

### Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

### Fakulta strojní



# INOVACE PŘEDMĚTU MODELOVÁNÍ A SIMULACE PRO ROZVOJ VE VÝVOJI A VÝZKUMU

### Studijní opora

Milada Kozubková Jana Rautová

### Ostrava 2010|2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 "Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu".

Recenze: doc. Dr. Ing. Lumír Hružík

Název: Inovace předmětu modelování a simulace pro rozvoj ve vývoji a výzkumu
Autoři: Milada Kozubková, Jana Rautová
Vydání: první, 2010

Počet stran: 37

Náklad:

Studijní materiály pro vybrané předměty na Fakultě strojní a Fakultě bezpečnostního inženýrství.

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.

23	Název:	Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
	Číslo:	CZ.1.07/2.3.00/09.0147
25	Realizace:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Milada Kozubková, Jana Rautová

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2719-3

### **POKYNY KE STUDIU**

#### Inovace předmětu modelování a simulace pro rozvoj ve vývoji a výzkumu

Skriptum je určeno pro předmět 338-0539/01 Modelování a simulace tekutinových mechanizmů, který je vyučován na Fakultě strojní v navazujícím magisterské studiu v 1 semestru a pro předmět 338-0538/01 Aplikovaná mechanika tekutin, který je vyučován na Fakultě bezpečnostního inženýrství v navazujícím magisterském studiu v 2 semestru. Skriptum se zabývá měřením, modelováním a simulací hydraulického rázu.

#### Prerekvizity

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa předmětu mechanika tekutin, matematika a fyzika.

#### Cílem učební opory

Cílem je seznámení se základními pojmy z problematiky hydraulického rázu, experimentální vyšetření dynamiky sloupce kapaliny, využití numerických metod pro řešení z oblasti hydraulického rázu a použití softwaru Matlab Simulink a SimHydraulic při řešení této úlohy. Problematika je řešena pro ustálený stav a následně jako časově závislá úloha. Cílem je srovnání naměřených hodnot z experimentu s výsledky modelování.

#### Vyučovací metody

Po prostudování modulu by měl student být schopen zvládnout namodelovat jednoduché úlohy v softwaru Matlab Simulink a SimHydraulic z oblasti vyšetření sloupce kapaliny.

#### Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studia výše uvedených předmětů, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit. Každé kapitole odpovídá níže popsaná struktura.

### Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



### Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



- Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět
  - Popsat ...
  - Definovat ...
  - ∔ Vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



#### Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.

### Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



### Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přejí autoři.

Milada Kozubková, Jana Rautová

# OBSAH

1	Ι	DYNAMIKA KAPALINY V DLOUHÉM POTRUBÍ	6
2	(	CEJCHOVÁNÍ CLONY	10
3	S	SCHÉMA ZAPOJENÍ A POPIS MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ	14
4	P	POSTUP MĚŘENÍ A JEHO VYHODNOCENÍ	17
5	N	NAMĚŘENÉ ZÁVISLOSTI	21
6	Ĕ	ŘEŠENÍ POMOCÍ SOFTWARU MATLAB SIMULINK	24
	6.1	Popis softwaru Matlab Simulink – ustálený stav	24
	6.2	Neustálený stav se zdrojem konstantního tlaku	
	6.3	Neustálený stav s čerpadlem	
7	V	VYHODNOCENÍ	

### 1 DYNAMIKA KAPALINY V DLOUHÉM POTRUBÍ





V dnešní době je problematika hydraulického rázu velmi závažná. Havárie obvodu při nevhodném zavírání ventilu může způsobit velké finanční ztráty.

Dynamika kapaliny v dlouhém potrubí je nestacionární (neustálené = časově závislé) proudění kapalin v potrubí. Neustálené proudění je spojeno se změnou rychlosti a tlaku v čase. Tento stav může být v nejjednodušším případě vyvolán uzavřením ventilu na konci dlouhého potrubí. V praxi obvykle řešíme tyto úlohy jako jednorozměrné proudění. Při řešení této problematiky záleží především, zda budeme uvažovat stlačitelnost kapaliny.

Jestli-že nebudeme respektovat stlačitelnost kapaliny lze k řešení využít nejjednodušší přístup – Bernoulliho rovnici pro neustálené proudění nestlačitelné kapaliny, která je odvozená z Eulerovy rovnice v literatuře [1] a její konečný tvar pro skutečnou kapalinu je

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + a \cdot l + g \cdot h_z \qquad \left[ J \cdot kg^{-1} \right]$$
(1.1)

kde  $a \cdot l$  je zrychlení (resp. zpomalení) a sloupce kapaliny dlouhého l, což respektuje setrvačnost kapaliny a vypočítá se jako

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \qquad [m \cdot s^{-2}] \qquad (1.2)$$

Tento přístup však předpokládá malé změny tlaku a rychlosti, nestlačitelnou kapalinu  $\rho = konst., K \rightarrow \infty$ , tuhé potrubí  $E \rightarrow \infty$ .

Jestliže změny tlaku jsou větší, je třeba přihlížet ke stlačitelnosti kapaliny  $\rho \neq konst$ . a neustálené proudění se řeší jako hydraulický ráz. U hydraulického rázu jde o přeměnu kinetické energie kapaliny  $E_k$  v deformační práci kapaliny  $E_d$ . Z této rovnováhy  $E_k = E_d$  po dosazení

$$\frac{1}{2}m \cdot v^2 = \frac{1}{2}F \cdot \Delta x \tag{1.3}$$

a dalším odvozením vyplývá zvýšení tlaku při hydraulickém rázu

$$\Delta p = \rho \cdot a_s \cdot \Delta v = \kappa \cdot \rho \cdot a_t \cdot \Delta v \qquad [Pa] \qquad (1.4)$$

(Žukovského vztah, 1898), kde  $\Delta v$  je změna (rozdíl) rychlostí v počátečním a koncovém stavu,  $a_s$  je skutečná rychlost šíření tlakových vln (tj. rychlost zvuku v potrubí),  $\rho$  je hustota kapaliny.

Hydraulický ráz se projevuje periodickými změnami průtoků a tlaků (rázové vlny), které se u skutečných kapalin vlivem vnitřního tření utlumí až prakticky do zániku.

