

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Dynamika hydraulického systému s proporcionálním
rozváděčem

Dynamics of Hydraulic System with Proportional Valve

Student:

Bc. Marian Ledvoň

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Adam Bureček, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marian Ledvoň**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika
Téma: **Dynamika hydraulického systému s proporcionálním rozváděčem**
Dynamics of Hydraulic System with Proportional Valve
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k problematice statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče.
2. Návrh a realizace hydraulického obvodu pro měření statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče.
3. Sestavení matematického modelu proporcionálního rozváděče a hydraulického obvodu v prostředí Matlab SimHydraulics.
4. Modelování dynamického chování hydraulického systému s proporcionálním rozváděčem.
5. Porovnání výsledků matematického modelu s experimentálním měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

DÖRR, H., EWALD, R., et al. *Der Hydraulik Trainer Band 2, Proportional - und Servoventil - Technik*. Lohr am Main: Mannesmann Rexroth GmbH, 1986. ISBN 3-8023-0898-0.

PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, díl 2. Řídící prvky hydrostatických systémů. Příslušenství hydraulických obvodů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 2. vyd., 140 s. ISBN 978-80-248-1827-6.

PIVOŇKA, J. a kol. *Tekutínové mechanismy*. Praha: SNTL Praha, 1987, 04-255-87, 623 s.

BAROŠKA, J. *Hydrostatické mechanismy*. Žilina: Hydropneutech s.r.o., 2012, 388 s., ISBN 978-80-970 897-2-6.

THE MATHWORKS: *Matlab Simulink User's Guide, SimHydraulics User's Guide* (USA, 2007).

BEATER, P. *Entwurf hydraulischer Maschinen: Modellbildung, Stabilitätsanalyse und Simulation hydrostatischer Antriebe und Steuerungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. 259 s. ISBN 3-540-65444-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Adam Bureček, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2018

..... Marian Lešován

Podpis studenta

Prohlašuji že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jenom „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2018

Marian Ledvoň

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marian Ledvoň

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bezručova 1080,

Frýdlant nad Ostravicí, 739 11

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LEDVOŇ, M. *Dynamika hydraulického systému s proporcionálním rozváděčem: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2018, 62 s. Vedoucí práce: Bureček, Adam.

Diplomová práce se zabývá dynamikou hydraulického systému s proporcionálním rozváděčem. V teoretické části práce jsou popsány statické a dynamické charakteristiky, proporcionální technika a pohybová rovnice šoupátka proporcionálního rozváděče. V praktické části je navržený a sestavený hydraulický obvod pro měření statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče. Hydraulický obvod je navržen včetně všech snímačů. Sestavení matematického modelu proporcionálního rozváděče a následná simulace byla provedena v programu Matlab Simulink. V závěrečné části je porovnána simulace matematického modelu s měřením na experimentálním obvodu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Proporcionální rozváděč, statická charakteristika, dynamická charakteristika, frekvenční charakteristika, matematický model, simulace

ANNOTATION OF MASTER THESIS

LEDVOŇ, M. *Dynamics of Hydraulic System of Proportional Valve: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2018, 62 p., Thesis head: Bureček, Adam.

Master thesis deals with dynamic of hydraulic system with proportional valve. In theoretical part are described static characteristics and dynamic characteristics, proportional technique and motion equation of proportional valve. In practical part is designed and assembled a hydraulic system for measurements of static and dynamic characteristics of proportional valve. Hydraulic system is designed including all sensors. Build a mathematical model of proportional valve and simulation as performed in program Matlab Simulink. In the last part is compared the simulation of the mathematical model with the measurement on the experimental system.

KEYWORDS:

Proportional valve, static characteristics, dynamic characteristics, frequency characteristics, mathematical model, simulation

Obsah

Seznam použitých značek a veličin.....	10
Úvod.....	11
1 Proporcionální technika	12
1.1 Proporcionální rozváděče	12
1.2 Elektromechanické převodníky	13
1.3 Proporcionální rozváděč s lineárním motorem PRL2.....	14
2 Statické charakteristiky	15
2.1 Statická charakteristika průtoková.....	15
2.2 Statická I-Q charakteristika	16
2.3 Statická Δp -Q charakteristika	17
3 Dynamické charakteristiky.....	18
3.1 Přejímová charakteristika	18
3.2 Frekvenční charakteristika.....	19
4 Pohybová rovnice.....	20
4.1 Síla pružiny	21
4.2 Třecí síla	22
4.3 Setrvačná síla šoupátka	23
5 Návrh a realizace hydraulického obvodu.....	24
5.1 Popis hydraulického obvodu.....	24
5.2 Specifikace prvků hydraulického obvodu.....	26
5.3 Specifikace snímačů a přístrojů pro měření v obvodu.....	30
6 Popis a vyhodnocení měření	32
6.1 Statické charakteristiky.....	32
6.2 Dynamické charakteristiky	36
7 Simulace.....	44
7.1 Matematický model	44
7.2 Popis a nastavení vybraných bloků.....	47

7.3	Vyhodnocení simulace statických Δp -Q charakteristik	49
7.4	Porovnání simulace a měření statických Δp -Q charakteristik	50
7.5	Vyhodnocení simulace frekvenčních charakteristik	51
7.6	Porovnání simulace a měření frekvenčních charakteristik	52
7.7	Vyhodnocení simulace nestacionárního proudění	54
7.8	Porovnání simulace a měření nestacionárního proudění	56
8	Závěr	57
9	Seznam použité literatury	60
	Přílohy	63

Seznam použitých značek a veličin

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	Amplituda	[mm]
c	Koeficient tlumení	[N·m ⁻¹ ·s]
f	Frekvence	[Hz]
F	Síla elektromagnetu	[N]
F_{hv}	Síla od proudění kapaliny	[N]
F_m	Setrvačná síla šoupátka	[N]
F_p	Síla pružiny	[N]
F_t	Třecí síla	[N]
I	Elektrický proud	[A]
k	Tuhost pružiny	[N·m ⁻¹]
L	Poměr amplitud	[dB]
m	Hmotnost šoupátka	[kg]
p	Tlak	[Pa]
Δp	Tlakový spád	[Pa]
Q	Průtok	[dm ³ ·min ⁻¹]
t	Čas	[s]
T	Teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
x	Posunutí šoupátka	[m]
x_0	Počáteční stlačení pružiny	[m]
φ	Fáze	[°]

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá měřením a matematickými simulacemi pro stanovení statických a dynamických vlastností proporcionálního rozváděče s lineárním motorem.

V úvodní části diplomové práce je zpracována literární rešerše. Rešerše se nejprve zabývá proporcionální technikou a proporcionálními rozváděči. Dále jsou zde zpracovány statické a dynamické charakteristiky proporcionálních rozváděčů. Také je zde uveden popis konstrukce a funkce proporcionálního rozváděče s lineárním motorem PRL2, na kterém byla provedena měření. Poslední část literární rešerše je věnována problematice pohybové rovnice šoupátkového proporcionálního rozváděče, kde jsou jednotlivě popsány všechny síly působící na šoupátko rozváděče.

V praktické části je nejprve navržen a následně v laboratoři sestaven experimentální hydraulický obvod. Hydraulický obvod je navržen včetně všech snímačů potřebných pro měření jednotlivých charakteristik proporcionálního rozváděče. Na experimentálním hydraulickém obvodu jsou provedena nejprve měření pro stanovení statických $\Delta p-Q$ charakteristik proporcionálního rozváděče, dále jsou provedena měření pro stanovení frekvenčních charakteristik proporcionálního rozváděče, a nakonec je provedeno měření pulzujícího proudění vyvolaného proporcionálním rozváděčem. V další části diplomové práce je vytvořen matematický model proporcionálního rozváděče a experimentálního hydraulického obvodu. Tento matematický model je sestaven v počítačovém softwaru Matlab – Simulink. Matematický model obsahuje bloky z knihovny Simscape Fluids. Matematický model a jednotlivé bloky jsou popsány, včetně jejich nastavení. Nastavení jednotlivých bloků odpovídá parametrům reálného experimentálního obvodu. Na matematickém modelu jsou provedeny simulace pro jednotlivá experimentální měření. Experimentální měření i simulace jsou vyhodnoceny a následně porovnány.

Cílem diplomové práce je stanovení a vyhodnocení statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče v hydraulickém systému, návržení a nastavení jeho matematického modelu, tak, aby co nejlépe odpovídal reálnému proporcionálním rozváděči.

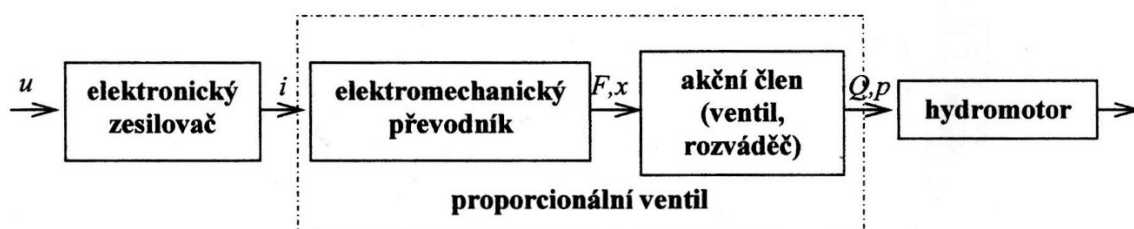
1 Proporcionální technika

V proporcionální řídicí technice se pracuje s prvky jako jsou např. proporcionální rozváděče, proporcionální škrtecí ventily, proporcionální tlakové ventily atd. Proporcionální technika má široké využití u aplikací v průmyslu, kde klasická technika již nestačí. Spojením moderní hydrauliky a výhod moderní elektroniky se stává proporcionální technika kompromisem mezi kvalitou řízení a cenou [1, 4].

1.1 Proporcionální rozváděče

Proporcionální rozváděče se vyznačují hlavně možností jejich spojitým řízením směru a velikosti průtoku. K řízení se využívá řídicí elektrický signál malého výkonu. Tvar a velikost řídicího signálu lze snadno naprogramovat externě z počítače nebo pomocí připojené elektronické řídicí karty. Hlavní předností proporcionálních rozváděčů je především možnost řízení rozběhu a brždění hydromotorů s výraznou setrvačnou hmotnou zátěží. Využívají se také např. k řízení oscilace pohybů suportů obráběcích strojů nebo k synchronizaci rychlosti hydraulických motorů v paralelním zapojení [1].

Na obr. 1.1 je pomocí blokového schématu znázorněna struktura řízení s proporcionálním rozváděčem.



