

SIMULACE ŘÍZENÍ HYDRAULICKÉHO POHONU KOMBINACÍ VENTILŮ HYDRAULICKÝCH PŮLMŮSTKŮ

Ing. Koňářík Petr

VŠB-Technická univerzita Ostrava
fakulta strojní
Katedra automatizační techniky a řízení

Abstrakt

This paper deal with detail modeling and simulation of electro-hydraulic system parts. Concrete parts of connection of four way servo-valve to hydromotor was separated to independent realizations of combinations of hydraulic half-bridges. In principle could be obtained two three state, three way servo-valves, which could realize same functions like original valve. The idea of that is to create mathematical and dynamic simulation model of half-bridges combinations behaviour for the following synthesis of control algorithms.

By suitable combination of connection of half-bridges and theirs control is possible to achieve classical required behavior of variable displacement hydromotor. Created model could also work like suitable tool, how to easy synchronize sliding and lowering velocity of piston and also make simple crossing between control algorithms to realize position, velocity, acceleration and force control of hydromotor.

Acquired model of universal servo-valve from combinations of half-bridges and their functionality and connection with hydromotor was created, verified and tested in simulation environment of Matlab-Simulink. New model in Simulink present an efficient tool for tracing and data analysis and further processing.

Použité značení

B	Průtokové zesílení	P_A	Normovaný tlak v komoře A, $<0;1>$
d	Průměr činného válce šoupátka	Q	Průtok, normovaný průtok
F	Zátěžná síla na pístnici hydromotoru	Q_A	Průtok do komory A
F_B	Budící elektromagnetická síla na šoupátku	Q_B	Průtok do komory B
k_p	Tuhost	Q_S	systémový průtok z hydrogenerátoru
K_Q	Průtokové zesílení	u_{sv*}	Řídicí napětí na servoventilu, $* = 1,2$
K_v	Rychlostní zesílení	v^*	Rychlost, $* = A, B$
K_P	Tlakové zesílení	X	Normovaná poloha šoupátka servoventilu
K_F	Silové zesílení	x_{sv*}	Poloha šoupátka servoventilu, $* = 1,2$
K_{QP}	Poddajnost	x_{sv*0}	Krytí šoupátka servoventilu, $* = 1,2$
K_{vF}	Poddajnost	\dot{x}_{hm}	Rychlost šoupátka servoventilu
l_s	Geometrický rozměr šoupátka	R	Hydraulický odpor
S_A	Činná plocha pístnice	Re	Reynoldsovo číslo
p_A	Tlak v komoře A	ρ	Hustota média
p_B	Tlak v komoře B	ε	Průtokový součinitel $f(Re)$
p_S	Systémový tlak		
p_T	Tlak v odpadu (atmosferický tlak)		

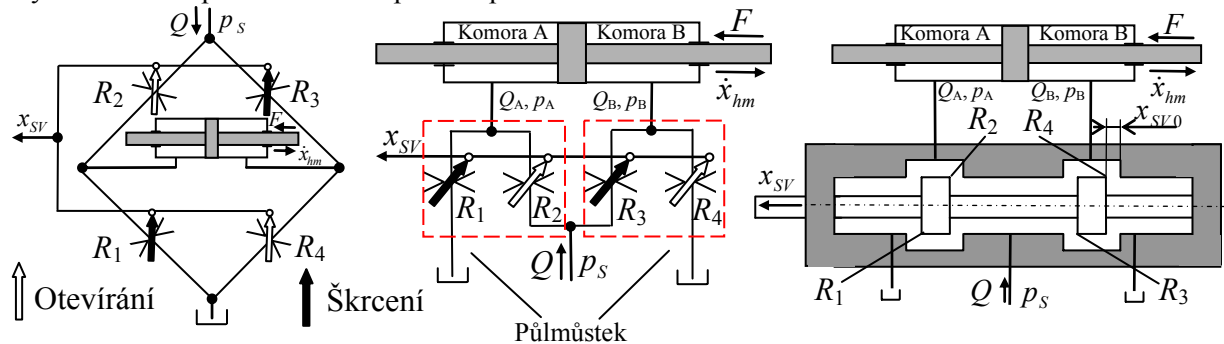
Indexy:

PA, AT, PB, BT – škrťací hrany šoupátka

1 Úvod

Řízení hydraulických pohonů a zejména pak návrh řídicích ventilů představuje rozsáhlou oblast, zahrnující řadu teoretických poznatků, studií, analýz, zkušeností, konstrukčních návrhů a těžko dostupných firemních knowhow, jak tuto problematiku vhodně řešit a jak dosáhnout tížených požadovaných vlastností hydraulického pohonu. Při pohledu na hydraulický pohon a jeho řídicí ventil se jedná o systém odporů R , nejčastěji zakreslovaných v některých z následujících analogických uspořádáních na Obr.1. Zleva elektrická analogie - *Wheatstonův můstek*, uprostřed princip řízení

vstupních a výstupních odporů do pŕlmŕstvkŕ - *pŕlmŕstvkovŕ zapojenŕ*, vpravo *technickŕ realizace* čtyřhrannŕ odporovŕho řizenŕ pomocí posouvače.