Doba, za kterou se rázová vlna vrátí do místa vzniku (k uzávěru), se nazývá doba běhu vlny T a určí se

$$T = \frac{2 \cdot l}{a_s} \tag{1.5}$$

kde l je délka potrubí a  $a_s$  skutečná rychlost zvuku, která je určena vztahem

kde součinitel  $\kappa \langle 1$  zahrnuje vliv pružnosti stěn potrubí a pro potrubí lze vypočítat.

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{s}\frac{K}{E}}}$$
(tenkostěnné) 
$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\frac{K}{E}\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2}}}$$
(tlustostěnné) (1.7)

kde K je modul objemové pružnosti kapaliny, E je modul pružnosti v tahu potrubí, s je tloušťka stěny v potrubí, d je vnitřní průměr potrubí a D je vnější průměr potrubí.

Jestliže se veškerá kinetická energie přemění v deformační práci, dojde ke stoupnutí tlaku o  $\Delta p$  (dle Žukovského vztahu), což odpovídá totálnímu hydraulickému rázu

$$t_{uz} \le T = \frac{2 \cdot l}{a_s} \tag{1.8}$$

Při delší době uzavírání armatury, tj.  $t_{uz}$  T, je zvýšení tlaku při hydraulickém rázu menší a označuje se jako částečný hydraulický ráz. Za předpokladu lineárního poklesu rychlosti kapaliny v čase, se určí stoupnutí tlaku

$$\Delta p_{\check{c}} = \Delta p \frac{T}{t_{uz}}$$
 [Pa] (1.9)

#### Příklad 1.1. Neustálené proudění nestlačitelné kapaliny

Určete zvýšení tlaku  $\Delta p = p_2 - p_1$  při náhlém uzavření ventilu v potrubí o délce l. Uzavírání proběhne za čas  $t_u$ . Počáteční rychlost vody je v. Předpokládá se nestlačitelná kapalina a tuhé potrubí.

Zadáno:

$$l = 2000 \text{ m}$$

$$t_u = 1 \text{ s}$$

$$v = 1 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$
Vypočtěte:
$$a = ? \text{ m.s}^{-2}$$

$$\Delta p = ? \text{ Pa}$$

Řešení:
zrychlení
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{1-0}{0-1} = -1m \cdot s^{-2}$$
Bernoulliho rovnice
$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + a \cdot l \qquad \Rightarrow$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -a \cdot l \cdot \rho = -(-1) \cdot 2000 \cdot 1000 = 2MPa$$

#### Příklad 1.2. Neustálené proudění stlačitelné

Stanovte výtokovou rychlost v z nádrže, ve které je hladina vody ve výšce h. Určete zvýšení tlaku  $\Delta p$  při totálním hydraulickém rázu. Ztrátový součinitel na vtoku do potrubí je  $\zeta_1$ , ztrátový součinitel ventilu je  $\zeta_2$  a skutečná rychlost zvuku  $a_s$ .

Zadáno:

h = 4 m  $\zeta_1 = 0.5$   $\zeta_2 = 16$   $a_s = 1200 \text{ m.s}^{-1}$   $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ Vypočtěte:  $v = ? \text{ m.s}^{-1}$   $\Delta p = ? \text{ MPa}$ 



Řešení:

rychlost

$$h \cdot g = \frac{v^2}{2} + \frac{v^2}{2} (\zeta_1 + \zeta_2) \implies \\ v = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot g}{1 + \zeta_1 + \zeta_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 9,81}{1 + 0,5 + 16}} = 2,118 \, m \cdot s^{-1}$$

tlak (Žukovkého vztah)

 $\Delta p = \rho \cdot a_s \cdot \Delta v = 1000 \cdot 1200 \cdot (2,118 - 0) = 2,54MPa$ 

# Shrnutí pojmů 1.1.

Neustálené proudění, stlačitelná a nestlačitelná kapalina, Žukovského vztah, zvýšení tlaku, totální a částečný hydraulický ráz, doba běhu vlny, modul objemové pružnosti kapaliny, rychlost zvuku v kapalině.



### Otázky 1.1.

- 1. Vysvětlete pojem nestacionární.
- 2. Jaký je rozdíl mezi stlačitelnou a nestlačitelnou kapalinou?
- 3. K jaké přeměně energie dochází u hydraulického rázu?
- 4. Jak je definována doba běhu vlny.
- 5. Jak lze vyjádřit rychlost zvuku v kapalině.
- 6. Jaký je rozdíl mezi totálním a částečným hydraulickým rázem?
- 7. Jak je definováno zvýšení tlaku dle Žukovského?

### 2 CEJCHOVÁNÍ CLONY





### Výklad

Před vlastním měřením je zapotřebí mít dobře ocejchovanou clonu, aby byl správně vyhodnocovaný průtok v Matlabu. Pomocí tlakového spádu na cloně lze určit průtok kapaliny v hadici. Rychlost proudění (objemový průtok) je úměrná tlakovému spádu na cloně.

Postup při cejchování clony je následující – při postupném přivírání kulového kohoutu (V) se odečte na průtokoměru (PR) hodnota průtoku a v Matlabu hodnota napětí, která je snímána z diferenčního manometru (DM). Tyto hodnoty se zapisují do programu Microsoft Excel, vyhodnotí se cejchovní křivka viz Obrázek 2.1 a určí se rovnice regrese.



#### Obrázek 2.1 – Cejchovní křivka clony

pozn.: Diferenční manometr (DM) má rozsah tlaků  $\pm 10$  kPa, což odpovídá proudovému výstupu (4-20) mA. Jelikož je nutné převést proudový signál na napěťový signál, byl do obvodu zařazen převodník (P) s elektrickým odporem 100 $\Omega$ . Také bylo nutné určení nulového průtoku, což odpovídá napěťovému signálu 1,209 V = 0 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Vyhodnocená rovnice regrese se zapíše jako funkce při určování průtoku při měření hydraulického rázu, viz Obrázek 2.2.





Obrázek 2.2 – Zapojení v Matlabu

Obrázek 2.2 znázorňuje zapojení pro vyhodnocování objemového průtoku Q při měření. Ikona označena jako "To Workspace1" nám slouží k převodu dat do programu Microsoft Excel, kde bude možné vykreslovat požadované závislosti pro srovnávání modelování a měření.



