití vztahu (4.3.4 – 7) určil ztrátový součinitel samotného A-V zkratu při zapojení *proti směru*:

$$\overline{\xi_{AV_E}} = 18,4$$

Pro zhodnocení přesnosti určení konstantní hodnoty ztrátového součinitele jsem vytvořil poměr jednotlivých spočítaných hodnot ztrátového součinitele právě k této konstantní hodnotě:

$$\frac{\xi_{AV_E}}{\overline{\xi_{AV_E}}}$$

Tento poměr je v závislosti na celkovém průtoku soustavou zobrazen v grafu č. 4-8.

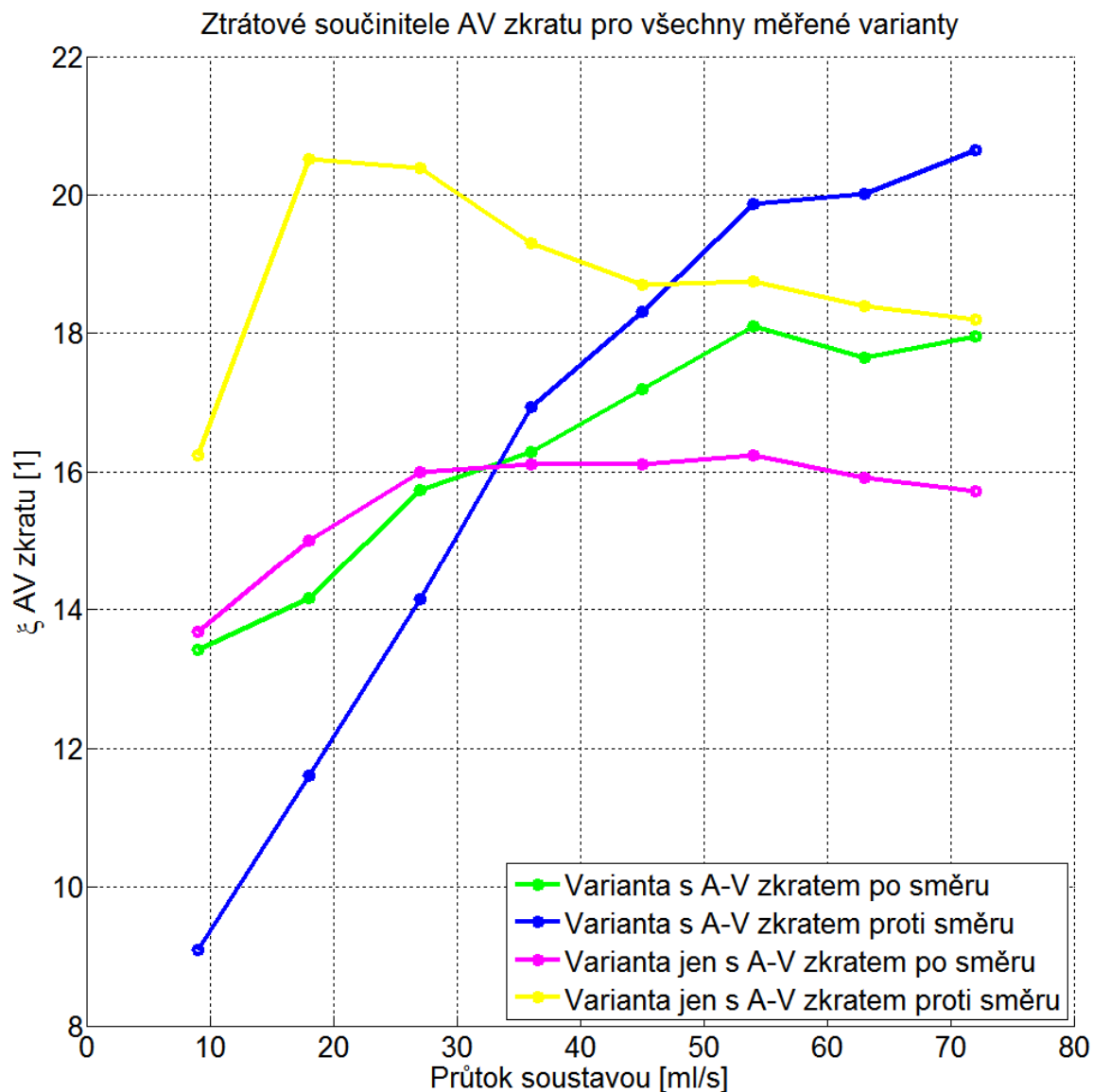


Graf č. 4-8: Poměr změřeného ztrátového součinitele samotného A-V zkratu proti směru vůči jeho konstantní hodnotě v závislosti na celkovém průtoku soustavou