Obr. 1.1 Struktura řízení s proporcionálním rozváděčem [1]

Vstupní elektrický napěťový signál je přiveden na elektronický zesilovač. Zesilovač převede napěťový signál na proudový, který je přiveden na elektromechanický převodník. Elektronický zesilovač může být součástí elektromechanického převodníku nebo je proveden jako samostatný díl jako elektronická řídicí karta. Elektromechanický převodník spojuje řídicí elektroniku s mechanikou rozváděče. Proporcionální rozváděče používají různé typy elektromechanických převodníků [1].

1.2 Elektromechanické převodníky

Elektromechanický převodník spojuje řídicí elektroniku s mechanikou rozváděče. Proporcionální rozváděče používají různé typy elektromechanických převodníků.

➤ Proporcionální elektromagnety

Jedním z nejpoužívanějších elektromechanických převodníků jsou proporcionální elektromagnety. Jsou napájené stejnosměrným proudem a podle konstrukce mohou být buď silové, nebo zdvihové elektromagnety. Elektromagnety se k minimalizaci třecích odporů provádějí také v tzv. „mokrém provedení“, kdy vnitřní prostor elektromagnetu a snímače polohy není utěsněn proti vniknutí pracovní kapaliny [1].

Zdvihový elektromagnet vyvíjí zdvih kotvy, který bývá cca 3÷5 mm, přímo úměrný elektrickému proudu. Přesnost dosažené polohy ovlivňuje proti působící síla. Použitím polohové zpětné vazby lze dosáhnout zpřesnění [1, 5].

Silový elektromagnet vyvíjí sílu úměrnou elektrickému proudu jen v určitém rozsahu zdvihu. Tento zdvih bývá cca 1,5 mm. Kotva při vysouvání ze základní polohy současně působí na mechanickou součást tlakem, proto se také označuje tento elektromagnet jako tlačný [1, 5].

➤ Lineární motor

Lineární motor je tvořen permanentními magnety. Tyto magnety jsou uspořádány tak, že v základní poloze je kotva uprostřed zdvihu. Kotva se vychyluje v jednom nebo druhém směru, podle polaritě přivedeného elektrického proudu na cívku. Zdvih kotvy u lineárního motoru dosahuje od 0,7 do 2 mm a maximální síla ± 300 N [1].

➤ Elektrodynamický převodník

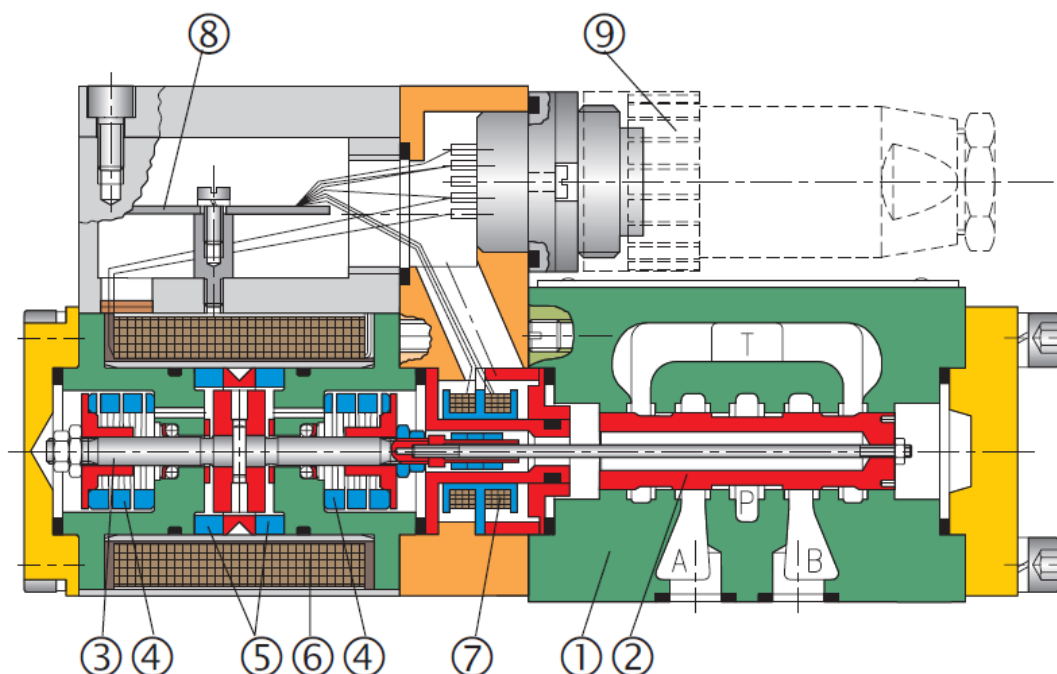
Elektrodynamický převodník funguje na principu pohybující se cívky reproduktoru v magnetickém poli, které je tvořeno permanentní magnety. V základní poloze drží cívku pružina. Velikost a směr proudu protékající cívku poté určuje její výchylku. Zdvih kotvy bývá cca 2,4 mm. Rychlost přestavení kotvy odpovídá hodnotám typickým pro servoventily [1].

1.3 Proporcionální rozváděč s lineárním motorem PRL2

Proporcionální rozváděč PRL2 se používá ke spojitému dálkovému řízení hydromotorů. Jednostupňové provedení a vnitřní elektrická zpětná vazba zajišťuje spolehlivou funkci, snižují nároky na čistotu oleje a dávají ventilu velmi dobré statické i dynamické vlastnosti.

➤ Popis konstrukce a funkce

Proporcionální rozváděč PRL 2, viz obr. 1.2, se skládá ze tří hlavních částí. Litinové tělo (1) s vloženým šoupátkem (2) tvoří hydraulickou část. Funkční hrany šoupátka jsou dokončeny podle požadované funkce. Lineární motor tvoří ovládací část. Kotva (3) lineárního motoru je do základní polohy středěná pružinami (4) a pracovní mezery jsou protisměrně přemagnetizovány trvalými magnety (5) se vzácných zemin. Po přivedení elektrického proudu na cívku (6) se posouvá kotva společně se šoupátkem, které je s kotvou pevně spojeno. Výchylka kotvy je přímo úměrná řídicímu proudu a její smysl závisí na směru průtoku proudu. Při výpadku proudu je kotva se šoupátkem vrácena pomocí pružin do střední polohy. Třetí hlavní část rozváděče tvoří indukční snímač polohy (7). Poloha šoupátka je zpracována pomocí integrované elektroniky (8) s možností nastavení nuly a zesílení a předána do regulátoru v elektronice EL2. Rozváděč je připojen konektorem AMPHENOL s krytím IP 65 (9) [9].



Obr. 1.2 Proporcionální rozváděč PRL2 [9]

Tab. 1.1 Technické parametry proporcionálního rozváděče PRL2 [9]

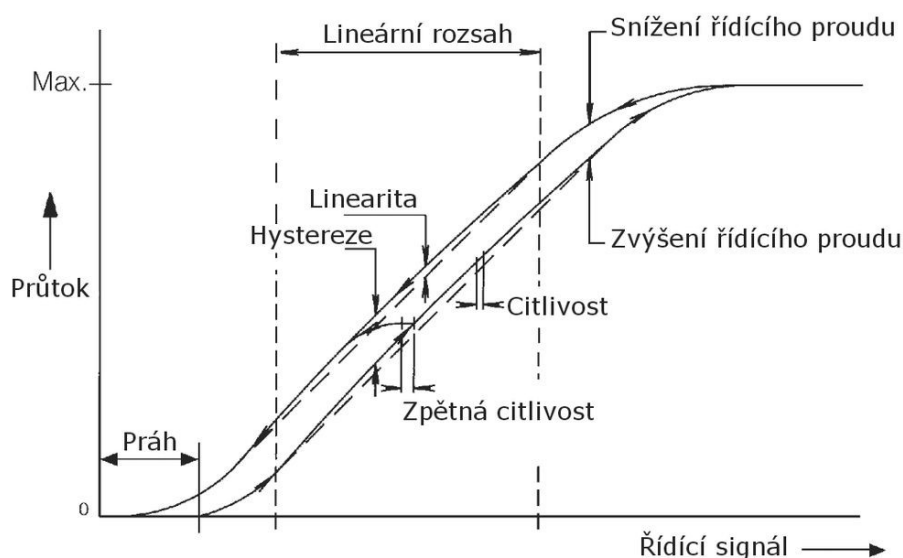
Jmenovitá světlost	mm	06
Provozní tlak	MPa	25
Jmenovitý průtok při $\Delta p = 7$ MPa	$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	32
Jmenovitý průtok při $\Delta p = 1$ MPa	$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	12,5
Hystereze	%	<1
Citlivost	%	<0,5
Průtokové ztráty	$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	<1,5
Rozsah provozní viskozity	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	20÷400
Provozní teplota kapalina	°C	-30÷80

2 Statické charakteristiky

2.1 Statická charakteristika průtoková

Statická charakteristika proporcionálních rozváděčů popisuje závislost mezi vstupním řídicím signálem a hydraulickým výstupním signálem, kterým je průtok Q , v jejich ustálených stavech. Charakteristiku v ideálním případě tvoří přímka, to znamená, že závislost je lineární. Skutečné charakteristiky jsou většinou mírně zakřivené a k dosažení lepších výsledků závislostí se využívá jen menší rozsah signálu. Vlastnosti proporcionálních rozváděčů jsou popsány několika parametry [3].

Na obr. 2.1 jsou v grafu průtoku v závislosti na řídicím signálu znázorněny jednotlivé průtokové charakteristiky, které jsou popsány dále v textu.



Obr. 2.1 Průtokové charakteristiky [10]

➤ **Opakovatelnost**

Opakovatelnost vyjadřuje menší odchylku mezi jednotlivými měřeními na rozváděči i přesto, že byla měření provedena při stejných pracovních podmínkách, jako jsou vstupní řídicí signál, pracovní kapalina, teplota atd.

➤ **Hystereze**

Pomocí hystereze se popisuje největší rozdíl výstupního signálu při stejném vstupním řídicím signálu v závislosti na tom, zda se vstupní signál zvyšuje či snižuje. Hystereze je založena na maximálním průtoku a je vyjádřena v procentech.

➤ **Citlivost**

Citlivost je potřebná změna vstupního řídicího signálu, aby byla zaznamenána změna výstupního signálu na rozváděči ve stejném směru jako v předchozím pohybu. Citlivost závisí na maximální hodnotě vstupního řídicího signálu a vyjadřuje se v procentech.

➤ **Reverzní citlivost**

Reverzní citlivost je potřebná změna vstupního řídicího signálu, aby byla zaznamenána změna výstupního signálu na rozváděči v opačném směru, než byl předchozí pohyb.