Obr.1 Nejčastější uspořádní a zakreslení odporovŕho řizenŕ hydraulickŕho pohonu

2 Charakteristiky pŕlmŕstvkŕ

Vlastnosti pŕlmŕstvkŕ je možné charakterizovat stacionárními charakteristickými parametry:

- Objemovŕm *prŕtokovŕm* nebo tŕž *rychlostnŕm* zesilenŕm K_Q resp. K_v

$$K_{QA} = \left. \frac{\partial Q_A}{\partial x_{SV}} \right|_{p_A=const, x_{SV}=0} \quad (1)$$

$$K_{vA} = \left. \frac{\partial v_A}{\partial x_{SV}} \right|_{p_A=const, x_{SV}=0} = \frac{K_{QA}}{S_A} \quad \text{pozn.: Vztaženo ke komoře A hydromotoru}$$

- *Tlakovŕm* nebo tŕž *silovŕm* zesilenŕm K_P resp. K_F

$$K_{PA} = \left. \frac{\partial p_A}{\partial x_{SV}} \right|_{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} \quad (2)$$

$$K_{FA} = \left. \frac{\partial F_A}{\partial x_{SV}} \right|_{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = K_{PA} \cdot S_A \quad \text{pozn.: Vztaženo ke komoře A hydromotoru}$$

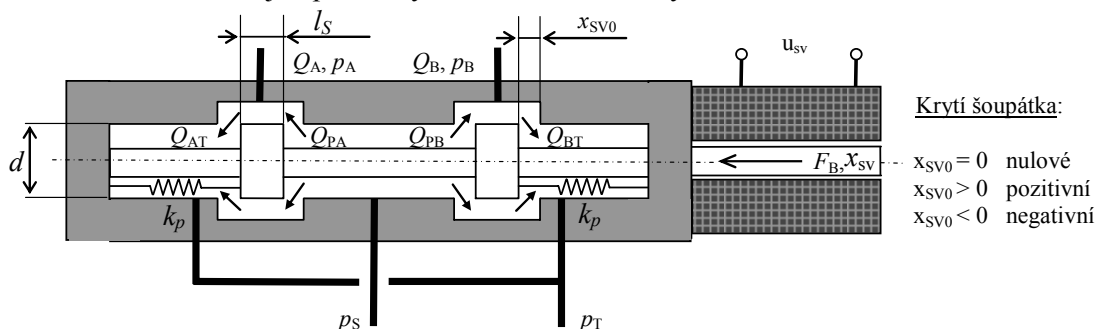
V literatuře je rovněž uváděna kombinací předchozích vzniklá charakteristická veličina

- *poddajnost* K_{QP} resp. K_{vF} definovaná jako

$$K_{QPA} = \left. \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} \right|_{x_{SV}=const.} = K_{vFA} = \left. \frac{\partial v_A}{\partial F_A} \right|_{x_{SV}=const.} \quad (3)$$

pozn.: Vztaženo ke komoře A hydromotoru

Odvozená zesilenŕ pŕlmŕstvkŕ jsou provedena bez uvařování prŕtokovŕch ztrŕt, třenŕ, a stlačitelnosti kapalin a za předpokladu negativního krytŕ. Odpory R_1 a R_2 dle Obr. 1 a uspořádnŕ servoventilu na Obr. 2 představují zmŕněnŕ odporovŕ dělič tlaku a podle nich je možné definovat prŕtokovou rovnici 4, definující prŕtok hydromotoru do komory A.



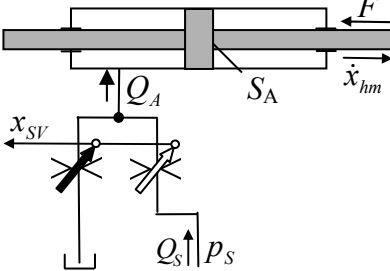
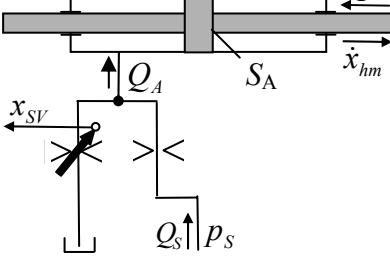
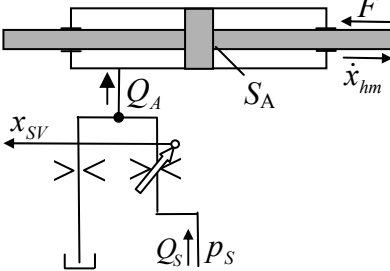
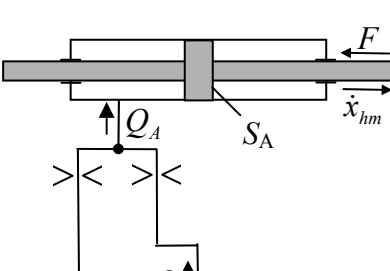
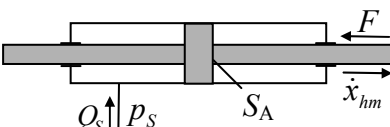
Obr. 2 Situační schéma uspořádnŕ servoventilu

$$Q_A = S_A \cdot v_A = Q_{PA} - Q_{AT} = B \cdot (x_{SV0} + x_{SV}) \cdot \sqrt{p_S - p_A} - B \cdot (x_{SV0} - x_{SV}) \cdot \sqrt{p_A} \quad (4)$$