V grafu č. 4-8 lze vidět, že největší odchylky bylo dosaženo u měření pro tři nejnižší průtoky. Ve všech tří případech se jednalo o odchylku přibližně 10 až 12%. Již pro čtvrtý průtok klesá odchylka pod 5% a při dalších provedených měřeních se nadále drží kolem tří procent. Ztrátový součinitel samotného A-V zkratu *proti směru* by se tedy nejspíš ustálil právě kolem mnou určené hodnoty 18,4.

4.3.5 Porovnání všech měřených variant

V grafu č. 4-9 jsou zobrazeny ztrátové součinitele A-V zkratu v závislosti na celkovém průtoku soustavou pro všechny měřené varianty.



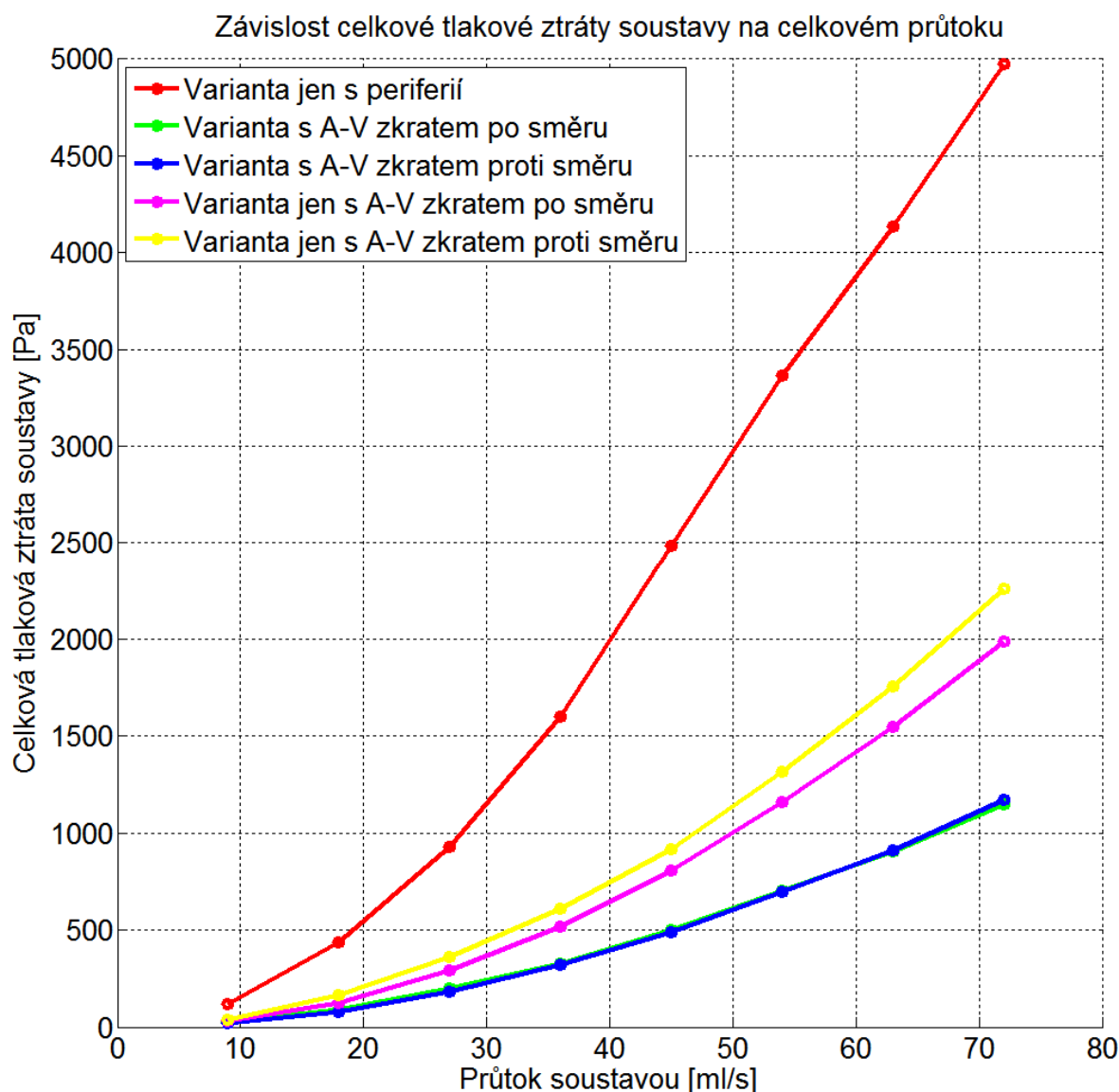
Graf č. 4-9: Závislost ztrátového součinitele A-V zkratu na celkovém průtoku soustavou pro jednotlivé varianty zapojení