Obrázek 2.3 – Pěticestná ventilová souprava [2]

Pěticestná ventilová souprava slouží k uzavření přívodu tlakového média při odpojení snímače tlakové diference, k propojení obou vstupních komor snímače tlakové diference při seřizování nuly na provozním tlaku a umožňuje odvzdušnění a odkalení imulzního potrubí. [2]

Skříň snímače má samostatné komory pro elektroniku a pro připojovací a testovací svorky. Při použití čidla s oddělovacími membránami z materiálů Hastelloy C, Monel nebo Tantal lze snímačem měřit i agresivní látky. Snímač je chráněn proti přepólování napájecího zdroje. Vzhledem k přímému elektronickému snímání tlakové diference kapacitním čidlem je dosaženo vynikajících parametrů snímače. Ve snímači není používán mechanický přenos síly,

čímž jsou eliminovány problémy s rázy a chvěním. Jestliže hodnota vstupního tlaku překročí nastavené meze rozpětí, elektronika nastaví výstupní signál na hodnotu odpovídající příslušnému poplachovému hlášení. Snímač dále provádí pomocí autodiagnostického programu svoji nepřetržitou kontrolu a v případě, že zjistí poruchu v činnosti přístroje, nastaví výstupní signál na předem uživatelem nastavenou hodnotu pro poplachové hlášení. Montáž, cejchování a provoz jsou maximálně zjednodušeny kompaktní konstrukcí snímače a především elektronikou SMART. [3]



Obrázek 2.4 – Snímač tlakové diference [3]

Čidlo snímače pracuje na principu diferenciálního kondenzátoru. Měřený tlak se přenáší přes oddělovací membránu a kapalnou náplň na měřicí membránu umístěnou uprostřed čidla. Z druhé strany membrány obdobně působí referenční tlak. Pružná měřicí membrána ve funkci třetí elektrody diferenciálního kondenzátoru se prohne úměrně tlaku nebo tlakové diferenci, která na ni působí. Souměrně k měřicí membráně jsou umístěny dvě pevné elektrody diferenciálního kondenzátoru. Čidlo je buzeno oscilátorem. Výstup z čidla je pak usměrňován demodulátorem. Výstupem obvodů oscilátor/demodulátor je teplotně kompenzovaný proud, úměrný přiváděnému vstupnímu tlaku. Analogově číslicový převodník integračního typu převádí proud z demodulátoru na číslicový tvar. Tuto hodnotu pak využívá mikroprocesor k určování hodnoty vstupního tlaku.

Mikroprocesor provádí výpočty pro linearizaci s využitím hodnot vložených během charakterizační procedury. Dále procesor zabezpečuje výpočty pro změnu rozsahu, konverzi technických jednotek, tlumení, druhou odmocninu, dolaďování čidla, diagnostiku snímače a zabezpečuje číslicovou komunikaci.

Číslicově analogový převodník mění opravený číslicový signál z mikroprocesoru na analogový signál 4-20 mA, jenž se přivádí do výstupního obvodu. [3]

### Shrnutí pojmů 2.1.

Cejchování clony a převod dat do programu Microsoft Excel.



- 8. K čemu slouží cejchování clony?
- 9. Vysvětlete princip funkce pěticestné ventilové soupravy.
- 10. Vysvětlete princip funkce snímače tlakové diference.

13

# 3 SCHÉMA ZAPOJENÍ A POPIS MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ



### Výklad

Zkušební měřicí obvod je tvořen těmito prvky: nádrž na vodu (N), čerpadlo (HG), snímače tlaku (M1, M2, M3), zdroj napájení snímačů tlaků (Z), clona (C), diferenční manometr (DM) pro měření rozdílu tlakové ztráty na cloně, hadice (H), uzavírací kulový kohout se snímáním polohy (V), převodník (P), průtokoměr pro ocejchování clony (PR), počítač (PC), viz Obrázek 3.1 a Obrázek 3.2.



Obrázek 3.1 – Schéma zapojení obvodu pro měření hydraulického rázu

Nádrž (N) Obiem pádrže:	$42  dm^3$		
Výrahaci	42 ulli Valtar Špal	ale plani	
Vylobce.	valler Spar	ek-piexi	
Cerpadio (HG)	airlalační	arnadla	
Typ:		25/4 220 V DN 10	
Max tlakavý mád	WILUKS A	23/4 230 V PIN 10	
Imanovitá otáčky	10 KPa	/2000 at min <sup>-1</sup>	
Výroboo:	1200/1030/ WILO	2000 01.11111	
v ylobee.	WILO		
Snímače (M1. M2. N	(13) (p <sub>1</sub> p <sub>2</sub> , p	03)	
Typ:	TMG 518 2	Z3G, použit 3x	
Rozsah:	$(0; 1.10^5)$ P	a	P 1 TMG 518 236
Výstup:	(0÷20) mA		Vive Tool Key Vive O a 20 mil
Napájení:	(12÷36) V		
Závit:	M12x1,5		
Výrobce:	CRESSTO	Rožnov pod Radhoš.	
<b>7</b> Jacobian an <b>1</b>	~~~		
Zaroj napeti (Z) - si	ouzi pro nap	ajeni snimacu	1 aunit
Typ: Nanájaní:	BK125 (SK)	omi stadinž. zdroj)	Care (1111)
Napajem.	220 0/3062	2	
Clona (C)		4	
Vnitř. průměr clony:	20 mm		1 action
Vnitř. prům. potrubí:	25,4 mm	<b>₩</b>	
Výrobce:	VŠB	1,25	
		34,2	
		1,37	
Hadice (H)			
Тур:	MP 20 EPI	DM	
Pracovní tlak	2 MPa		
Průměr	25/35  mm		
Hmotnost	0,6 kg.m <sup>-1</sup>	TT 1 TT /1 /	
Vyrobce:	KONEKT	Hradec Králové	