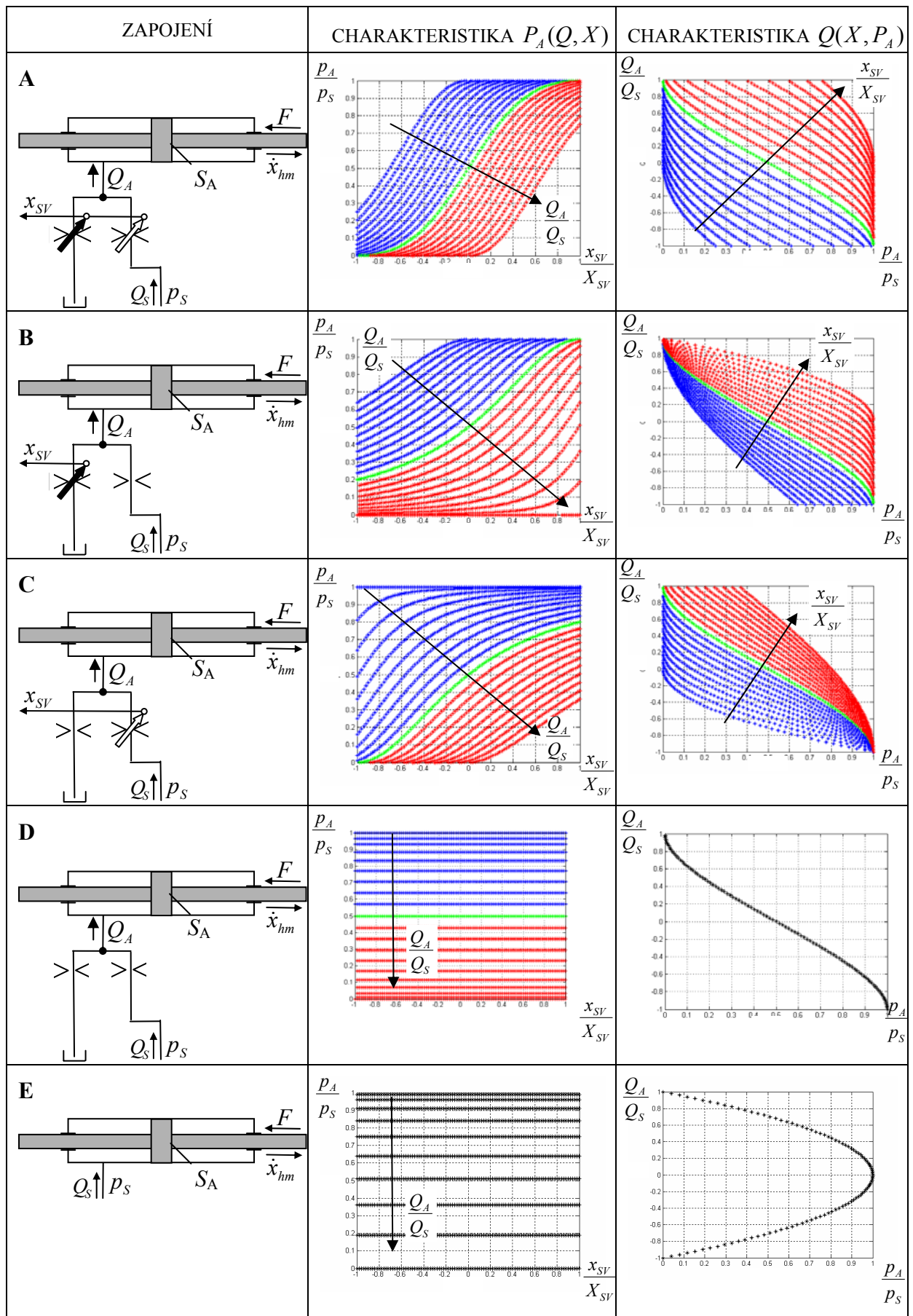
$$\text{kde } B = \varepsilon \cdot \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

ε - Průtokový součinitel, obecně $f(\text{Re})$

Půlmůstky mohou být dle Obr. 3 tvořeny v kombinacích A, B, C, D a E.