Z tohoto společného grafu je ustálení na konstantní hodnotě u obou variant bez periferie mnohem viditelnější. U variant s periferií by se o ustálení dalo mluvit pouze u varianty *po směru*. U varianty *proti směru* je zde ale také předpoklad ustálení, i když nejspíš pro nějaké vyšší hodnoty průtoku.

Z grafu lze dále vyčíst, že zapojení *po směru* má tendenci se ustálit na menší hodnotě ztrátového součinitele než zapojení *proti směru*. Při zapojení v síti, tedy s periferií,

je ztrátový součinitel pro variantu *po směru* i *proti směru* vyšší, než když je A-V zkrat zapojen stejným způsobem samostatně.

Přesto, že se ztrátový součinitel pro variantu *proti směru* s periferií nakonec zřejmě ustálí na nejvyšší hodnotě, začíná naopak v porovnání s ostatními variantami nabíhat od hodnot nejnižších.



Graf č. 4-10: Závislost celkové tlakové ztráty soustavy na celkovém průtoku soustavou pro jednotlivé varianty zapojení

V grafu č. 4-10 je zobrazena celková tlaková ztráta generovaná soustavou při jednotlivých variantách zapojení v závislosti na celkovém průtoku soustavou. Jak je patrné, obě varianty s A-V zkratem v síti tvoří suverénně nejnižší celkovou tlakovou ztrátu při stejném průtoku.

Tím se potvrzuje význam A-V zkratu. Cévní soustava totiž spíše než na principu konstantního průtoku pracuje na principu konstantního tlakového spádu. Pokud se tedy vytvoří v těle A-V zkrat, tlakový spád zůstane zachován, ale průtok několikanásobně vzroste. Stěna žíly je pružná a po vytvoření A-V zkratu v ní nestoupne průtok pouze zvýšením rychlosti proudění. Žíla se velkému průtoku přizpůsobí také tím, že se roztáhne, a zvětší se tak její průřez.

Pokud by křivky v grafu č. 4-10 dál rostly lineárně, dostali bychom se při použití našeho modelu A-V zkratu přibližně na pětikrát větší průtok při stejné tlakové ztrátě, než jaký by bez něj byl běžný.

5 Závěr

5.1 Shrnutí pracovních úkonů

Proměřil jsem tlakové ztráty A-V zkratu při různých variantách jeho zapojení a popsal jeho chování.