Specifikace prvků

Uzavírací kulový ko	bhout (V)	
Světlost:	DN25	
Tlaková třída:	ANSI 800	
Výrobce:	MARTECH Hradec Králové	
Na ventilu jsou uchy	ceny 2 mech. spínače s kladičkou.	
Diferenční manome	tr (DM)	
Тур:	ST 3000 SMART	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
Model:	STD924-E1A-00000-AN	
Výrobce:	Honeywell	
Krytí dle ČSN:	IP65	
Pěticestná ventilová	soustava	
Typ:	VS501-9642514	
Výrobce:	Nová Paka	
Provozní tlak:	až 42MPa	
Převodník (P)		
převádí proudový vý	stup z diferenčního manometru na	
napěťový signál		
Průtokoměr (PR)		
Typ:	Flomic FL 1014	
Výrobce:	ELIS Plzeň a.s.	( analis
Připojení:	G <sup>3</sup> /4"	
Tlak:	1,6MPa	
Proudový výstup:	4 - 20  mA	
Třída přesnosti:	С	
Krytí dle ČSN:	IP67	



Obrázek 3.2 – Realizovaný obvod pro měření hydraulického rázu

# 4 POSTUP MĚŘENÍ A JEHO VYHODNOCENÍ



### Čas ke studiu: 1/2 hodiny

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- 4 Popsat princip měřícího obvodu.
- 4 Definovat postup při měření.
- 4 Umět vyhodnotit měření

Výklad

Při měření hydraulického rázu postupujeme následovně:

PC a čerpadlo se připojí do elektrické sítě a otevře se uzavírací ventil. Zapne se zdroj sloužící k napájení snímačů tlaku, PC, spustí se program Matlab 6.5.1 a nastaví se adresář C:\MATLAB6p5p1\work\raz. V programu Matlab se spustí Simulink a otevře se soubor ve kterém je správně definovaný obvod pro měření. Současně je zapotřebí otevřít program Microsoft Excel pro zapisování naměřených tlaků na snímačích, průtoků a doby uzavírání.



Obrázek 4.1 – Zapojení v Matlabu

Zapne se čerpadlo a v souboru se spustí měření ikonou  $\blacktriangleright$ . Měření trvá minimálně 10s. Nejprve se naměří ustálené stavy, tj. při otevřeném a při uzavřeném ventilu. Poté se provede měření pro uzavírání ventilu, tj. uzavírací ventil je otevřený, spustí se měření a asi po 2 sekundách se uzavře ventil a vyčká se, dokud neproběhne měření. Grafy vykreslíme po kliknutí na ikonu  $\square$  a to:

- 1. průběh průtoku Q, viz Obrázek 4.1,
- 2. průběh tlaků  $p_1, p_2, p_3$ , viz Obrázek 4.1,

Naměřené hodnoty se převedou do Microsoft Excelu. [4]

	naměřené hodnoty			stav ventilu	vypočítané hodnoty				
Měř.	označení souboru	$t_u$ [s]	$t_p$ [s]	-	$egin{array}{c} Q_{_{\mathcal{V}}} \ \left[ m^3 \cdot h^{^{-1}}  ight] \end{array}$	$v$ $\left[m \cdot s^{-1}\right]$	$a_{s,\exp}$ $\left[m \cdot s^{-1}\right]$	$\Delta p_{exp}$ [Pa]	
ustálený stav									
		I	-	otevřen			-	-	
		I	-	uzavřen			-	-	
neustálený stav									
				uzavírání	-	-			
					-	-			
				otevírání	_	-			

Tab. 4.1 – Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Vyhodnocení měření

Pro výpočet hydraulického rázu je nutné znát rychlost proudění kapaliny v hadici, kterou lze vypočítat z průtoku  $Q = 1,01 m^3 \cdot h^{-1}$ . Vyhodnocení naměřených hodnot se provede doplněním tab. 4.1. Postup lze tedy shrnout do následujících bodů.

1. Rychlost proudění kapaliny v hadici lze vypočítat z rovnice kontinuity. Průřez hadice je v celém systému konstantní d = 25 mm. Potom rychlost vypočítáme

$$Q = S \cdot v \qquad \implies \qquad v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 1,01}{\pi \cdot 0,025^2 \cdot 3600} = 0,572 \, m \cdot s^{-1} \tag{4.1}$$

2. Z grafu průběhů tlaků (Obrázek 4.2) při hydraulickém rázu lze odečíst hodnotu periody t<sub>p</sub>. Jestli-že jsme si uložili také hodnoty do programu Excel, lze určit periodu t<sub>p</sub> z číselných hodnot v programu. V programu Excel najdeme nejnižší tlak v první vlně a určíme dobu pro tento tlak t<sub>1</sub>. Stejný postup opakujeme pro druhou vlnu. Pro

nejmenší tlak je zde doba  $t_2$ . Odečtením těchto časů jsem získal přesnou hodnotu periody  $t_p$ 

$$t_p = t_2 - t_1 \tag{4.2}$$

3. Doba běhu vlny T se určí

$$T = \frac{t_p}{2} = \frac{t_2 - t_1}{2}$$
 [s] (4.3)

4. Rychlost šíření tlakové vlny  $a_s$  lze vypočítat z délky potrubí l = 48,4m (čerpadlo – uzavírací ventil) a z velikosti doby běhu vlny *T* 



5. Dále lze určit stoupnutí tlaku  $\Delta p$  při hydraulickém rázu pomocí Žukovského vztahu

$$\Delta p_{\exp} = \rho \cdot a_{S,\exp} \cdot \Delta v \qquad [Pa] \qquad (4.5)$$

Teoretické určení stoupnutí tlaku  $\Delta p$  při hydraulickém rázu pomocí Žukovského vztahu

6. Pro umělohmotnou trubici s kapalinou se v literatuře udává rychlost šíření tlakové vlny v rozmezí

$$a_s = (20 \div 800) m.s^{-1} \tag{4.6}$$

7. Modul stlačitelnosti kapaliny

$$a_s = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad \Rightarrow \qquad K = a_s^2 \cdot \rho \qquad [Pa] \qquad (4.7)$$

8. Doba běhu jedné periody lze vypočítat z délky potrubí l = 48,4 m (čerpadlo – uzavírací ventil)

$$T = \frac{2 \cdot l}{a_s} \tag{4.8}$$

9. Rychlostní diference se určí jako rozdíl rychlosti proudění kapaliny při otevřeném ventilu v a rychlosti proudění kapaliny při uzavřeném ventilu  $v_0$ 

$$\Delta v = v - v_0 \qquad \qquad \left[ m \cdot s^{-1} \right] \tag{4.9}$$

- 10. Žukovského vztah pro hydraulický ráz
- $\Delta p = \rho \cdot a_s \cdot \Delta v \qquad [Pa] \qquad (4.10)$

Výpočet je proveden pro krajní hodnoty rozmezí rychlosti šíření tlakové vlny.