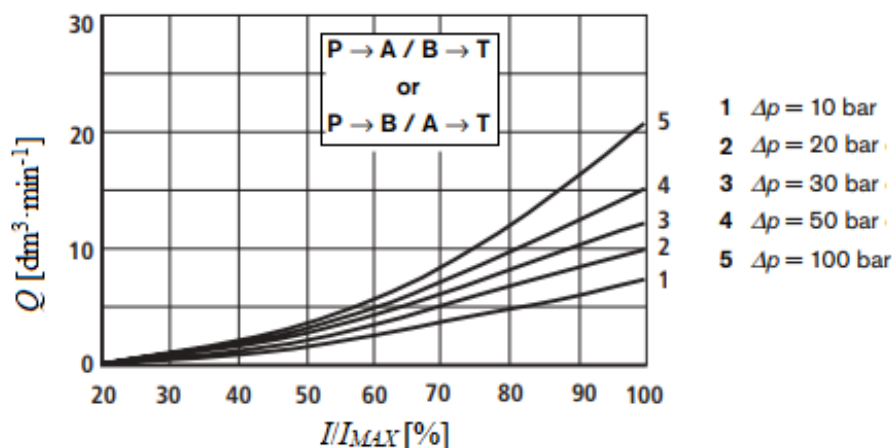
➤ **Linearita**

Linearita vyjadřuje, jak se naměřená charakteristika odchyluje od lineární závislosti, kde proporcionální rozváděč pracuje optimálně. Proto je důležité pečlivě vybrat rozváděč tak, aby pracoval v té oblasti regulovaného rozsahu, kde bude dosaženo největší přesnosti [3, 5].

2.2 Statická I - Q charakteristika

U proporcionálních rozváděčů se měří statická I - Q charakteristika. Pomocí této charakteristiky se zjišťuje závislost průtoku rozváděčem Q na řídicím elektrickém proudu I . Řídicí elektrický proud se u této charakteristiky udává v procentech a je dán poměrem řídicího elektrického proudu ku maximálnímu řídicímu elektrickému proudu. Provádí se to z důvodu toho, aby bylo možno porovnat charakteristiky rozváděčů s různými rozsahy řídicích elektrických proudů. Tato charakteristika se měří pro různé tlakové spády Δp , viz obr. 2.2. Tlakový spád Δp je zde určen součtem jednotlivých tlakových spádů při průtoku kapaliny proporcionálním rozváděčem v obou směrech tzn. na dvou škrticích drážkách. U I - Q charakteristik vzniká hystereze, která může dosahovat 5...6 % zdvihu

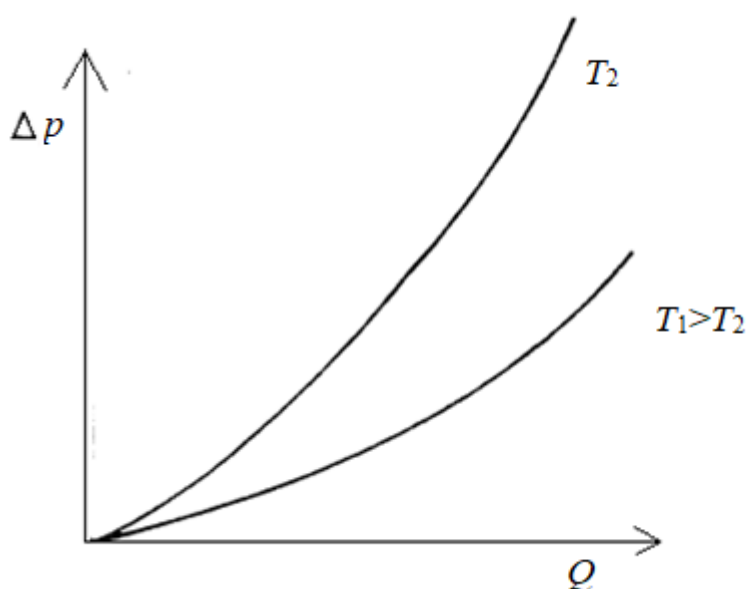
u proporčních rozváděčů bez zpětné vazby. Vzniká zde také chyba opakovatelnosti, kterou ovlivňují proměnné pasivní odpory, hydrodynamické síly a nečistoty. Tato chyba dosahuje 2÷3 % zdvihu. Použitím zpětné vazby u proporčních rozváděčů lze dosáhnout hystereze a chyby opakovatelnosti menší než 1 % [1, 3].



Obr. 2.2 Statická I - Q charakteristika pro různé tlakové spády Δp [14]

2.3 Statická Δp - Q charakteristika

Dále se u rozváděčů měří statická Δp - Q charakteristika. Tato charakteristika vyjadřuje závislost tlakového spádu na rozváděči Δp na průtoku rozváděčem Q pro jednotlivé směry průtoku kapaliny. Jelikož charakteristika může být ovlivněna viskozitou kapaliny, provádí se měření této charakteristiky pro různé teploty pracovní kapaliny, viz obr. 2.3, a to nejčastěji v rozsahu teplot od 20 do 60 °C. Statická Δp - Q charakteristika se také zjišťuje např. u jednosměrných ventilů, hydraulických zámků, potrubí apod. [2].

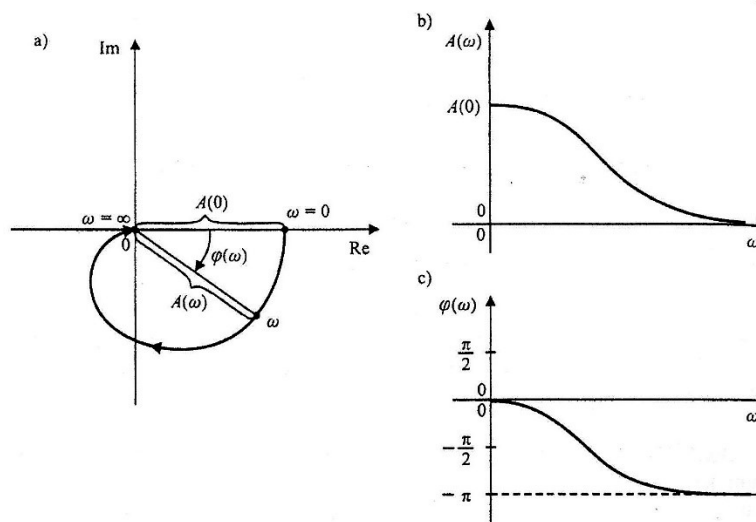


Obr. 2.3 Statická charakteristika Δp - Q pro rozdílné teploty pracovní kapaliny [2]

3.2 Frekvenční charakteristika

Pokud je na vstup přiveden periodický řídicí signál, tak na výstupu bude také periodický signál se stejnou frekvencí, ale může se lišit velikost amplitudy a také může být fázově posunutý. Změna amplitudy a fázového posunutí je většinou závislá na frekvenci řídicího signálu. Frekvenční charakteristika tedy znázorňuje závislost změny amplitudy a fázového posunutí na frekvenci vstupního řídicího signálu. Pro nízké frekvence vstupního periodického signálu budou amplitudy přibližně podobné, ale při zvětšující se frekvenci se začnou amplitudy lišit. Frekvenční charakteristika systému je grafickým znázorněním frekvenčního přenosu.

Grafickým znázorněním frekvenčního přenosu v komplexní rovině je amplitudofázová charakteristika, viz obr. 3.2a. Pro získání amplitudové frekvenční charakteristiky, viz obr. 3.2b, a fázové frekvenční charakteristiky, viz obr. 3.2c, se amplituda $A(\omega)$ a fáze $\varphi(\omega)$ zobrazují zvlášť [1, 3].



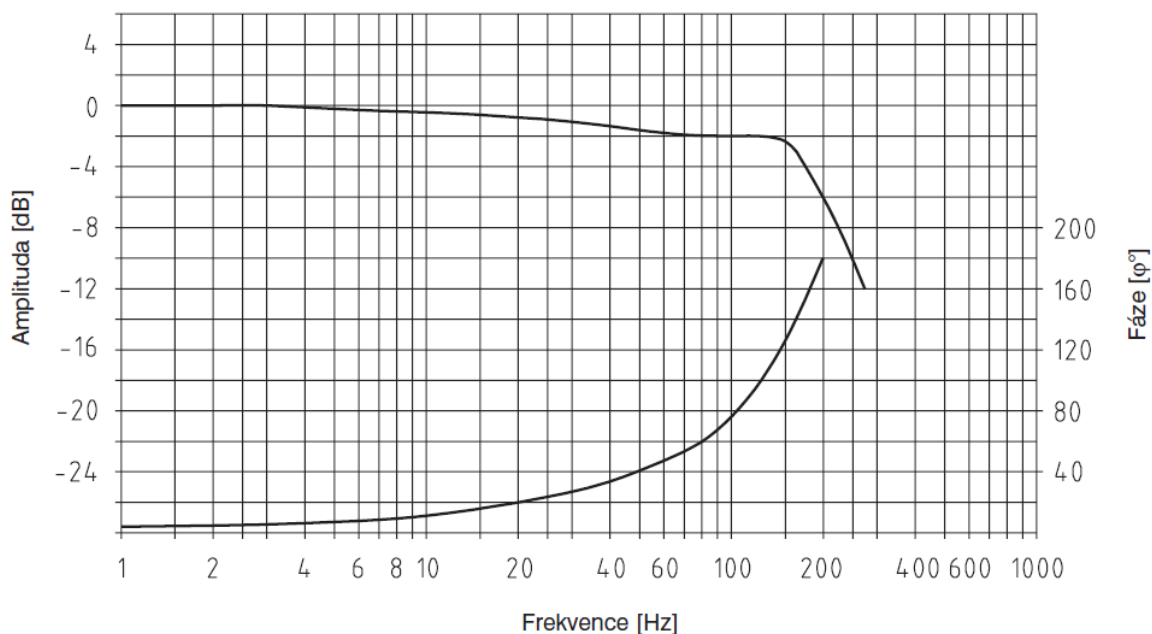
Obr. 3.2 Frekvenční charakteristiky [1]

a – amplitudofázová, b – amplitudová, c – fázová

Logaritmováním frekvenčního přenosu lze získat logaritmickou frekvenční charakteristiku. Dynamické vlastnosti proporcionálních rozváděčů se popisují frekvenčními charakteristikami, zejména amplitudovou frekvenční logaritmickou charakteristikou a fázovou frekvenční logaritmickou charakteristikou. Na svislou osu se vynáší amplituda v decibelech. Decibely jsou logaritmická jednotka, která se používá pro popis rozsáhlého frekvenčního pásma. Tyto jednotky jsou definované jako

$$L(\omega) = 20 \cdot \log \frac{A}{A_0}(\omega) \quad [\text{dB}] \quad (3.1)$$

Logaritmická frekvenční charakteristika pro přímo řízený proporcionalní rozváděč PRL2 je uvedena na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Logaritmická frekvenční charakteristika proporcionalního rozváděče PRL2 [9]

Hlavní význam frekvenčních charakteristik je získání informací o dynamice proporcionalního rozváděče. Při měření frekvenčních charakteristik se nejprve přivede vstupní řídicí harmonický signál nejčastěji sinusový se zvolenou amplitudou a frekvencí. Na výstupu vznikne opět sinusový signál o stejné frekvenci ovšem s rozdílnou amplitudou a fázově posunutý oproti vstupnímu signálu. Průběh výstupního signálu se po odeznění přechodového jevu zapisuje. Z porovnání vstupního a výstupního signálu se stanoví poměr amplitud a fázový posun, čímž se tak získá jeden bod frekvenční charakteristiky. Pro získání dalších bodů charakteristiky se měření opakuje pro jiné frekvence vstupního řídicího signálu. Frekvenční rozsah, ve kterém lze provést měření, je dán fyzikální realizovatelností [1, 3].