Realizaci samotného experimentu předcházela úprava měřicí trati. Jednalo se především o vyrobení modelu A-V zkratu. Ten se nechal vyrobit, sám jsem pak vytvořil model periferie s vyhovujícími vlastnostmi. Dále jsem musel kalibrovat tlakové snímače, tedy stanovit jejich statické citlivosti, abych mohl z jejich výstupního napětí určit tlak.

Poté následovalo vlastní měření čtyř hlavních variant zapojení s A-V zkratem a jedné pomocné varianty bez A-V zkratu, která sloužila jako průtokoměr. Každá varianta zapojení byla proměřena při osmi hodnotách průtoku.

Po získání potřebných dat jsem musel vhodně sestavit rovnice a vyjádřit z nich vztahy pro výpočet ztrátového součinitele A-V zkratu pro jednotlivé varianty zapojení.

5.2 Diskuze výsledků

Proměřil jsem čtyři různé varianty zapojení A-V zkratu. Jednalo se o případ, kdy byl A-V zkrat zapojen v síti, a případ, kdy byl A-V zkrat zapojen v měřicí trati sám bez periferní části. Oba případy byly realizovány ve dvou variantách, a sice ve variantě *po směru* a *proti směru*. Zpracováním naměřených dat a aplikováním mnou sestavených rovnic jsem se dopracoval k požadovaným výsledkům.

U variant se samotným A-V zkratem z grafů vyplývá, že již v mnou měřené oblasti se ztrátový součinitel ustaluje. Byl jsem tedy schopen určit konstantní hodnotu ztrátového součinitele A-V zkratu pro tato zapojení. Pro variantu s A-V zkratem *po směru* bez periferie jsem získal ztrátový součinitel s hodnotou $\overline{\xi_{AVD}} = 15,9$ a pro variantu s A-V zkratem *proti směru* bez periferie $\overline{\xi_{AVE}} = 18,4$. Po ustálení se u obou variant ztrátové součinitele určené při jednotlivých průtocích lišily vůči těmto konstantním hodnotám v řádu jednotek procent.

Pro varianty s A-V zkratem v síti jsem konstantní hodnotu ztrátového součinitele určit nedokázal. V téměř celé měřené oblasti měla jeho závislost na průtoku rostoucí charakter. Až pro dva nebo tři nejvyšší průtoky by se dalo mluvit o tendenci k ustálení.

K těmto dvěma variantám by se tedy dalo říci to, že se ztrátový součinitel A-V zkratu s největší pravděpodobností také ustálí. Došlo by k tomu ale při větších průtocích. Pro určení konstantní hodnoty ztrátového součinitele by tak bylo nutné pokračovat v měření pro vyšší průtoky. To mi ale čerpadlo, které bylo k dispozici, neumožňovalo. Při použití větších průtoků by však již Reynoldsovo číslo a rychlost proudění dosahovaly takových hodnot, které neodpovídají rozsahu hodnot v cévní soustavě.

Při všech měřeních byla ve střední části A-V zkratu umístěna clonka. Ta zde byla z toho důvodu, aby celý člen generoval dostatečnou tlakovou ztrátu, a měření se pohybovalo ve vyšších hodnotách. Tlakové snímače mají, stejně jako každý měřicí přístroj, tak zvanou třídu přesnosti. Ta určuje maximální relativní chybu přístroje v procentech maximálního měřicího rozsahu. Maximální měřicí rozsah je konstantní hodnota, proto se ani maximální absolutní chyba nemění. Při větších hodnotách tlaku se tedy procentuální chyba snižuje. Pro určení ztrátového součinitele čistě samotného A-V zkratu by bylo nutné každý získaný ztrátový součinitel ponížít o konstantní hodnotu clonky.

5.3 Možné budoucí navazující práce

V bakalářské práci jsem sice měřil čtyři varianty zapojení, stále se však jednalo pouze o jedno provedení A-V zkratu. Pro detailnější popis problematiky tlakové ztráty A-V zkratu by bylo dobré proměřit také další možnosti jeho provedení. Toto provedení A-V zkratu je nejjednodušší, výroba modelů dalších provedení je již technicky náročnější a celý experiment by si vyžádal více času.