Tab. 4.2 – Tabulka vypočtených hodnot

	experimentální hodnoty		teoretické hodnoty	
	$a_s$	,ex p	а	s
	dobu uzavírání ventilu		rychlost šíření tlakové	
	$t_u$ [s]		vlny $a_s \left[ m \cdot s^{-1} \right]$	
	0,09	-	-	-
rychlost šíření tlakové vlny $a \left[ m \cdot s^{-1} \right]$	120,25	-	20	800
doba běhu vlny $T$ [s]	0,805	-	4,84	0,121
modul stlačitelnosti K [Pa]	1,446.10 <sup>7</sup>	-	0,6.10 <sup>6</sup>	640.10 <sup>6</sup>
tlak pro hydraulický ráz $\Delta p [Pa]$	68,78.10 <sup>3</sup>	-	$11,44.10^3$	457,6.10 <sup>3</sup>

# Shrnutí pojmů 4.1.

Určení periody, rychlosti šíření tlakové vlny, modulu stlačitelnosti kapaliny a stoupnutí tlaku při hydraulickém rázu. Získání představy o měření.



### Otázky 4.1.

- 11. Porovnejte skutečný a teoretický modul stlačitelnosti kapaliny.
- 12. Jaká je rychlost šíření tlakové vlny u vody při rychlém uzavření ventilu.

# 5 NAMĚŘENÉ ZÁVISLOSTI



### Výklad

Z naměřených závislostí, lze určit konstanty pro modelování v programu Matlab Simulink.



Obrázek 5.1 – Poloha ventilu

Doba uzavírání

$$t_u = 5,14 - 5,05 = 0,09 \, s \tag{5.1}$$

Doba otevírání

 $t_o = 15,01 - 14,88 = 0,13s \tag{5.2}$ 

Ustálený průtok při otevřeném ventilu

$$Q = 1,01 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1} \tag{5.3}$$





Tlaková ztráta na ventilu

$$p_{z,ventil} = 13250 \, Pa \tag{5.4}$$

Tlaková ztráta v potrubí

$$p_{z,potrubi} = 13600 \, Pa \tag{5.5}$$

Tlak na tlakovém zdroji

$$p_{zdroj} = 30400 \, Pa$$
 (5.6)



Obrázek 5.3 – Určení hodnot tlaků z grafu

# Shrnutí pojmů 5.1.

Určení periody, rychlosti šíření tlakové vlny, modulu stlačitelnosti kapaliny a stoupnutí tlaku při hydraulickém rázu. Získání představy o měření.



# Otázky 5.1.

- 13. Porovnejte skutečný a teoretický modul stlačitelnosti kapaliny.
- 14. Jaká je rychlost šíření tlakové vlny u vody při rychlém uzavření ventilu.
- 15. Popište postup měření.

# 6 ŘEŠENÍ POMOCÍ SOFTWARU MATLAB SIMULINK

Simulace v programu Matlab Simulink začíná postupně od nejjednoduššího modelu, tj. od ustáleného stavu, čerpadlo je nahrazeno ideálním zdrojem konstantního tlaku s konstantní hodnotou tlaku a jako ventil je použitý dvoucestný rozváděč, který je otevřený. Takto sestavený jednoduchý obvod nám slouží k určení konstant – výtokový součinitel ventilu, ekvivalentní délky potrubí a určení průtoku v potrubí. V dalších kapitolách bude obvod postupně doplňován, tak aby odpovídal skutečnosti, a bude modelováno neustálené proudění.

### 6.1 Popis softwaru Matlab Simulink – ustálený stav





Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

4 Namodelovat jednoduchý obvod v programu Matlab Simulink.



### Výklad

Pro simulaci obvodu v programu Matlab Simulink jsou použity tyto prvky s nastavením, které je popsáno níže.



#### Nádrž (Hydraulic Reference)

(Simulink / Simscape / Foudation library / Hydraulic / Hydraulic elements / Hydraulic Reference)

Nádrž plní funkci zásobníku kapaliny, představuje připojení k atmosféře.



#### Zdroj tlaku (Hydraulic Pressure Source)

(Simulink / Simscape / Foudation library / Hydraulic / Hydraulic Sources / Hydraulic Pressure Source)

Jedná se o zdroj tlaku, kde hodnota tlaku je zadávaná pomocí konstanty v jednotkách [Pa].



Simulink S-PS měnič (Simulink-PS Converter) (Simulink / Simscape / Utilities / Simulink-PS Converter)

Prvek převádí bezrozměrný vstupní signál Simulinku na fyzikální signál.



PS-S Simulink měnič (PS-Simulink Converter )

(Simulink / Simscape / Utilities / PS-Simulink Converter)

Prvek převádí fyzikální vstupní signál na bezrozměrný signál Simulinku.



Konstanta (Constant)

(Simulink / Commonly Used Blocks / Constant)

Při modelování ustáleného stavu je v obvodu použitá konstanta pro určení hodnoty tlaku na zdroji  $p_{zdroj} = 30400 Pa$  a také pro určení otevření ventilu *otevreno* = 1.



### Výpočtová konfigurace (Solver configuration)

(Simulink / Simscape / Utilities / Solver configuration

Prvek, který definuje výpočetní zařízení nastavené pro simulaci. V manuálu se doporučuje pro výpočty zatrhnout: Start simulation from steady state.



#### Průtokoměr (Hydraulic Flow Rate Sensor)

(Simulink / Simscape / Foudation library / Hydraulic / Hydraulic Sensors / Hydraulic Flow Rate Sensor)

Prvek pro snímání průtoku, kontroluje hodnotu průtoku kapaliny na vstupu do obvodu, tj. za čerpadlem, jednotka  $[m^3 \cdot s^{-1}]$ .



#### Manometr (Hydraulic Pressure Sensor)

(Simulink / Simscape / Foudation library / Hydraulic / Hydraulic Sensors / Hydraulic Pressure Sensor)

Prvek pro snímání tlakové diference, jednotka [Pa] nebo [bar].