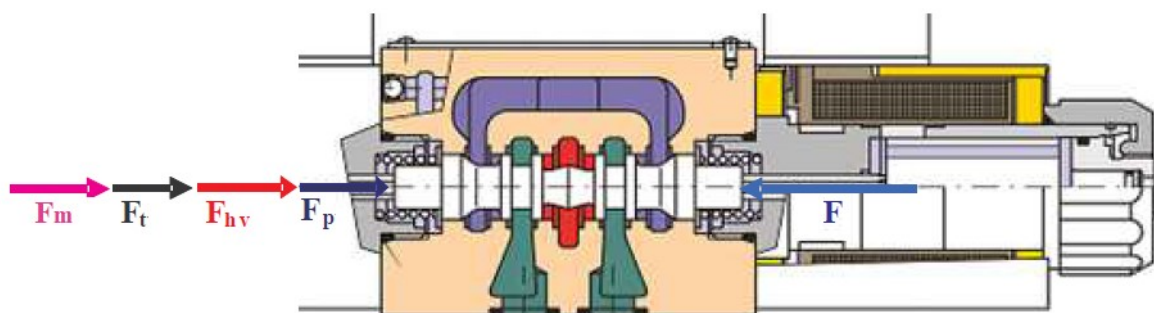
4 Pohybová rovnice

S využitím výpočetní techniky, která se stále rozvíjí, lze dynamické chování hydraulického systému nasimulovat pomocí nejrůznějších matematických modelů. Hlavní výhoda simulace hydraulického systému je ta, že můžeme pomocí výpočetního modelu nasimulovat různé počáteční podmínky a provozní stavy hydraulického systému a zjistit tak případné chyby či nedostatky. Modelování hydraulických systémů lze provádět v programech jako jsou např.: Matlab, Flowmaster, Mathcad.

U proporcionálního rozváděče působí na šoupátko axiální síly, které jsou znázorněny na obr. 4.1. Matematický model proporcionálního rozváděče lze popsat pohybovou rovnicí ve tvaru:

$$F_{hv} + F_m + F_t + F_p = F, \quad (4.1)$$

kde F_{hv} je síla od proudění kapaliny ventilem, F_m je setrvačná síla šoupátka, F_t je třecí síla, F_p je síla pružiny, F je síla elektromagnetu potřebná pro přestavení šoupátka rozváděče [6, 7].



Obr. 4.1 Síly působící na proporcionální rozváděč [7]

Zatížení lze rozdělit buď jako zatížení typu *ukládání energie* nebo jako *disipativní* typ zatížení. Zatížení hmotností šoupátka a pružinou jsou typu ukládání energie a zatížení viskózním třením je naopak disipativního typu [11].

4.1 Síla pružiny

Síla od pružiny stejně jako magnetická síla není konstantní. Síla se mění v závislosti na stlačení pružiny, tudíž je úměrná posunutí šoupátka rozváděče a je dána vztahem:

$$F_p = k \cdot x, \quad (4.2)$$

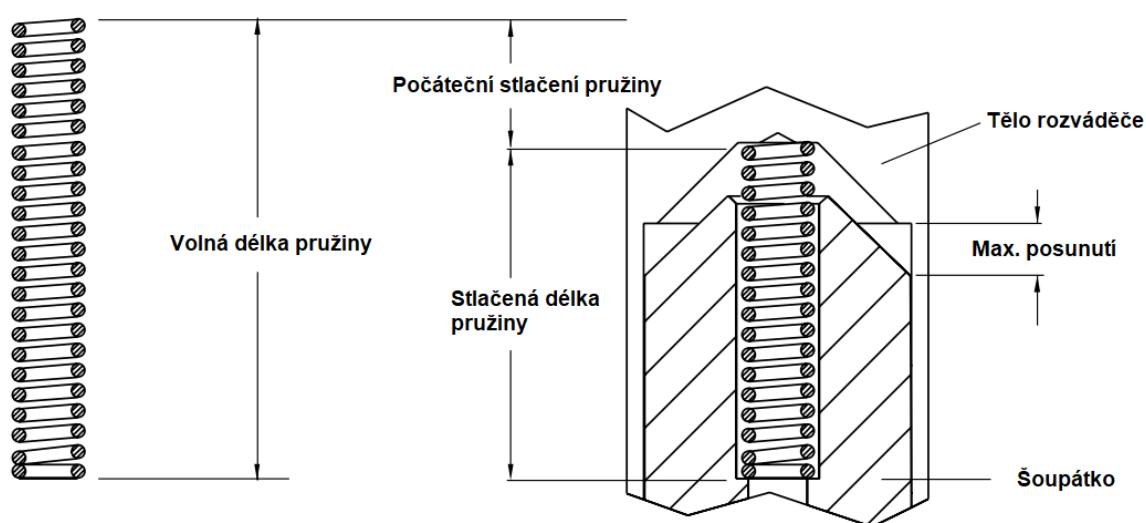
kde k je tuhost pružiny a x je posunutí šoupátka rozváděče [12].

Tuhost pružiny je zde konstanta, která popisuje, jak se bude měnit síla pružiny s měnícím se posunutím šoupátka rozváděče. Tuto rovnici lze ještě dále rozšířit, jelikož pružina může být do rozváděče zabudována s určitým počátečním stlačením při nulovém posunutí šoupátka. Tohle se používá z důvodů vyrovnání síly od proudění a také proto, že je nepraktické mít pružinu, která začíná na nulovém stlačení. Rovnici lze tedy upravit ve tvaru:

$$F_p = k \cdot (x_0 + x), \quad (4.3)$$

kde x_0 je počáteční stlačení pružiny při nulovém posunutí šoupátka [12].

Na obr. 4.2 je znázorněna pružina při své volné délce a pružina zabudována v rozváděči.



Obr. 4.2 Parametry pružiny rozváděče [12]

4.2 Třecí síla

Třecí síly ovlivňují dynamickou a ustálenou odezvu systému. Síla potřebná k překonání tření je vyjádřena jako funkce rychlosti a je dána vztahem:

$$F_t = c \cdot \dot{x}, \quad (4.4)$$

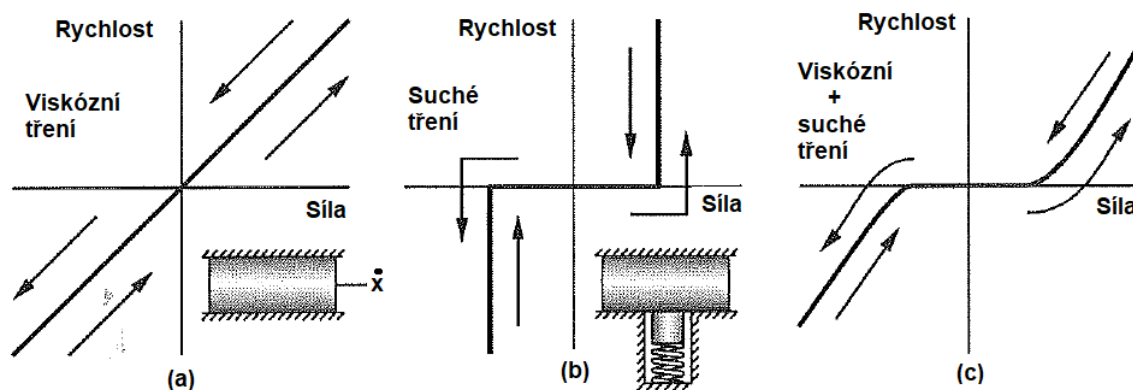
kde c je koeficient tlumení (viskózního tření), \dot{x} je první derivace posunutí šoupátka (rychlost).

Třecí zatížení zahrnuje statické tření, viskózní tření a suché tření. V mnoha aplikacích převládá viskózní a Coulombovo tření.

Coulombovo tření nebo jinak také kinetické tření vzniká mezi suchými povrchy. Tento typ tření je úměrný zatížení, ale je nezávislý na velikosti rychlosti.

Viskózní tření je úměrné rychlosti mezi dvěma plochami, které jsou oddělené viskózním filmem, ale je nezávislé na zatížení [11, 12].

Na obr. 4.3 je znázorněná závislost rychlosti a zatížení pro jednotlivé druhy tření a jejich kombinaci.



Obr. 4.3 Závislost rychlosti a zatížení [11]

a – viskózní tření, b – suché tření, c – kombinace viskózního a suchého tření

4.3 Setrvačná síla šoupátka

Hmotnostní zatížení odpovídá hmotnosti šoupátka a mění svou hodnotu úměrně s hodnotou zrychlení podle vztahu:

$$F_m = m \cdot \ddot{x}, \quad (4.5)$$

kde m je hmotnost šoupátka, \ddot{x} je druhá derivace posunutí šoupátka (zrychlení).

Při každé změně polohy šoupátka dochází ke zrychlení hmotnosti šoupátka se všemi částmi k němu připevněnými a také jedné třetiny hmotnosti všech pružin spojeny se šoupátkem [11].

5 Návrh a realizace hydraulického obvodu

Pro měření statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče byl navržen hydraulický obvod, který byl podle schématu sestaven v laboratoři N108 a následně byl odzkoušen. Hydraulický obvod byl navržen včetně tlakových snímačů, průtokoměru, teploměru, přístrojů pro zaznamenávání měření a elektroniky pro řízení proporcionálního rozváděče. Hydraulický obvod byl navržen tak, aby bylo možné ho využít pro více experimentů a měření např. vyhodnocování hydraulického rázu v dlouhém potrubí.

Parametry použitých jednotlivých hydraulických prvků a snímačů jsou popsány v následujících kapitolách 5.2 a 5.3.