Všechna měření byla provedena pro stálý poměr průtoku A-V zkratem a periferií. Dalším rozšířením by tedy mohlo být měnění tohoto poměru použitím různých clonek v modelu A-V zkratu a v modelu periferie.

Při experimentech byla v měřicí trati použita voda. Abych se více přiblížil realitě, bylo by možné namísto ní použít tekutinu, která by se svými vlastnostmi blížila krvi. Krev je totiž na rozdíl od vody kapalinou newtonskou a má jiné fyzikální vlastnosti, chová se odlišně.

Měřicí trať byla sestavena z pevných trubek, ale cévy v těle jsou pružné. Pro podrobné zachycení reality by mohly být hlavní části trati vyrobeny z pružného materiálu. Jejich použití by již nejspíš vyžadovalo i složité konstrukční řešení.

6 Přehled použitých zdrojů

[1] Internetová stránka *Ledviny.cz*; přístup 10.6.2015; 20:00

<http://www.ledviny.cz/hemodialyza>

[2] Prof. Ing. Jan Ježek, DrSc.; Ing. Blanka Váradiová, CSc.; Ing. Josef Adamec, CSc.:
Mechanika tekutin. Nakladatelství ČVUT, 2000; 150 stran; ISBN 80-01-01615-3

[3] Internetová encyklopedie *The Free Dictionary by Farlex*; přístup 10.6.2015, 21:30

<http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/pulmonary+arteriovenous+fistula>