Vykreslení (Scope) (Simulink / Sinks / Scope)

Blok pro kreslení grafu jako časové závislosti zvolené veličiny.



**Display (Display)** (Simulink / Sinks / Display)

Blok pro okamžité vypsání naměřené hodnoty.



#### Hydraulická kapalina (Custom Hydraulic Fluid)

(Simulink / Simscape / Foudation library / Hydraulic / Hydraulic utilities / Custom Hydraulic Fluid)

Parametry pro definování kapaliny

Fluid density	hustota	$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Kinematic viscosity	kinematická viskozita	$10^{-6}  m^2 \cdot s^{-1}$
Bulk modulus at atm. pressure and no gas	modul pružnosti bez vzduchu	2.10 <sup>9</sup> Pa
Relative amount of trapped air	rel. množství obsaženého vzduchu	$1.10^{-20}$



Dělené potrubí (Segmented Pipeline)

(Simulink / Simscape / SimHydraulic / Pipelines / Segmented Pipeline)

Dělené potrubí reprezentuje hydraulické potrubí s kruhovým průřezem rozděleným příčnými řezy jako soubor stejných, sériově zapojených dílů - soustředných parametrů. Každá část se skládá z odporové trubky, bloku setrvačnosti kapaliny a stlačitelnosti kapaliny.

Parametry pro definování segmentovaného potrubí

Pipe internal diameter	vnitřní průměr potrubí	0,025 m	
Pipe length	délka potrubí	48,4 m	
Number of segments	počet segmentů	10	
Aggregate. equiv. length of local resis. ekvivalentní délka místních ztrát			
Internal surface roughness height	drsnost vnitřního povrchu stěn	$2,5 \cdot 10^8 mm$	
Laminar flow upper margin	horní laminární hranice	$2.10^{3}$	
Turbulent flow lower margin	dolní turbulentní hranice	$4.10^{3}$	
Pipe wall type	typ stěny trubky	Rigid - tuhá	
Specific heat ratio	měrné teplo	1,4	

Pro první výpočet byl použitý optimální počet 10 segmentů, více segmentů prodlužuje simulaci. Dále byla určena ekvivalentní délka potrubí jako 37m.



#### Rozváděč (2-Way Directional Valve)

(Simulink / Simscape / SimHydraulic / Valves / Directional Valves / 2-Way Directional Valve)

Rozváděč slouží v obvodu jako uzavírací ventil. Jeho úkolem v obvodu je vyvolat skokovou změnu signálu.

Parametry pro definování uzavíracího ventilu

Model parameterization	model parametrizace	
By max. area and opening max	x. plochou a otevřením	
Valve passage maximum area	maximální průtočná plocha	$4,909 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Valve maximum opening	maximální otevření ventilu	1m
Flow discharge coefficient	výtokový součinitel	0,1
Initial opening	počáteční otevření	0 <i>m</i>
Critical Reynolds number	kritické Reynoldsovo číslo	12
Leakage area	průtočná plocha lekáže	$1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Určení plochy

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.025^2}{4} = 4.909 \cdot 10^{-4} m^2$$
(6.1)

Výtokový součinitel

$$C_{D} = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} = 0.1 \text{ kde } p = \zeta \cdot \frac{v^{2}}{2} \cdot \rho = \zeta \cdot \frac{Q_{v}^{2}}{2 \cdot S^{2}} \cdot \rho \Longrightarrow \zeta = \frac{2 \cdot S^{2} \cdot p}{Q_{v}^{2} \cdot \rho}$$
(6.2)

Data pro spuštění analýzy

Před spuštěním výpočtu je ještě nutné nastavit konfigurační parametry výpočtu. Patří mezi ně především

- 1. typ kroku, volíme variable-step, automatický;
- 2. výpočet (solver) ode15s (stiff/NDF), což je jedna z možných numerických metod pro řešení obyčejných diferenciálních rovnic v SimHydraulics.

Ostatní položky jsou nastaveny a není potřeba je měnit. V tomto okně lze rovněž nastavit čas výpočtu, který ale lze nastavit i na hlavní liště programu, což je rychlejší, především v případě, je-li potřeba jej často měnit.

k Configuration Parameter	s: obvraz962/Configu	ration (Active)					×
Select: Solver Data Import/Export	Simulation time Start time: 0.0		-(	Stop time: 3			
Optimization     Jing nostics     Sample Time     Data Validity     Type Conversion     Connectivity     Compatibility     Model Referencing     Hardware Implementation     Model Referencing     Seal-Time Workshop     Model The Second	Solver options Type: Max step size: Min step size: Initial step size: Zero crossing control: Solver reset method:	Variable-step auto auto auto Use local settings Fast le data transfers between tas	× × ×	Solver: Relative tolerance: Absolute tolerance: Maximum order:	ode15s (stiff/ 1e-6 auto 5	NDFJ	×
Symbols Custom Code Debug Interface E Simscape SimMechanics	Solver diagnostic cont Number of consecutive Consecutive zero cros Number of consecutive	rols e min step size violations allov sings relative tolerance: e zero crossings allowed:	ved: 1 10*128 1000	*eps			
			[	OK	Cancel	Help	Apply

Výpočet se spustí příkazem Simulink / Simulace /Start

Obrázek 6.1 – Simulation / Configuration Parameters – nastavení parametrů



Obrázek 6.2 – Modelování ustáleného stavu

Modelováním ustáleného stavu byly zjištěny konstanty – ekvivalentní délka potrubí, která je 37m a výtokový součinitel ventilu, který je 0,1. Také je nutné kontrolovat hodnotu průtoku, která je 2,806 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>.

### 6.2 Neustálený stav se zdrojem konstantního tlaku



Ve stávajícím obvodu se provede několik změn, především proto, aby bylo možné vyšetřovat dynamický jev. Nejprve se na uzavírací ventil připojí signál pro uzavření a otevření dle měření, aby bylo možné porovnávat tlak před ventilem (na konci hadice). Pro zavedení signálu lze použít prvek Signal Builder.