ZAPOJENÍ	CHARAKTERISTICKÁ VELIČINA
<p>A</p> 	$K_{Q_A} = \partial Q_A / \partial x_{SV} = B \left(\sqrt{p_S - p_A} + \sqrt{p_A} \right) \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = B \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{p_S}$ $K_{v_A} = \partial v_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \sqrt{2} \cdot \frac{B}{S_A} \cdot \sqrt{p_S}$ $K_{p_A} = \partial p_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = p_S / x_{SV0}$ $K_{F_A} = \partial F_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = \frac{p_S \cdot S_A}{x_{SV0}}$
<p>B</p> 	$K_{Q_A} = \partial Q_A / \partial x_{SV} = B \cdot \sqrt{p_A} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{p_S}$ $K_{v_A} = \partial v_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \frac{\sqrt{2} \cdot B \cdot \sqrt{p_S}}{2 \cdot S_A}$ $K_{p_A} = \partial p_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = p_S / 2 \cdot x_{SV0}$ $K_{F_A} = \partial F_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = \frac{p_S \cdot S_A}{2 \cdot x_{SV0}}$
<p>C</p> 	$K_{Q_A} = \partial Q_A / \partial x_{SV} = B \cdot \sqrt{p_S - p_A} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{p_S}$ $K_{v_A} = \partial v_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \frac{\sqrt{2} \cdot B \cdot \sqrt{p_S}}{2 \cdot S_A}$ $K_{p_A} = \partial p_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = p_S / 2 \cdot x_{SV0}$ $K_{F_A} = \partial F_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = \frac{p_S \cdot S_A}{2 \cdot x_{SV0}}$
<p>D</p> 	$K_{Q_A} = \partial Q_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = 0$ $K_{v_A} = \partial v_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = 0$ $K_{p_A} = \partial p_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = 0$ $K_{F_A} = \partial F_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = 0$
<p>E</p> 	$K_{Q_A} = K_{v_A} = \partial Q_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = \partial v_A / \partial x_{SV} \Big _{p_A=p_S/2, x_{SV}=0} = 0$ $K_{p_A} = K_{F_A} = \partial p_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = \partial F_A / \partial x_{SV} \Big _{Q_A=v_A=0, x_{SV}=0} = 0$

Obr. 3 Jednotlivá zesílení hydraulických půlmůsteků



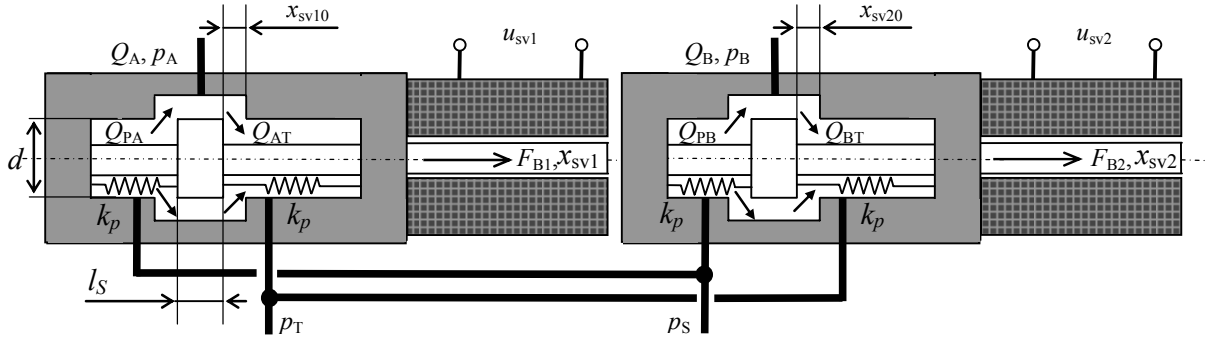
Legenda: — $x_{sv}, Q_A \in (-1; 0)$, — $x_{sv}, Q_A = 0$, — $x_{sv}, Q_A \in (0; 1)$

Obr. 4 Charakteristiky hydraulických pŮlmůstků

3 Dynamický model servoventilu

Při tvorbě matematického modelu servoventilu vyjdeme z původního uspořádání servoventilu (Obr. 2) a z odvozeného modelu v [Noskievič, 1999] s namodelovanou dynamikou elektrického přestavení šoupátka a z průtokových rovnic škrcení na jednotlivých hranách šoupátka.

Návrh sestavení plnohodnotného servoventilu (hydraulického můstku A - A) a jeho adekvátní náhrady pomocí hydraulických půlmůstek, provedeme v normovaném tvaru a podle (Obr.5), na kterém jsou zobrazeny realizace dvou hydraulických půlmůstek typu A se samostatným ovládním každého z nich.



Obr. 5 Realizace samostatných 3/3 servoventilů, resp. hydraulických půlmůstek typu A se samostatným elektrickým ovládním

Průtokové rovnice pro jednotlivé hrany šoupátka v upraveném tvaru je možné shrnout v tabulce 1. Tabulka 1 realizuje výpočet na jednotlivých hranách 3/3 ventilů 1 a 2 s předpokládáním malými negativními krytími a to v jejich plném pracovním rozsahu. Díky obecnému zápisu, lze pomocí těchto vztahů počítat průtokové charakteristiky všech typů půlmůstek.