[4] Informační portál *e-automatizace*; přístup 23.5.2015, 18:00

http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_se_silovym_ucinkem.htm

[5] Internetová stránka firmy *BHV senzory s.r.o.*; přístup 23.5.2015, 18:30

<http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/tsz-katalog.pdf>

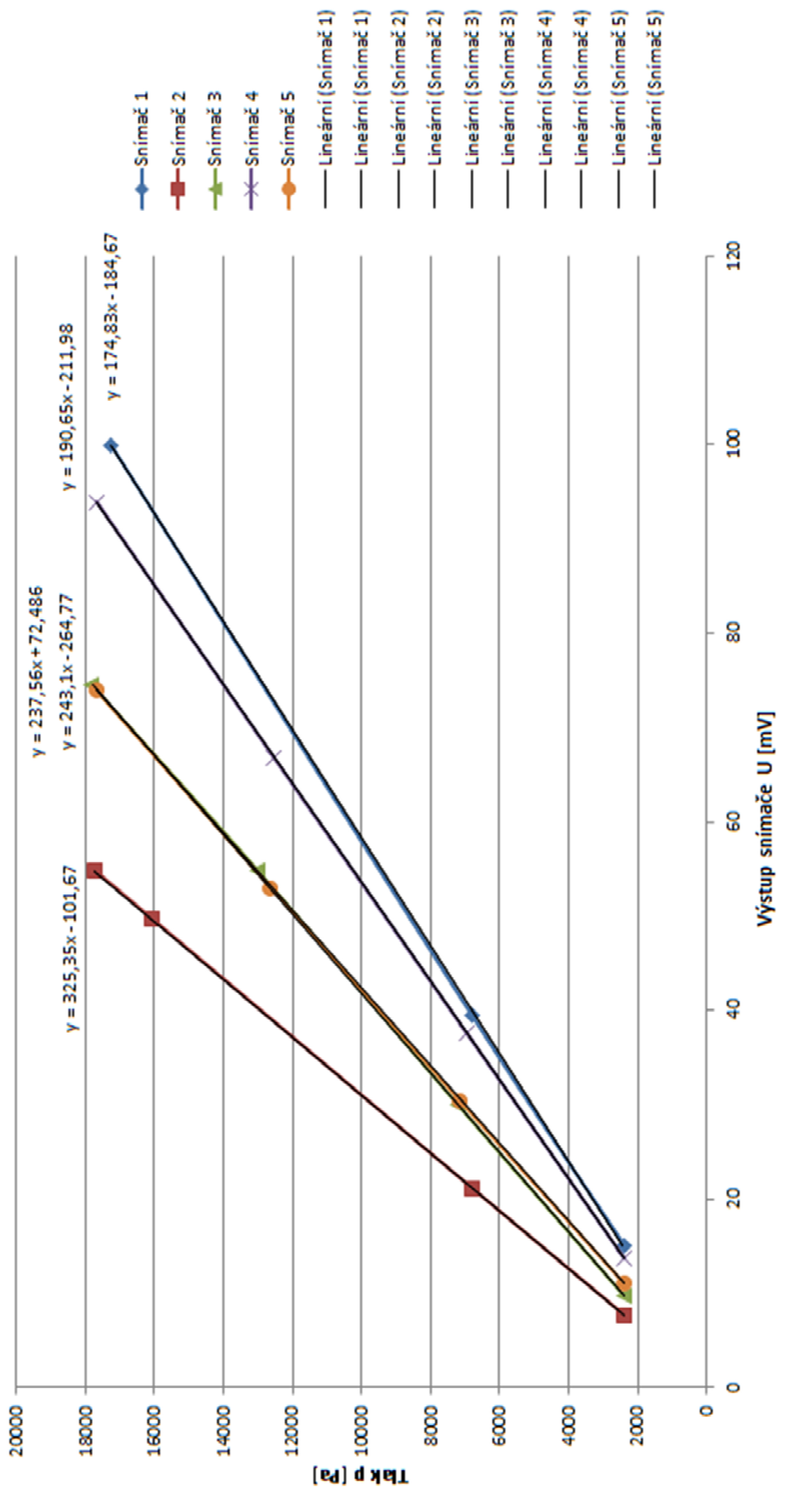
7 Přílohy

7.1 Kalibrace tlakových snímačů

V této příloze jsou uvedena kompletní data ke kalibraci snímačů, která byla podrobněji popsána v kapitole 3.1.3. Jedná se o tabulku s měřeními výškami vodního sloupce, ze kterých byl vypočítán hydrostatický tlak, a napětového výstupu snímačů. Tabulka je doplněna grafem kalibrace tlakových snímačů, což je závislost tlaku na výstupním napětí snímačů, ze které byly určeny statické citlivosti. Ty byly zpětně uvedeny do tabulky.

Kalibrace tlakových snímačů				
Snímač	Výška vodního sloupce	Hydrostatický tlak	Výstup snímače	Statická citlivost snímače
	h [mm]	p_h [Pa]	U [mV]	k [Pa/mV]
Snímač 1	244	2 389	15,1	174,83
	694	6 796	39,4	
	1 762	17 254	99,9	
Snímač 2	244	2 389	7,7	325,35
	696	6 815	21,2	
	1 641	16 069	49,7	
	1 813	17 754	54,9	
Snímač 3	244	2 389	9,7	237,56
	737	7 217	30	
	1 331	13 034	54,9	
	1 820	17 822	74,5	
Snímač 4	244	2 389	13,7	190,65
	709	6 943	37,5	
	1 281	12 544	66,8	
	1 805	17 675	93,9	
Snímač 5	244	2 389	11	243,1
	730	7 148	30,4	
	1 290	12 632	53	
	1 806	17 685	73,9	

Kalibrace tlakových snímačů



7.2 Hodnoty pro jednotlivé varianty

V následujících přílohách jsou uvedeny všechny naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé varianty zapojení.

7.2.1 Varianta jen s periferií

Varianta jen s periferií (varianta A)								
Napětí na čerpadle U [V]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
Celkový průtok soustavou Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo ve společné části Re_{Σ} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát ve společné části λ_{Σ} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Rozdíl tlaku mezi snímačem 3 a 4 Δp_{34} [Pa]	87,0	388,7	868,9	1509,7	2311,2	3137,0	3863,6	4663,4
Rozdíl tlaku mezi snímačem 4 a 2 Δp_{42} [Pa]	6,7	16,1	11,5	25,8	44,3	62,1	66,5	80,1
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 2 Δp_{52} [Pa]	115,8	434,7	927,7	1601,2	2488,0	3367,6	4137,1	4976,3
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 3 Δp_{53} [Pa]	22,1	29,9	47,3	65,7	132,5	168,4	207,0	232,9
Průtok periferií Q_{per} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost v periferii v_{per} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo v periferii Re_{per} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát v periferii λ_{per} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Průtok A-V zkratem Q_{AV} [ml/s]	0							
Rychlost v A-V zkratu v_{AV} [m/s]	0							
Reynoldsovo číslo v A-V zkratu Re_{AV} [1]	0							
Součinitel třecích ztrát v A-V zkratu λ_{AV} [1]	-----							