5.1 Popis hydraulického obvodu

Hydraulický obvod, jenž může být využíván pro více experimentů, byl sestaven podle schématu, viz obr. 5.1. Základní části obvodu je hydraulický agregát HA, který se skládá z neregulačního hydrogenerátoru HG, elektromotoru EM, přepouštěcího PPV a pojistného ventilu PV, jednosměrného ventilu JV a odpadního filtru OF. Součástí hydraulického agregátu je také manometr a teploměr. Po spuštění hydraulického agregátu začne neregulační hydrogenerátor, který je poháněn elektromotorem, dodávat pracovní kapalinu z nádrže N do obvodu. Na přepouštěcím ventilu se nastaví požadovaný tlak v obvodu. Pomocí pojistného ventilu, na kterém je nastaven maximální přípustný tlak v obvodu, je zajištěna ochrana hydraulického obvodu. Za hydrogenerátorem následuje jednosměrný ventil, který chrání hydrogenerátor proti zpětným rázům. Pracovní kapalina dodávána hydraulickým agregátem je filtrována přes tlakový filtr s obtokem TF. Tento filtr je umístěn před proporcionálním rozváděčem PRL2, jelikož je potřeba dodržovat požadovanou čistotu kapaliny, aby se zabránilo poškození proporcionálního rozváděče. Před i za proporcionálním rozváděčem jsou zapojené třicestné kulové ventily TKV₁ a TKV₂. Tyto kulové ventily umožňují připojit paralelní větev do obvodu tak, aby neproudila pracovní kapalina přes rozváděč v obou směrech proudění. Za rozváděčem následuje dlouhé potrubí DP, které je připojeno pomocí hydraulických hadic H₁ a H₂. Za dlouhým potrubím lze pomocí kulových ventilů KV₃, KV₄ a TKV₃ připojit do obvodu podle potřeby buď škrtkové ventily, nebo elektromagneticky ovládaný sedlový ventil. Pomocí rychlospojek RS je možné do obvodu vhodně připojit průtokoměr. V hydraulickém obvodu jsou také umístěny minimess přípojky M pro připojení tlakových snímačů, tak aby bylo možné měřit tlak v důležitých místech obvodu každého experimentu, pro které byl tento obvod navržen.

Popisky použitých prvků ve schématu

V tab. 5.1 jsou uvedeny popisky jednotlivých prvků použitých v hydraulickém obvodu.

Tab. 5.1 Seznam popisků použitých prvků ve schématu

EM	Elektromotor	KV₁	Dvoucestné kulové ventily
HG	Hydrogenerátor	KV₂	
PPV	Přepouštěcí ventil	KV₃	
PV	Pojistný ventil	KV₄	
OF	Odpadní filtr	M₁	MINIMESS přípojky
TF	Tlakový filtr	M₂	
PRL2	Proporcionální rozváděč	M₃	
SV	Sedlový ventil	M₄	
DP	Dlouhé potrubí	M₅	
HA	Hydraulický agregát	M₆	
N	Nádrž	M₇	
H₁	Hadice	M₈	
H₂		TKV₁	Třícestné kulové ventily
H₃		TKV₂	
RS₁	Rychlospojky	TKV₃	
RS₂		ŠV₁	Škrticí ventily
RS₃		ŠV₂	
RS₄			

5.2 Specifikace prvků hydraulického obvodu

Hydraulický agregát HA (TOS Rakovník)

Označení: SA 3-250 001.0-221

Maximální průtok: $64 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Tlakový filtr TF (MP Filtri S.p.A)

Označení: FHP1352BAG2

Maximální průtok: $105 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Filtrační vložka: $6 \mu\text{m}$

Dvoucestný kulový ventil KV₁, KV₂, KV₃, KV₄

Označení: BKH 16S 1113 PNS 00

Třícestný kulový ventil TKV₁, TKV₂

Označení: BK3 2123 PN350

Třícestný kulový ventil TKV₃

Označení: BK3 1123 PN350

Škrticí ventil ŠV₂

Označení: STB1200

Sedlový ventil SV (Argo Hytos)

Označení: SD1E-A2/H2S5

Maximální průtok: 30 dm³·min⁻¹

Maximální tlak: 35 MPa

Proporcionální rozváděč PRL2 (Argo Hytos)

Označení: PRL2-06-32-0-24

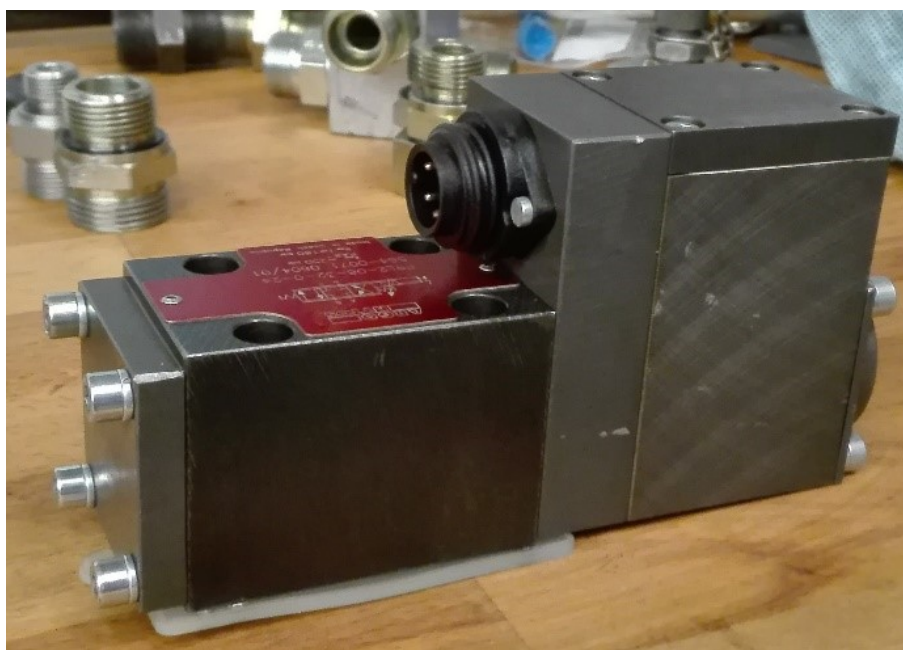
Jmenovitá světlost: 6 mm

Jmenovitý průtok: 32 dm³·min⁻¹

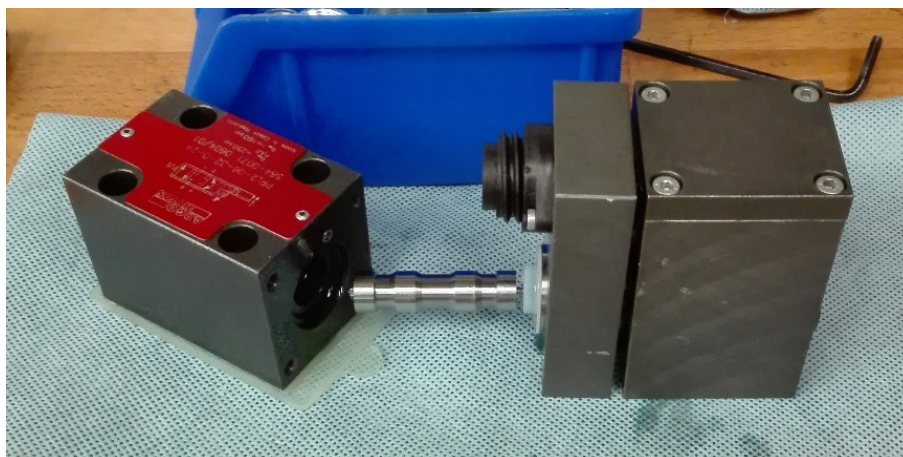
Jmenovitý tlak: 25 MPa

Krytí šoupátka: „Z“ nulové

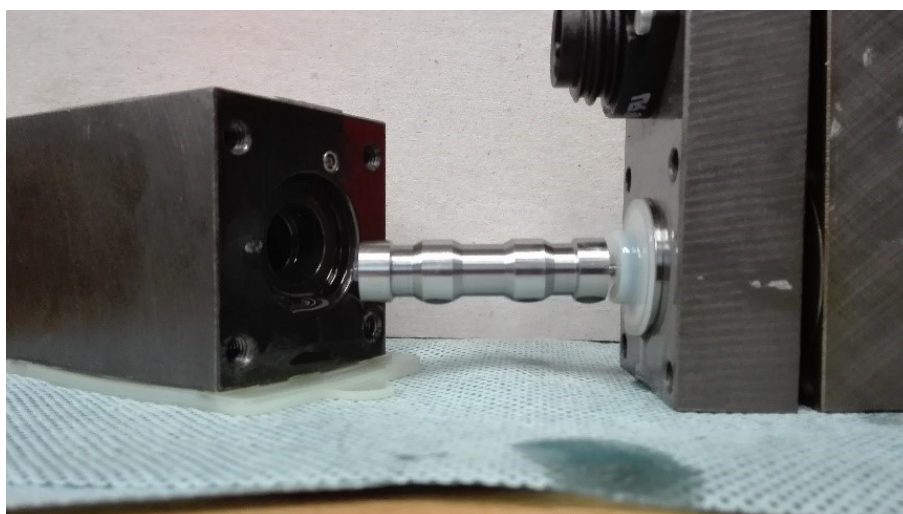
Podrobný popis konstrukce a funkce proporcionálního rozváděče, včetně technických parametrů, je uveden v kapitole 1.3. Na obr. 5.2 je fotografie uvedeného proporcionálního rozváděče. Na obr. 5.3 je vidět rozváděč v rozmontovaném stavu z důvodu měření zdvihu šoupátka a na obr 5.4 je detailní pohled na šoupátko rozváděče.