Tab. 1

	3/3 VENTIL 1 (Hydraulický půlmůstek 1)		3/3 VENTIL 2 (Hydraulický půlmůstek 2)	
	Hrana PA	Hrana AT	Hrana PB	Hrana BT
Platnost	$\{x_{sv1} \geq 0 \wedge x_{sv1} < x_{sv10} \} \vee \{x_{sv1} < 0 \wedge x_{sv1} < x_{sv10} \}$		$\{x_{sv2} \geq 0 \wedge x_{sv2} < x_{sv20} \} \vee \{x_{sv2} < 0 \wedge x_{sv2} < x_{sv20} \}$	
$\frac{\dot{x}}{\dot{x}_{max}^*}$	$\frac{2 \cdot B_{SVP4} \cdot (x_{sv1} - x_{sv10})}{k_1 \cdot B_{SV1} \cdot 2 \cdot x_{sv10} } \cdot \sqrt{1 - \frac{p_A}{p_S}}$	$-\frac{2 \cdot B_{SVAT} \cdot (x_{sv10} + x_{sv1})}{k_1 \cdot B_{SV1} \cdot 2 \cdot x_{sv10} } \cdot \sqrt{\frac{p_A}{p_S}}$	$\frac{2 \cdot B_{SVPB} \cdot (x_{sv2} - x_{sv20})}{k_2 \cdot B_{SV2} \cdot 2 \cdot x_{sv20} } \cdot \sqrt{1 - \frac{p_B}{p_S}}$	$-\frac{2 \cdot B_{SVBT} \cdot (x_{sv20} + x_{sv2})}{k_2 \cdot B_{SV2} \cdot 2 \cdot x_{sv20} } \cdot \sqrt{\frac{p_B}{p_S}}$
Platnost	$x_{sv1} \geq 0 \wedge x_{sv1} \geq x_{sv10} $		$x_{sv2} \geq 0 \wedge x_{sv2} \geq x_{sv20} $	
$\frac{\dot{x}}{\dot{x}_{max}^*}$	$\frac{B_{SVP4} \cdot (x_{sv1} - x_{sv10})}{B_{SV1} \cdot x_{max1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_A}{p_S}}$	$\frac{G_{lsv1} \cdot p_A}{B_{SV1} \cdot x_{max1} \cdot \sqrt{p_S}}$	$\frac{B_{SVPB} \cdot (x_{sv2} - x_{sv20})}{B_{SV2} \cdot x_{max2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_B}{p_S}}$	$\frac{G_{lsv2} \cdot p_B}{B_{SV2} \cdot x_{max2} \cdot \sqrt{p_S}}$
Platnost	$x_{sv1} < 0 \wedge x_{sv1} \geq x_{sv10} $		$x_{sv2} < 0 \wedge x_{sv2} \geq x_{sv20} $	
$\frac{\dot{x}}{\dot{x}_{max}^*}$	$\frac{G_{lsv1} \cdot (p_S - p_A)}{B_{SV1} \cdot x_{max1} \cdot \sqrt{p_S}}$	$-\frac{B_{SVAT} \cdot (x_{sv10} + x_{sv1})}{B_{SV1} \cdot x_{max1}} \cdot \sqrt{\frac{p_A}{p_S}}$	$\frac{G_{lsv2} \cdot (p_S - p_B)}{B_{SV2} \cdot x_{max2} \cdot \sqrt{p_S}}$	$-\frac{B_{SVBT} \cdot (x_{sv20} + x_{sv2})}{B_{SV2} \cdot x_{max2}} \cdot \sqrt{\frac{p_B}{p_S}}$
$\frac{Q}{Q_{max}^*}$	$\frac{Q_{PA}}{Q_{max1}} = \frac{S_A \cdot \dot{x}_{PA}}{S_{maxAB} \cdot \dot{x}_{max1}}$	$\frac{Q_{AT}}{Q_{max1}} = \frac{S_A \cdot \dot{x}_{AT}}{S_{maxAB} \cdot \dot{x}_{max1}}$	$\frac{Q_{PB}}{Q_{max2}} = \frac{S_B \cdot \dot{x}_{PB}}{S_{maxAB} \cdot \dot{x}_{max2}}$	$\frac{Q_{BT}}{Q_{max2}} = \frac{S_B \cdot \dot{x}_{BT}}{S_{maxAB} \cdot \dot{x}_{max2}}$