7.2.2 Varianta *po směru* s periferií

Varianta <i>po směru</i> s periferií (varianta B)								
Napětí na čerpadle U [V]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
Celkový průtok soustavou Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo ve společné části Re_{Σ} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát ve společné části λ_{Σ} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Rozdíl tlaku mezi snímačem 3 a 4 Δp_{34} [Pa]	14,4	54,6	116,9	202,2	308,6	447,2	585,0	755,3
Rozdíl tlaku mezi snímačem 4 a 2 Δp_{42} [Pa]	7,0	30,2	68,6	104,4	162,1	219,6	274,2	348,1
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 2 Δp_{52} [Pa]	28,2	90,6	197,8	329,4	500,6	701,0	903,5	1151,4
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 3 Δp_{53} [Pa]	6,9	5,9	12,3	22,8	29,8	34,2	44,3	48,0
Průtok periferií Q_{per} [ml/s]	0,8	2,8	5,5	8,6	12,0	15,7	19,1	22,7
Rychlost v periferií v_{per} [m/s]	0,005	0,018	0,036	0,056	0,078	0,102	0,124	0,148
Reynoldsovo číslo v periferií Re_{per} [1]	70,8	250,1	489,7	769,8	1070,2	1409,2	1706,6	2036,2
Součinitel třecích ztrát v periferií λ_{per} [1]	0,9042	0,2559	0,1307	0,0831	0,0598	0,0454	0,0492	0,0470
Průtok A-V zkratem Q_{AV} [ml/s]	8,2	15,2	21,5	27,4	33,0	38,3	43,9	49,3
Rychlost v A-V zkratu v_{AV} [m/s]	0,053	0,099	0,140	0,178	0,215	0,249	0,285	0,320
Reynoldsovo číslo v A-V zkratu Re_{AV} [1]	734,8	1361,1	1927,2	2452,7	2957,9	3424,5	3932,7	4408,7
Součinitel třecích ztrát v A-V zkratu λ_{AV} [1]	0,0871	0,0470	0,0477	0,0449	0,0428	0,0413	0,0399	0,0388
Ztrátový součinitel A-V zkratu ξ_{AVB} [1]	13,36	14,17	15,75	16,31	17,22	18,13	17,67	17,99

7.2.3 Varianta proti směru s periferií

Varianta proti směru s periferií (varianta C)								
Napětí na čerpadle U [V]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
Celkový průtok soustavou Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo ve společné části Re_{Σ} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát ve společné části λ_{Σ} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Rozdíl tlaku mezi snímačem 3 a 4 Δp_{34} [Pa]	9,6	51,4	122,1	230,5	359,3	521,7	693,5	895,7
Rozdíl tlaku mezi snímačem 4 a 2 Δp_{42} [Pa]	5,1	17,6	36,2	53,1	76,8	104,7	132,7	168,1
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 2 Δp_{52} [Pa]	23,0	79,3	179,5	320,7	488,4	695,6	910,6	1169,2
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 3 Δp_{53} [Pa]	8,3	10,3	21,2	37,0	52,2	69,2	84,4	105,4
Průtok periferií Q_{per} [ml/s]	0,5	2,6	5,7	9,5	13,4	17,6	21,5	25,5
Rychlost v periferii v_{per} [m/s]	0,003	0,017	0,037	0,062	0,087	0,114	0,139	0,166
Reynoldsovo číslo v periferii Re_{per} [1]	47,5	236,7	508,0	854,1	1199,9	1574,0	1920,7	2284,2
Součinitel třecích ztrát v periferii λ_{per} [1]	1,3468	0,2704	0,1260	0,0749	0,0533	0,0502	0,0477	0,0457
Průtok A-V zkratem Q_{AV} [ml/s]	8,5	15,4	21,3	26,5	31,6	36,4	41,5	46,5
Rychlost v A-V zkratu v_{AV} [m/s]	0,055	0,100	0,139	0,172	0,205	0,237	0,270	0,302
Reynoldsovo číslo v A-V zkratu Re_{AV} [1]	758,1	1374,6	1908,9	2368,4	2828,2	3259,7	3718,6	4160,7
Součinitel třecích ztrát v A-V zkratu λ_{AV} [1]	0,0844	0,0466	0,0478	0,0453	0,0433	0,0418	0,0405	0,0393
Ztrátový součinitel A-V zkratu ξ_{AVC} [1]	9,02	11,61	14,16	16,95	18,33	19,89	20,04	20,67