Obr. 5.2 Proporcionální rozváděč PRL2-06-32-0-24



Obr. 5.3 Rozváděč při rozmontování



Obr. 5.4 Detail šoupátka rozváděče

➤ Měření zdvihu šoupátka

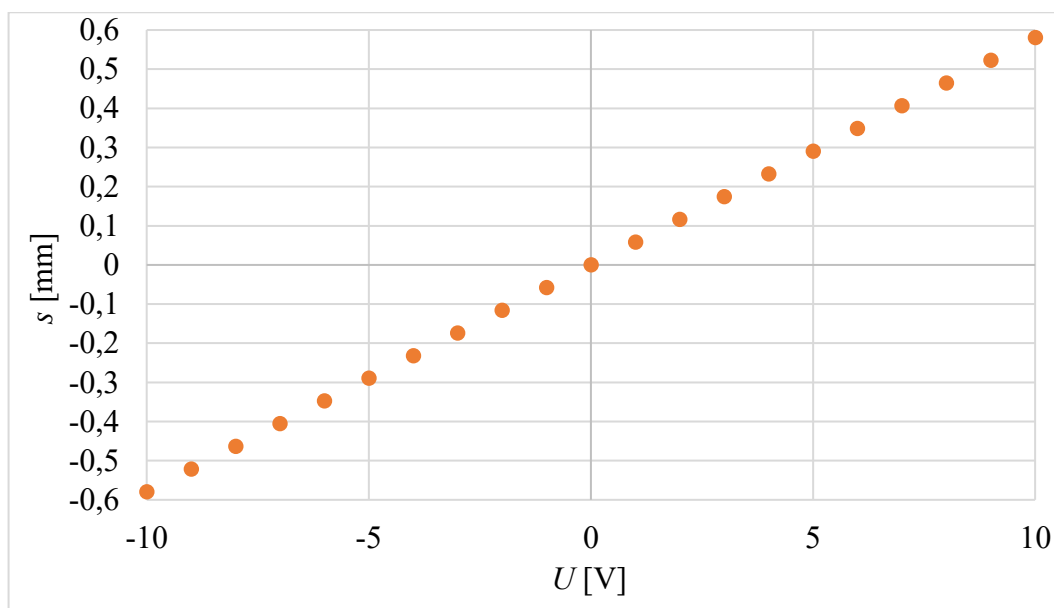
K dosažení správného nastavení matematického modelu proporcionálního rozváděče pro simulaci statických a dynamických charakteristik bylo zapotřebí zjistit závislost polohy šoupátka na vstupním napětí.

Polohu šoupátka jsme měřili pomocí digitálního úchylkoměru s přesností měření 0,001 mm. Při měření byl rozváděč upnutý ve svěráku, viz obr. 5.5.



Obr. 5.5 Fotografie měření zdvihu šoupátka rozváděče

Na obr. 5.6 je vidět naměřená závislost polohy šoupátka s v závislosti na napětí U .



Obr. 5.6 Závislost polohy šoupátka s na vstupním napětí U

5.3 Specifikace snímačů a přístrojů pro měření v obvodu

Všechny snímače a měřicí zařízení použité pro měření statických i dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče jsou podrobně popsány v této kapitole. Jednotlivé snímače byly důkladně vybrány tak, aby jejich rozsah měření vyhovoval jednotlivým měřením.

Snímače pro měření tlaku

Pro měření tlaku byly použity tlakové spínače PR15 od firmy Hydrotechnik, viz obr. 5.6. Snímač tlaku má analogový výstupní signál, velmi rychlou dobu odezvy ≤ 1 ms, nízké protihlukové vlastnosti a optimalizovanou přesnost. Pro připojení snímačů byly použity MINIMESS přípojky. V tab. 5.2 jsou uvedeny technické parametry snímače pro měření tlaku.

Tab. 5.2 Technické parametry tlakového snímače Hydrotechnik PR15 [8]

Princip měření	piezorezistivní
Rozsah měření	(0÷40) MPa
Výstupní signál	(4÷20) mA
Přesnost měření	$\pm 0,4$ %
Materiál těsnění	FMK
Typ ochrany	IP 40
Materiál tělesa	1.4140, 1.4301
Membránový materiál	1.4435
Utahovací moment	40 Nm (± 5 Nm)



Obr. 5.6 Tlakový snímač Hydrotechnik PR15 [8]

Snímače pro měření průtoku

Průtok Q byl měřen pomocí zubového průtokoměru GFM 70 od firmy Hydrotechnik, viz obr. 5.7. Průtokoměr má frekvenční výstupní signál. Průtokoměr umožňuje připojit tlakový snímač pomocí MINIMESS přípojky a snímač pro měření teploty pomocí teplotní jímky. V tab. 5.3 jsou uvedeny technické parametry zubového průtokoměru GFM 70.

Tab. 5.3 Technické parametry zubového průtokoměru GFM 70 [8]

Rozsah měření	$(0,7 \div 70) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Přesnost měření	$\pm 0,4 \%$
Geometrický objem	2.222 cm^3
Maximální provozní tlak	40 MPa
Princip měření	posunutí
Rozsah viskozity	$(10 \div 500) \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Teplota média	$(-20 \div 120) \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota okolí	max. $80 \text{ }^\circ\text{C}$
Filtrace	$25 \text{ }\mu\text{m}$
Materiál pláště víka	1.4305
Materiál ozubeného kola	1.7131
Materiál těsnění	FMK



Obr. 5.7 Zubový průtokoměr GFM 70 [8]

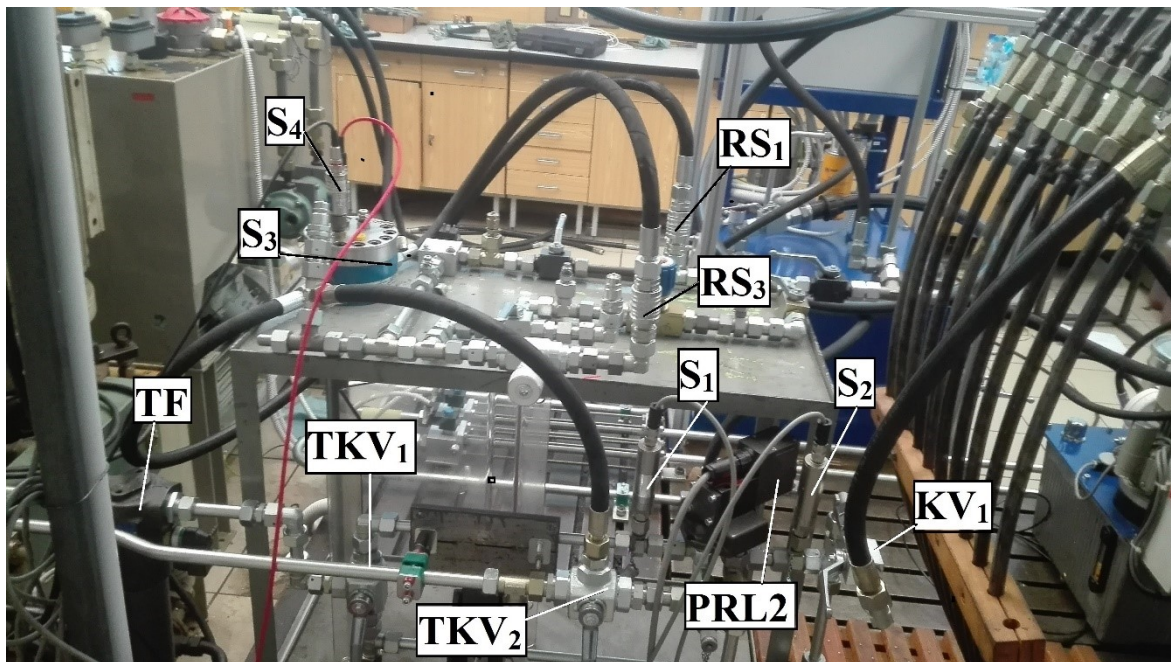
Měřicí přístroje

Pro snímače tlaku PR15 a zubový průtokoměr GFM 70 byl použitý měřicí přístroj MS 5060+ od firmy Hydrotechnik. K zaznamenávání polohy šoupátka rozváděče bylo potřeba použít měřicí přístroj HMG 3000 od firmy Hydac, z důvodů rozsahu výstupního signálu od polohy šoupátka, který na MS 5060+ nelze měřit.

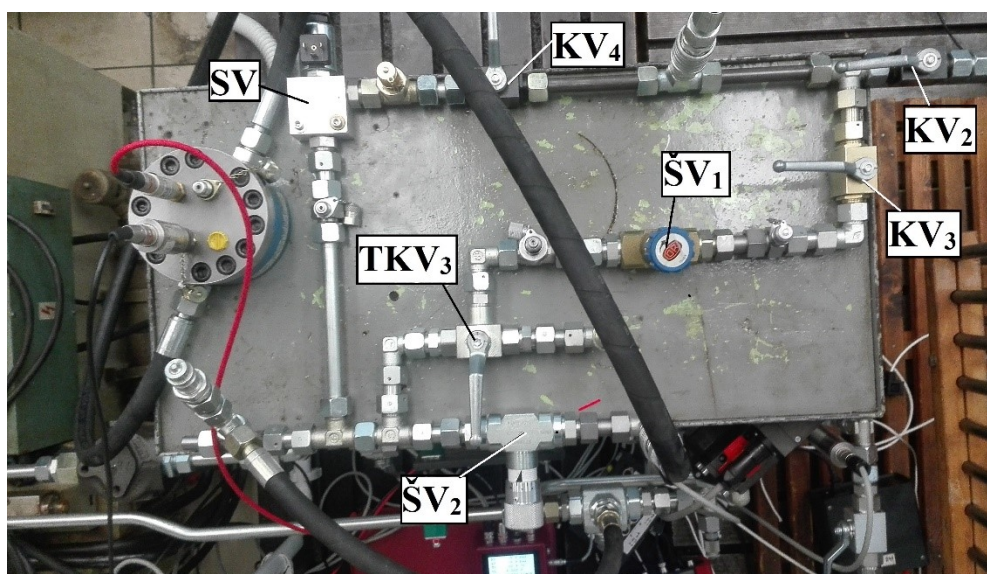
Měřené veličiny

1. Tlak před rozváděčem p_1 měřený snímačem S_1
2. Tlak za rozváděčem p_2 měřený snímačem S_2
3. Průtok Q měřený snímačem S_3
4. Teplota oleje T měřená snímačem S_4

Na obr. 6.2 a obr. 6.3 je fotografie s popisky hydraulického obvodu se zapojenými snímači pro měření Δp - Q charakteristiky.