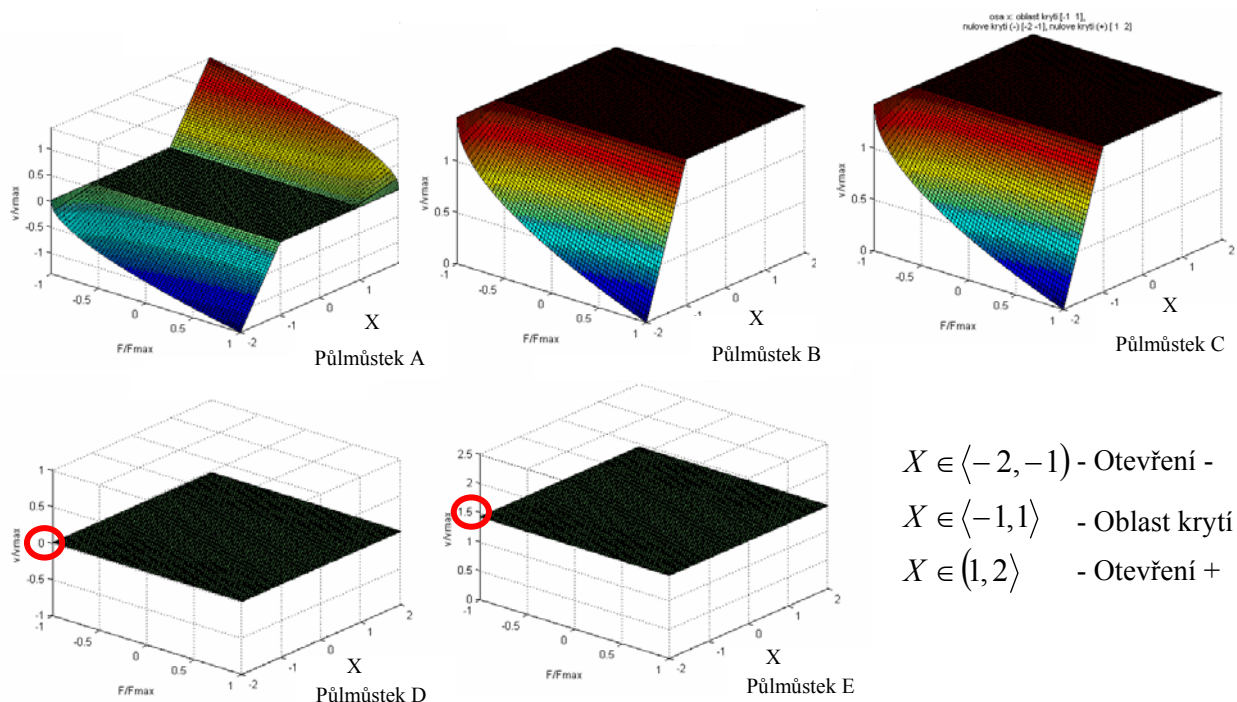
Maximální otevření: $x_{SV^*max} = l_{s^*} + 2 \cdot |x_{sv^*0}|$, Poměry otevření průmětu $k_* = \frac{x_{SV^*max}}{|x_{sv^*0}|}$, Negativní krytí: x_{sv^*0} , * = Ventil 1, 2.

Maximální rychlosti: $\dot{x}_{max}^* = \frac{B_{SV^*}}{S_*} \cdot x_{SV^*max} \cdot \sqrt{p_S}$, G_{lsv^*} = svodová propustnost, SV = servoventil, PA, AT, PB, BT – štkící hrany.

Vyobrazení průtokových (rychlostních) charakteristik v tabulce 1 je provedeno na Obr.6. Nahoře půlmůstek typu A (vlevo), půlmůstek typu B (uprostřed) a půlmůstek typu C (vpravo). Dole pak konstantní charakteristika půlmůsteků D (vlevo) a charakteristika půlmůsteků E (vpravo). Oblast záporného otevření x_{sv} šoupátka vytyčuje normovaná poloha šoupátka v oblasti $X = <-2;-1$), oblast

krytí $X = \langle -1; 1 \rangle$ a oblast kladného otevření šoupátka $X = (1; 2 \rangle$. Dále je patrné, že typ B a C má stejnou charakteristiku, protože oba realizují stejné funkční uspořádání, s tím rozdílem, že charakteristika B vzniká škrcením a charakteristika C otevřením šoupátka při působení shodného signálu, resp. polohy x_{SV} , resp. X .

Normované rychlostní (průtokové) charakteristiky



Obr. 6 $\sqrt{2}$ · Normované rychlostní (průtokové) charakteristiky pŕlmŕstku

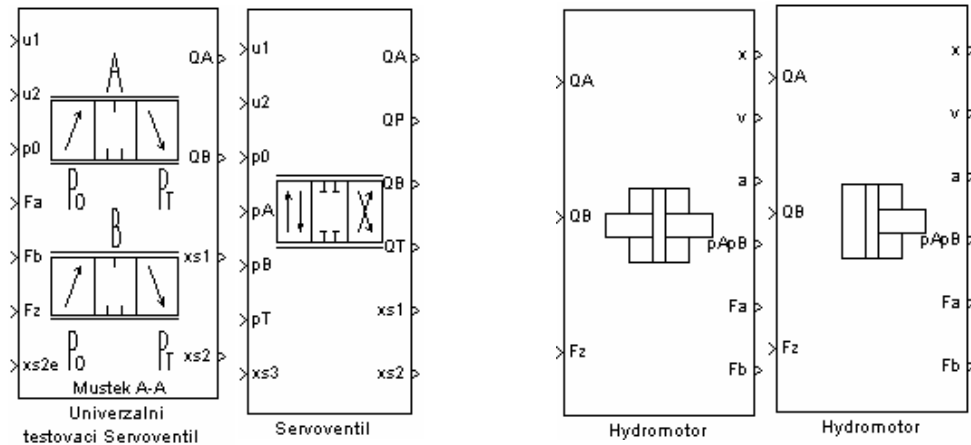
Prostřednictvím takto definovaných charakteristik je možné provádět snadné inverzní řešení problému, kdy na základě polohy šoupátka ventilu číslo 1 je možné získat například polohu šoupátka ventilu číslo 2 pro různé druhy zatížení pístnice hydromotoru (ventil 1 - Tlak, ventil 2 - Tah) nebo (ventil 1 - Tah, ventil 2 - Tlak).