#### **Signal Builder**

(Simulink / Sources / Signal Builder)

			Time (sec)			
0	5	10	15	20	25	30
0						
0.2						
0.4						
0.6						
0.8						
1						
Signs	al 1	:	i	:	:	1
ev/uzav	1	1	0	0	1	1
cas [s]	0	5,05	5,14	14,88	15,01	30

Tab. 6.1 – Řídicí signál pro uzavření - otevření ventilu

Obrázek 6.3 – Řídicí signál pro uzavření - otevření ventilu

Pro porovnání s měřením bude zapotřebí ukládat do programu Microsoft Excel hodnoty tlaku před ventilem (na konci potrubí), hodnoty průtoku, a jelikož při výpočtu používáme variabilní časový krok, tak je také nutné ukládat čas. Pro převod dat lze použít následující prvek.

### simout To Workspace

#### To Workspace

(Simulink / Sinks / To Workspace)

Blok pro zápis do pracovní oblasti – lze zapisovat vstupy vybraného pole do hlavní pracovní oblasti Matlabu a najdou se v základním okně Matlab/Workspace. V tomto prostoru se mohou závislosti vykreslovat podobně jako v EXCELu a také do tohoto software exportovat.

Z důvodu přesnějšího modelování, lze z měření definovat hodnotu modulu pružnosti kapaliny K =  $1,45.10^7$  Pa. Software Matlab Simulink nám umožňuje definovat teoretickou hodnotu modulu pružnosti kapaliny, tzn. bez obsahu vzduchu, a současně definovat relativní množství obsaženého vzduchu v kapalině. Tato hodnota je však obtížně měřitelná, proto lze zahrnout vliv vzduchu do hodnoty modulu pružnosti kapaliny.

Za výše uvedených podmínek lze provést simulace a vyhodnotit vliv změny počtů segmentů v segmentovaném potrubí, viz Obrázek 6.4.



Obrázek 6.4 – Tlak před ventilem v závislosti na počtu segmentů

Z Obrázek 6.4 – závislosti tlaku před ventilem (na konci potrubí) na čase lze udělat závěr, že větší počet segmentů potrubí snižuje periodu dynamického děje a zvětšuje amplitudu.

Další úpravu v obvodu, kterou lze provést, je připojení řídícího signálu na zdroj konstantního tlaku. Od této změny v simulaci, lze očekávat zvýšení tlaku při zavřeném ventilu na hodnotu určenou z měření.



Obrázek 6.5 – Řídicí signál zdroj tlaku

čas [s]	0	5,05	5,14	14,88	15,01	30
tlak [Pa]	30400	30400	44000	44000	30400	30400

Tab. 6.2 – Řídicí signál	na zdroji konstantního	tlaku
--------------------------	------------------------	-------

Po úpravách popsaných v kapitole 6.2 simulovaný obvod vypadá dle Obrázek 6.6.



Obrázek 6.6 – Simulovaný obvod



Obrázek 6.7 – Srovnání tlaku před ventilem

Výsledkem simulace je graf, viz Obrázek 6.7, kde je srovnán tlak před ventilem z měření, ze simulace v Matlabu Simulinku při použití konstantní hodnoty tlaku na vstupu na zdroji tlaku a ze simulace v Matlabu Simulinku při použití časové závislosti tlaku – řídícího signálu, viz Obrázek 6.5, na vstupu na zdroji tlaku.

Z grafu, viz Obrázek 6.7, je patrné, že maximální hodnota tlaku je srovnatelná při použití konstantní hodnoty tlaku na vstupu na zdroji. Avšak větší shody je dosaženo při ustálené hodnotě tlaku při uzavřeném ventilu v obvodu se zdrojem, který je řízen pomocí řídícího signálu.

### 6.3 Neustálený stav s čerpadlem



Při měření bylo použito čerpadlo WILO25/4, jehož charakteristiku udává výrobce, viz *Obrázek 6.8.* Jelikož jsou známy všechny parametry čerpadla, lze do obvodu zařadit místo zdroje konstantního tlaku čerpadlo, které bude věrohodněji simulovat daný obvod.





Obrázek 6.8 – Charakteristika čerpadla WILO RS 25/4

otáčky	otáčky	příkon	max. průtok	geom. objem	max. průtok
$\left[\min^{-1} ight]$	$\left[rad \cdot s^{-1}\right]$	[W]	$\left[l\cdot s^{-1} ight]$	$\left[m^{3}\cdot rad^{-1} ight]$	$\left[m^3 \cdot s^{-1}\right]$
1200	125,66	30	0,48	0,000150796	0,00048
1650	172,79	44	0,68	0,000155366	0,00068
2000	209,44	62	0,88	0,000165876	0,00088

Tab. 6.3 – Parametry čerpadla WILO RS 25/4

Zadávání čerpadla pomocí 2D charakteristiky.

Čerpadlo (Centrifugagal Pump)

(Simulink / Simscape / SimHydraulics / Pumps and Motors)

Tab. 6.4 – Zadávání čerpadla pomocí 2D charakteristik
---

by two 2D characteristics P-Q-W and N-Q-W			
1000	$\left[kg\cdot m^{-3}\right]$		
[ 0.0000 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 ]	$\left[m^3 \cdot s^{-1}\right]$		
[ 125.66 136.14 172.79 209.44 ]	$\left[rad \cdot s^{-1}\right]$		
	[		
[ 21000 24646 35000 42000 ; 16000	[Pa]		
18778 29000 39000 ; 11000 12910			
24000 35000;7000 8215 18000 31000;			
3000 3521 13000 28000 ]			
[ 0.0000 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 ]	$m^3 \cdot s^{-1}$		
[ 26 33 40 50; 28 36 44 55; 29 37 48	[W]		
59;30 38 50 62;31 39 52 64]			
cubic			
from last 2 points			
	by two 2D characteristics P-Q-W and N-Q-W 1000 [ 0.0000 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 ] [ 125.66 136.14 172.79 209.44 ] [ 21000 24646 35000 42000 ; 16000 18778 29000 39000 ; 11000 12910 24000 35000 ; 7000 8215 18000 31000 ; 3000 3521 13000 28000 ] [ 0.0000 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 ] [ 26 33 40 50 ; 28 36 44 55 ; 29 37 48 59 ; 30 38 50 62 ; 31 39 52 64] cubic from last 2 points		

		průtok					
ota	áčky	0	0,1	0,2	0,3	0,4	$l \cdot s^{-1}$
$\left[\min^{-1}\right]$	$\left[rad \cdot s^{-1}\right]$	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	$\left[m^3 \cdot s^{-1}\right]$
1200	125,66	21000	16000	11000	7000	3000	[
1300	136,14	24646	18778	12910	8215	3521	[Pa
1650	172,79	35000	29000	24000	18000	13000	lak
2000	209,44	42000	39000	35000	31000	28000	ţ,