Obr. 6.2 Fotografie hydraulického obvodu pro měření Δp - Q charakteristik



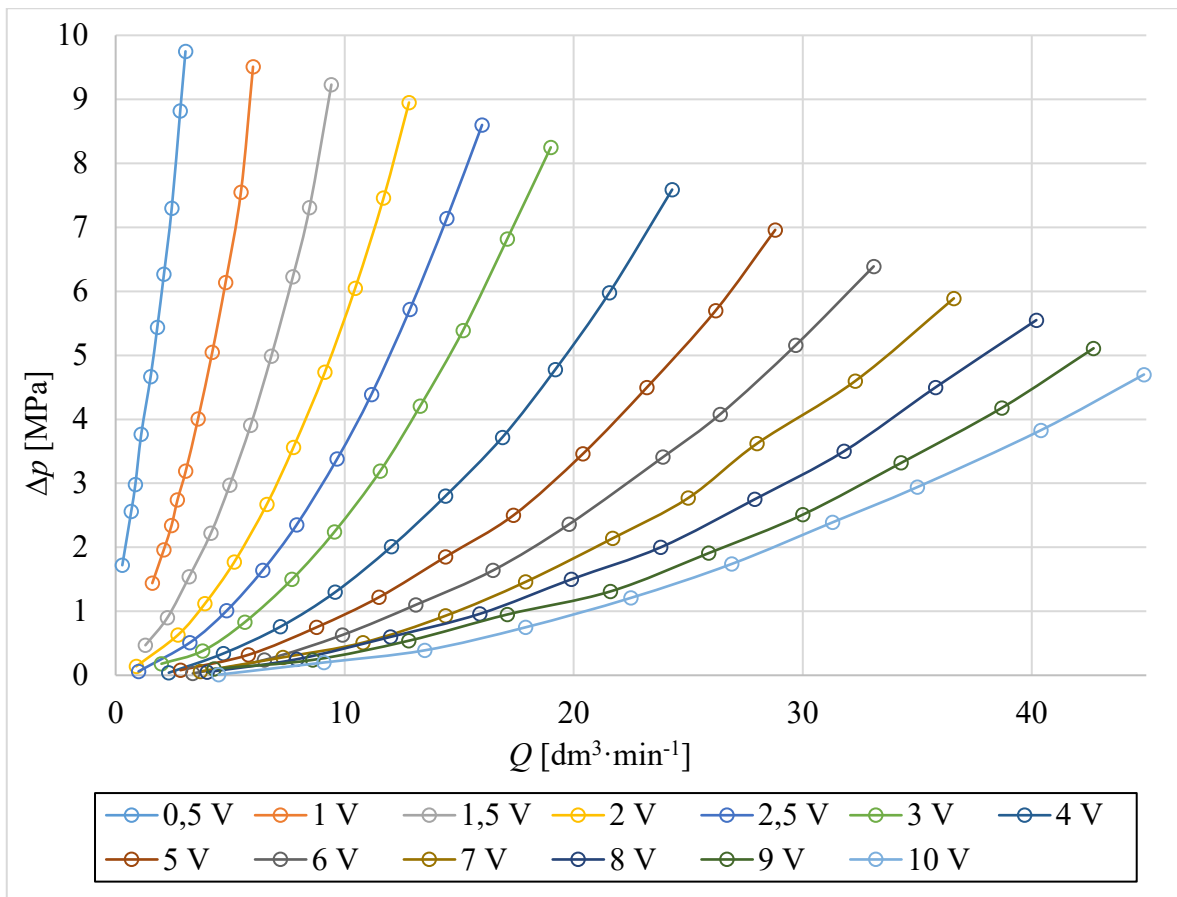
Obr. 6.3 Fotografie hydraulického obvodu pro měření Δp - Q charakteristik (pohled shora)

➤ Popis měření statické $\Delta p-Q$ charakteristiky

1. Hlavním vypínačem se zapne hydraulický agregát. Na přepouštěcím ventilu se nastaví tlak $p_{pv} = 10$ MPa. Na proporcionální rozváděč je pomocí řídicí elektroniky přiveden vstupní řídicí signál z počítače. Vstupní signál je vytvořen na počítači v programu Matlab. Škrticí ventil je plně otevřen.
2. Pomocí škrticího ventilu se postupně snižuje průtok. Při každé změně průtoku dojde ke změně tlakového spádu na proporcionálním rozváděči. Po ustálení měřených hodnot se odečtou z displeje měřicího přístroje hodnoty tlaků před a za rozváděčem, průtok a teplota oleje.
3. Měření se opakuje postupně pro vstupní řídicí napětí přivedené na proporcionální rozváděč $U = 0,5 \div 10$ V.
4. Odečtené hodnoty měřených veličin jsou zapsány do tabulek a poté jsou zpracovány a vyhodnoceny.

➤ Vyhodnocení statické $\Delta p-Q$ charakteristiky

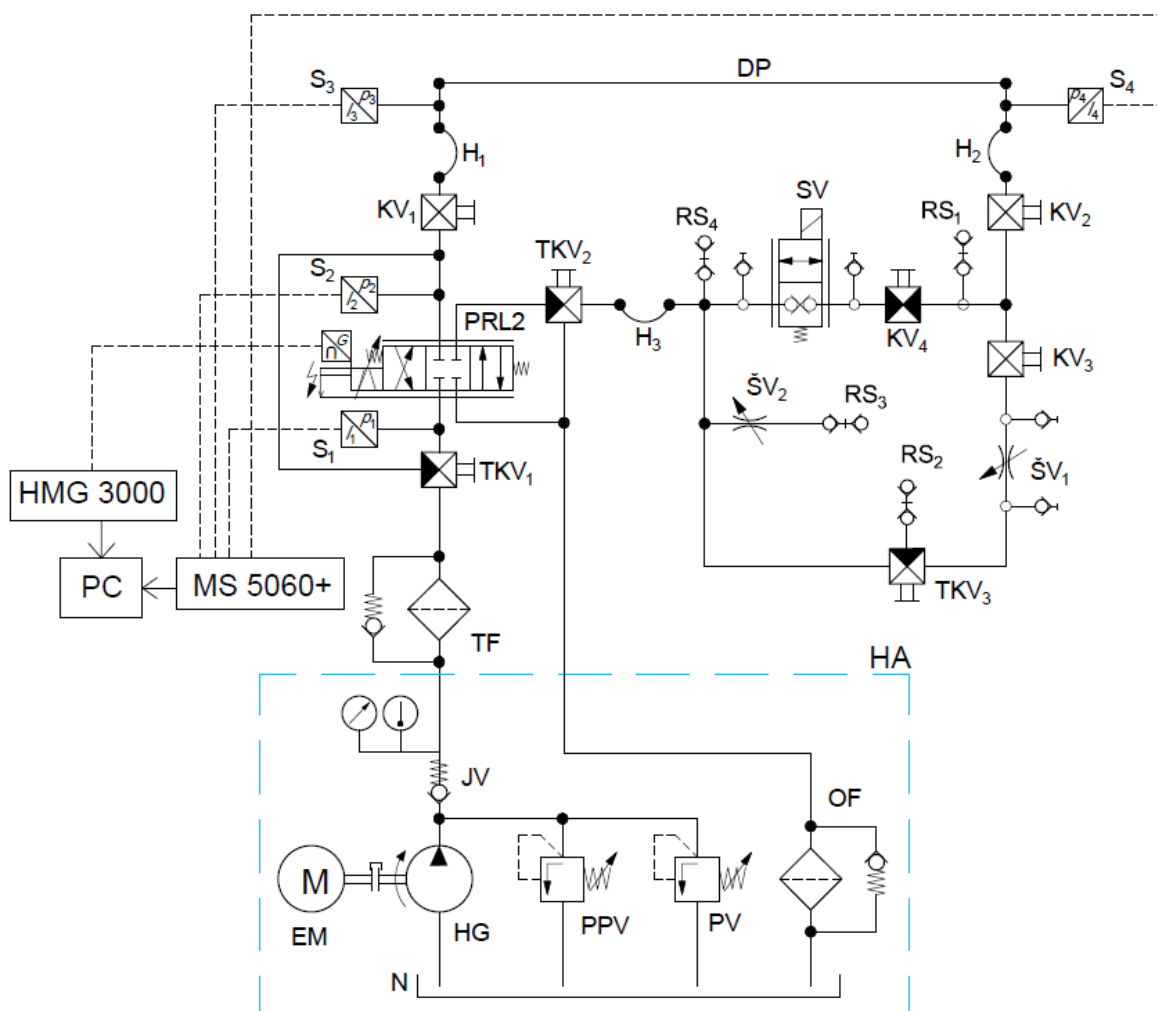
Na obr. 6.4 je graf $\Delta p-Q$ charakteristik, které byly měřeny pro jednotlivé vstupní napětí na proporcionálním rozváděči $U = 0,5 \div 10$ V. Měření pro vstupní napětí $U = 0,5 \div 3$ V byla provedena se zvyšováním napětí vždy o 0,5 V, z důvodu přesnějšího proměření $\Delta p-Q$ charakteristik při nižším vstupním napětí. Zbylá měření pro vstupní napětí $U = 4 \div 10$ V byla provedena se zvyšováním napětí vždy o 1 V. Z naměřených $\Delta p-Q$ charakteristik lze říci, že proporcionální rozváděč reguluje průtok v celém rozsahu vstupního řídicího napětí U , přičemž tlakový spád Δp na rozváděči při maximálním průtoku Q je pro vstupní napětí $U = 0,5$ V dvojnásobně vyšší než při vstupním napětí $U = 10$ V.



Obr. 6.4 Závislost tlakového spádu Δp na průtoku Q pro napětí $U = 0,5 \div 10$ V

6.2 Dynamické charakteristiky

Pro stanovení dynamických charakteristik byl hydraulický obvod zapojen podle schématu, viz obr. 6.5. Dvoucestný kulový ventil KV₄ je uzavřený a kapalina za dlouhým potrubím proudí přes kulový ventil KV₃ a škrticí ventil ŠV₁, kterým lze v obvodu nastavit velikost průtoku. Třicestné kulové ventily TKV₃, TKV₂ jsou zapojeny tak, že kapalina proudí přímo do nádrže N. Do obvodu jsou připojeny tlakové snímače pro měření tlaku před a za rozváděčem PRL2 a dlouhým potrubím DP. Tlakové snímače jsou připojeny k měřicímu přístroji MS 5060+, pomocí kterého je také zaznamenáváno vstupní napětí přivedené na proporcionální rozváděč. Poloha šoupátka rozváděče je snímána indukčním snímačem polohy a vyhodnocována pomocí integrované elektroniky. Poloha šoupátka je zaznamenávána pomocí měřicího přístroje HMG 3000.