4 Simulační model

Simulační model v Simulink představuje model servoventilu, tvořený kombinací zapojení hydraulických pŕlmŕstku. Model provádí interpolaci průtoků z předem vypočtených průtokových charakteristik hydraulických pŕlmŕstku dle dynamicky, časově proměnných poloh šoupátek s uvažováním negativních krytí a průtokových netěsností. Za účelem interpolace byla vytvořena výpočetní funkce v podobě M-file s názvem Mustek.m, realizující výpočet rychlostních (průtokových) charakteristik, jejímiž stavitelnými parametry jsou kombinace zapojení pŕlmŕstku (viz obrázek 8), velikosti negativních krytí x_{SV10} a x_{SV20} , maximální možné otevření ventilů, svodové propustnosti a průtoková zesílení na jednotlivých ventilech či dílčích hranách.

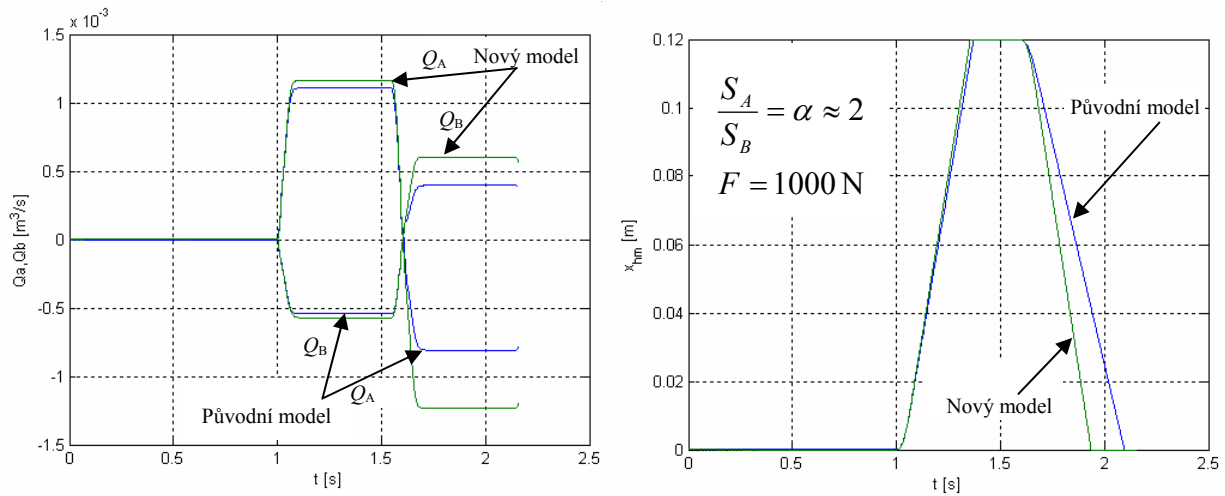
Kombinace zapojení pŕlmŕstku A-A tvoří plnohodnotný čtyřcestný servoventil s možností řízení průtoků do jednotlivých komor hydromotoru zvlášť.

Simulační porovnání bylo prováděno mezi původním matematickým a simulačním modelem čtyřcestného servoventilu [Noskievič, P., 1999] a novým simulačním modelem pro případ sestavení pŕlmŕstku A – A, které dohromady tvoří původní čtyřcestný servoventil. Pro porovnání obou jsou jednotlivé pŕlmŕstky řízeny společnou akční veličinou a jejich simulace je prováděna pro nesymetrickou, jednostrannou pístnici a zatížení pístnice $F = 1000$ N. V případě symetrických pístnic vycházejí jednotlivé grafy naprosto shodné a nejsou zde prezentovány.