Tab. 6.5 – Zadávání čerpadla v Matlabu Simulinku pomocí 2D charakteristiky - tlak

přepočet z  $[\min^{-1}]$  na  $[rad \cdot s^{-1}]$  $n [rad \cdot s^{-1}] = n [ot \cdot \min^{-1}] \cdot \frac{1}{60} 2 \cdot \pi$ (6.3)

afinní vztah pro výpočet tlaků

$$p_1 = p_2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad \Rightarrow \qquad p_{1300} = p_{1200} \cdot \left(\frac{n_{1300}[rad/s]}{n_{1200}[rad/s]}\right)^2$$
(6.4)

Tab. 6.6 – Zadávání čerpadla v Matlabu Simulinku pomocí 2D charakteristiky - výkon

		průtok					
otáčky		0	0,1	0,2	0,3	0,4	$l \cdot s^{-1}$
$\left[\min^{-1}\right]$	$\left[rad \cdot s^{-1}\right]$	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	$\left[m^3 \cdot s^{-1}\right]$
1200	125,66	26	28	29	30	31	۲J -
1300	136,14	33	36	37	38	39	
1650	172,79	40	44	48	50	52	lkoı
2000	209,44	50	55	59	62	64	pří

afinní vztah pro výpočet příkonů

$$P_{1} = P_{2} \cdot \left(\frac{n_{1}}{n_{2}}\right)^{3} \qquad \Rightarrow \qquad P_{1300} = P_{1200} \cdot \left(\frac{n_{1300}[rad / s]}{n_{1200}[rad / s]}\right)^{3}$$
(6.5)



Obrázek 6.9 – Charakteristika čerpadla WILO RS 25/4 s dopočítanými křivkami pomocí afinních vztahů

Do programu Matlab Simulink se zadává výkon čerpadla, jelikož ale výrobce udává příkon, bude charakteristika zadána v závislosti na příkonu, tzn., bude uvažována celková účinnost  $\eta = 1$ .

Při simulování obvodu s čerpadlem je zapotřebí vložit do obvodu další prvky.



#### **Ideal Angular Velocity Source**

(Simulink / Simscape / Foudation library / Mechanical / Mechanical sensore and Sources / Ideal Angular Velocity Source)



#### **Mechanical Rotational Reference**

(Simulink / Simscape / Foudation library / Mechanical / Rotational Elements / Mechanical Rotational Reference)



Obrázek 6.10 – Simulovaný obvod



Obrázek 6.11 – Tlak před ventilem pro různé otáčky čerpadla

Při měření bylo čerpadlo zapnuto na maximální otáčky tj.  $2000 \text{ min}^{-1} = 209,44 \text{ rad.s}^{-1}$ , co je také patrné viz Obrázek 6.11. Na tomto obrázku jsou vykresleny tlaky před ventilem v závislosti na čase pro všechny otáčky čerpadla. Z grafu je také patrné, že se snižujícími se otáčkami se snižuje tlak a také účinek hydraulického rázu.



Obrázek 6.12 – Tlak před ventilem pro různý počet segmentů potrubí

Závislost počtu segmentů potrubí není tak výrazná, jestliže jako zdroj je použito čerpadlo, viz Obrázek 6.12. Je však patrné, že zcela nevhodné je použít 1 segment, jelikož se průběh tlaků neshoduje v periodě a ani v amplitudě. S narůstajícím počtem segmentů je simulace přesnější avšak náročnější na dobu výpočtu.

### Shrnutí pojmů 6.1.

Software Matlab Simulink, zadávání jednotlivých prvků v tomto programu, zadávání čerpadla, vliv počtu segmentů a vlastnosti kapaliny při simulaci dynamického děje – hydraulického rázu.

# Otázky 6.1.

16. Jaký vliv má počet segmentů potrubí na tlak před ventilem?

- 17. Jaký je rozdíl při simulování obvodu se zdrojem konstantního tlaku a s čerpadlem?
- 18. Jaké změny by bylo možné ještě udělat v simulovaném obvodu?

### 7 VYHODNOCENÍ

Na obrázku 7.1 jsou vykresleny všechny varianty řešení popsané v tomto tutoriálu. Z grafu je patrné, že nevhodné je řešení s konstantním zdrojem tlaku s řídícím signálem na vstupu (modrá čára). Naopak velmi dobré je řešení obvodu s čerpadlem (zelená čára). Modelované charakteristiky se shodují v periodě, avšak k velkým neshodám dochází při porovnání amplitud tlaků před ventilem. Tento nedostatek by se dal řešit přesnějším modelováním potrubí, jelikož v měřícím zařízení je potrubí složeno ze dvou hadic stejného průměru, které jsou spojeny ocelovou trubkou se snímačem tlaku, to je při modelování zanedbáváno. Přesnější by bylo modelování s pružnou stěnou potrubí, jelikož pružnost hadic není zanedbatelná. Také jsou při modelování zanedbávány některé místní ztráty např. clona.



Obrázek 7.1 – Srovnání tlaku před ventilem

#### Další zdroje

- 1. JANALÍK, J.; ŠŤÁVA, P. *Mechanika tekutin*. VŠB-TUO, Ostrava, 2002, 125s. ISBN 80-248-0038-1.
- Firma JSP, s.r.o. Měření a regulace. Katalogový list Třícestná a pěticestná ventilová souprava. ND00217-2008/3. Březen 2008. Dostupné z: <URL: http://www.jsp.cz>.
- 3. Firma *ZPA Nová Paka a.s.* Katalogový list Snímač tlakové diference. tp. 274494/j. 14str., Prosinec 2007. Dostupné z: <URL:http://www.zpanp.cz >.
- 4. *Měření hydraulického rázu návod*. [Online]. Dostupné z: <URL:http://www.338.vsb.cz/studium9a.htm>.
- 5. Software *Matlab Simulink*, *SimHydraulic* uživatelský manuál. Dostupný v nápovědě programu.