7.2.4 Varianta *po směru bez periferie*

Varianta <i>po směru bez periferie</i> (varianta D)								
Napětí na čerpadle U [V]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
Celkový průtok soustavou Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo ve společné části Re_{Σ} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát ve společné části λ_{Σ} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Rozdíl tlaku mezi snímačem 3 a 4 Δp_{34} [Pa]	-----							
Rozdíl tlaku mezi snímačem 4 a 2 Δp_{42} [Pa]	-----							
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 2 Δp_{52} [Pa]	32,8	126,5	294,6	520,6	806,6	1162,4	1546,8	1989,7
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 3 Δp_{53} [Pa]	-----							
Průtok periferií Q_{per} [ml/s]	0							
Rychlost v periférii v_{per} [m/s]	0							
Reynoldsovo číslo v periférii Re_{per} [1]	0							
Součinitel třecích ztrát v periférii λ_{per} [1]	-----							
Průtok A-V zkratem Q_{AV} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost v A-V zkratu v_{AV} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo v A-V zkratu Re_{AV} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát v A-V zkratu λ_{AV} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Ztrátový součinitel A-V zkratu ξ_{AVD} [1]	13,63	15,03	16,02	16,13	16,13	16,27	15,94	15,75

7.2.5 Varianta proti směru bez periferie

Varianta proti směru bez periferie (varianta E)								
Napětí na čerpadle U [V]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
Celkový průtok soustavou Q_{Σ} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost ve společné části trati v_{Σ} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo ve společné části Re_{Σ} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát ve společné části λ_{Σ} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Rozdíl tlaku mezi snímačem 3 a 4 Δp_{34} [Pa]	-----							
Rozdíl tlaku mezi snímačem 4 a 2 Δp_{42} [Pa]	-----							
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 2 Δp_{52} [Pa]	37,1	164,1	362,1	608,0	917,4	1317,2	1754,5	2261,1
Rozdíl tlaku mezi snímačem 5 a 3 Δp_{53} [Pa]	-----							
Průtok periferií Q_{per} [ml/s]	0							
Rychlost v periferii v_{per} [m/s]	0							
Reynoldsovo číslo v periferii Re_{per} [1]	0							
Součinitel třecích ztrát v periferii λ_{per} [1]	-----							
Průtok A-V zkratem Q_{AV} [ml/s]	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0	54,0	63,0	72,0
Rychlost v A-V zkratu v_{AV} [m/s]	0,058	0,117	0,175	0,234	0,292	0,351	0,409	0,468
Reynoldsovo číslo v A-V zkratu Re_{AV} [1]	805,6	1611,2	2416,9	3222,5	4028,1	4833,7	5639,3	6445,0
Součinitel třecích ztrát v A-V zkratu λ_{AV} [1]	0,0794	0,0499	0,0451	0,0419	0,0397	0,0379	0,0365	0,0353
Ztrátový součinitel A-V zkratu ξ_{AVE} [1]	16,19	20,55	20,42	19,33	18,73	18,79	18,43	18,23