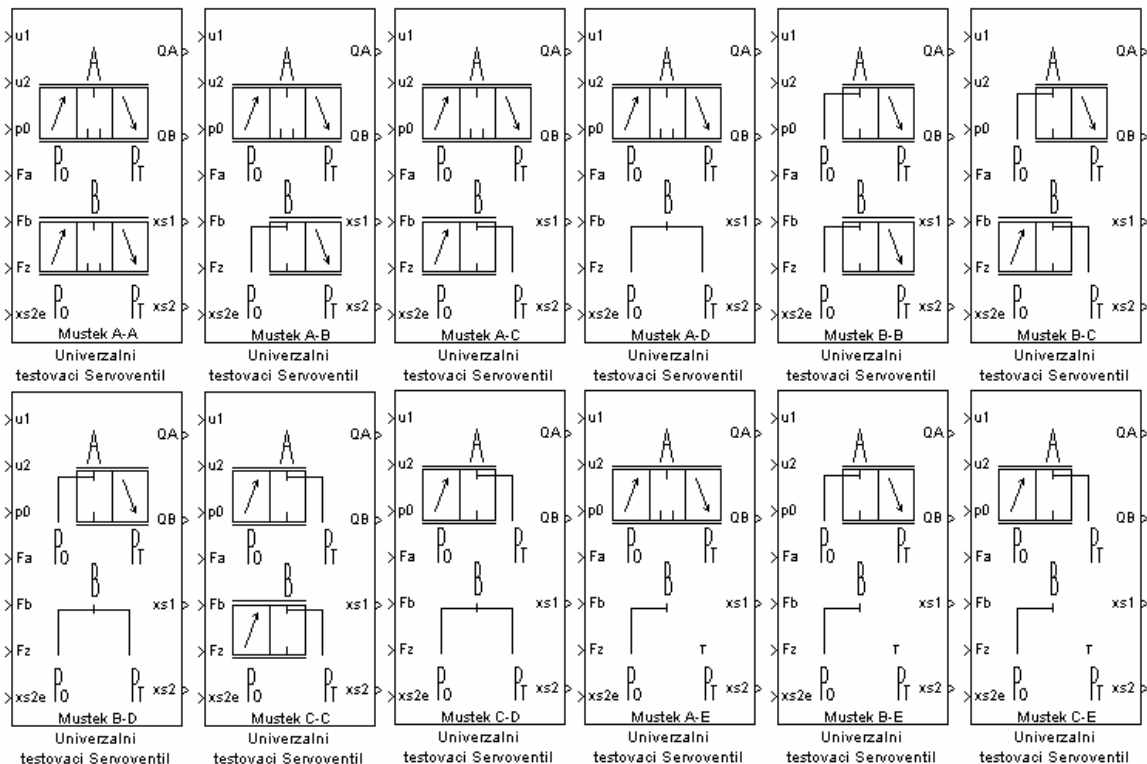


Obr.7 Simulační blok nového a původního servoventilu a blok s výběrem hydromotorů

Výsledky a porovnání simulace: Můstek A – A



Obr. 8. Porovnání průtoků Q_A a Q_B a poloh x_{hm} původního a nového modelu servoventilu



Obr. 9. Možná zapojení půlmůsteků realizované jedním univerzálním stavitelným simulačním blokem

5 Závěr

V příspěvku je představen sestavený univerzální, pomocí maskových příkazů parametricky stavitelný, simulační model testovacího servoventilu, který je tvořen libovolnou kombinací sestavení hydraulických pŕlmŕstvkŕ. Charakteristiky jednotlivých pŕlmŕstvkŕ jsou vyobrazeny na Obr. 4.

Nový model byl simulačně propojen se stávajícím modelem hydromotoru do jednoho simulačního celku hydraulického pohonu a tento model byl ověřen a simulačně porovnáván s modelem původním v prostředí Matlab/Simulink. Ze simulací jednoznačně vyplývá shoda původního a nového modelu pro případ symetrické pístnice a jejich shodného poměru ploch.

Z grafŕ na Obr. 8 je pak patrné, že v případě nesymetrické pístnice je generován jak průtok, tak poloha pístnice v mnohem symetričtější podobě než původní model díky lepšímu popisu oblasti krytí a díky silovým zpětným vazbám s informací o zatížení jednotlivých komor hydromotoru. K synchronizaci rychlostí zasouvání a vysouvání by pak mělo v budoucnu přispět vhodné řízení každého hydraulického pŕlmŕstvku zvlášť. Z tlakových průběhŕ v komorách hydromotoru při užití klasického čtyřcestného servoventilu nebo dvou třícestných servoventilŕ se rovněž jeví možnost jisté energetické úspory, což bude dalším předmětem výzkumu.

Literatura

- Backé, W. 1992. *Umdruck zur Vorlesung Servohydraulik*. 6. Auflage, Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1992, 356 s.
- Blackburn, J.F., Reethof, G., Shearer, J.L. 1962. *Fluid Power Control, Regelung durch Strömungsenergie*, 2. Band: *Regel – und Steuerelemente*, Krausskopf-Verlag Wiesbaden, 1962, 328s.
- Bruno, S. 2004. *Theoretical and experimental analysis of a 2-way flowcontrol valve dynamic behaviour*, Proceedings of 3rd International PhD Symposium on Fluid Power, Technical University of Catalonia, Barcelona-Terrassa, 2004, ISBN 84-609-1354-6
- Noskievič, P. 1999. *Modelování a identifikace systémŕ*. I. vyd.: Montanex a.s. Ostrava, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- Paciga, A., Ivantyšin, J. 1985. *Tekutinové mechanismy*. 1. vydání, SNTL, 1985, 286 s.

Kontakt

Ing. Petr Koňářík
Katedra automatizační techniky a řízení,
Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava
17.listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba
E-mail: konarik.petr@post.cz