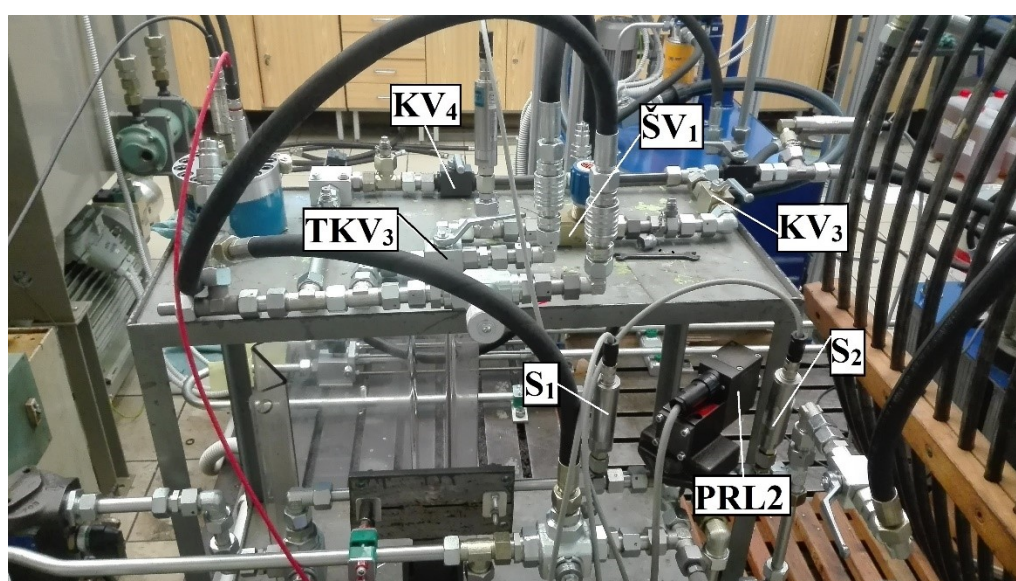


Obr. 6.5 Schéma hydraulického obvodu pro stanovení dynamických charakteristik

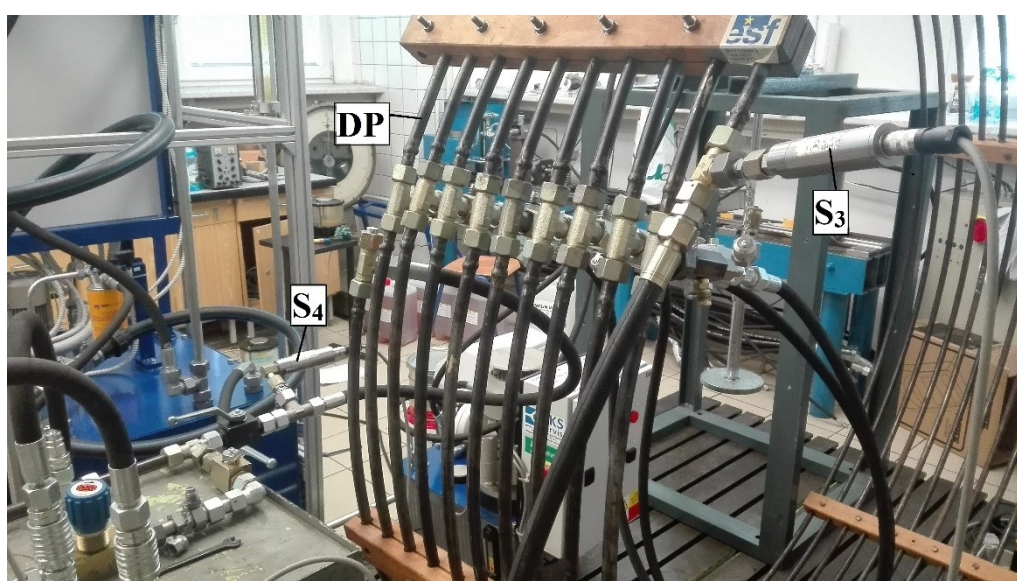
Měřené veličiny

1. Tlak před rozváděčem p_1 měřený snímačem S_1
2. Tlak za rozváděčem p_2 měřený snímačem S_2
3. Tlak před dlouhým potrubím p_3 měřený snímačem S_3
4. Tlak za dlouhým potrubím p_4 měřený snímačem S_4
5. Poloha šoupátka s měřená indukčním snímačem polohy
6. Vstupní řídicí napětí U proporcionálního rozváděče

Na obr. 6.6 a obr. 6.7 jsou fotografie s popiskami hydraulického obvodu pro stanovení dynamických charakteristik.



Obr. 6.5 Hydraulický obvod pro stanovení dynamických charakteristik

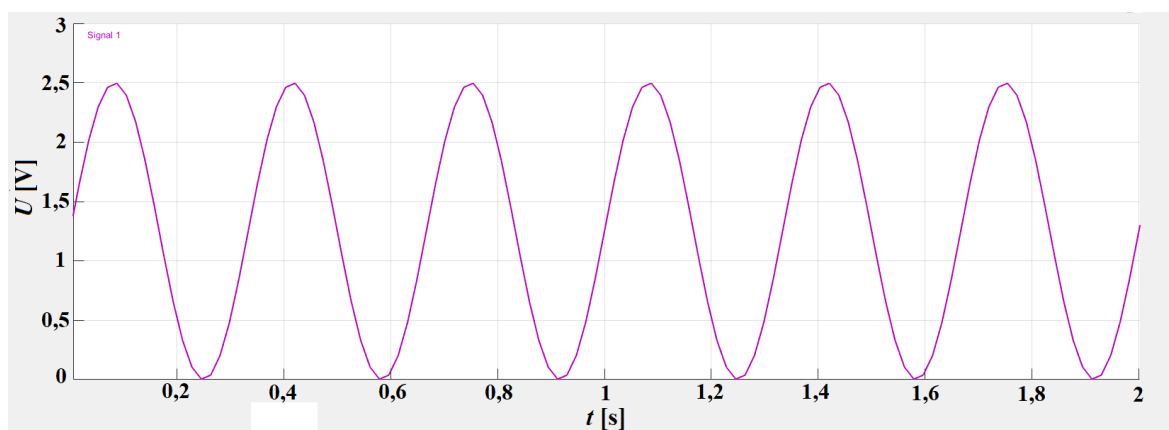


Obr. 6.6 Hydraulický obvod pro stanovení dynamických charakteristik (pohled na DP)

➤ Popis měření pro stanovení frekvenční charakteristiky

1. Na počítači v programu Matlab bylo vytvořeno několik harmonických sinusových signálů s různou frekvencí, kde amplituda je $A = 1,25 \text{ V}$ a offset amplitudy je $1,25 \text{ V}$. Vytvořené signály jsou pomocí řídicí elektroniky přiváděny na proporcionální rozváděč. Měření je provedeno pro frekvence v rozsahu $f = 1 \div 80 \text{ Hz}$.
2. Vstupní sinusový signál se zaznamenává měřicím přístrojem MS 5060+. Poloha šoupátka se zaznamenává měřicím přístrojem HMG 3000.
3. Měření bylo prováděno bez průtoku, tudíž nebylo zapotřebí zapínat hydraulický agregát HA.
4. Po přivedení vstupního řídicího signálu na rozváděč bylo nutno sepnout spínač, pomocí kterého bylo přivedeno napětí o velikosti $U = 6 \text{ V}$ na oba měřicí přístroje. Přivedené napětí funguje jako trigger, který spustí záznam měření ve stejnou dobu, jelikož bylo potřeba dosáhnout stejné časové osy pro oba záznamy měření.
5. Záznamy jednotlivých měření byly přeneseny pomocí USB flash disku na počítač a poté vyhodnoceny.

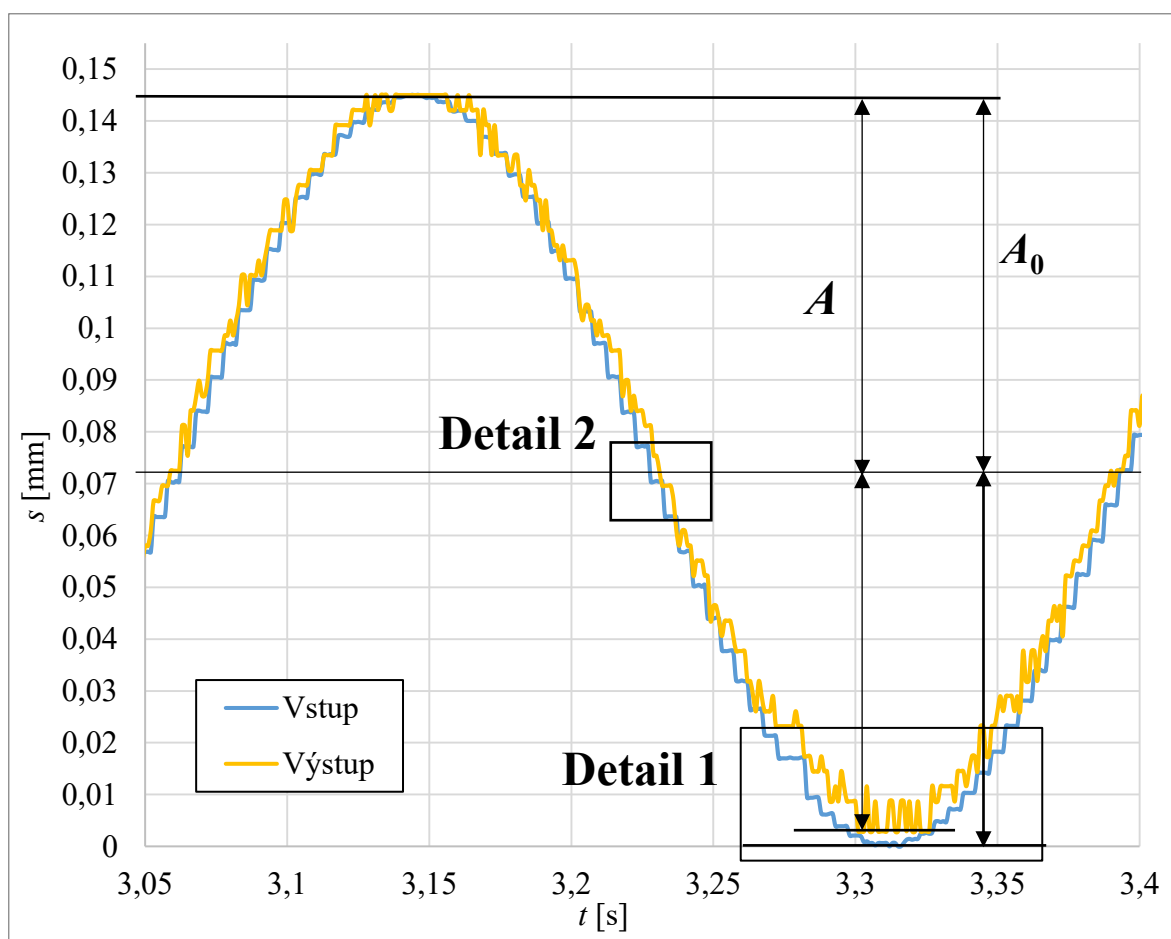
Na obr. 6.8 je zobrazen vstupní sinusový signál s frekvencí $f = 3 \text{ Hz}$ vytvořený v programu Matlab.



Obr. 6.8 Vstupní řídicí signál s frekvencí $f = 3 \text{ Hz}$

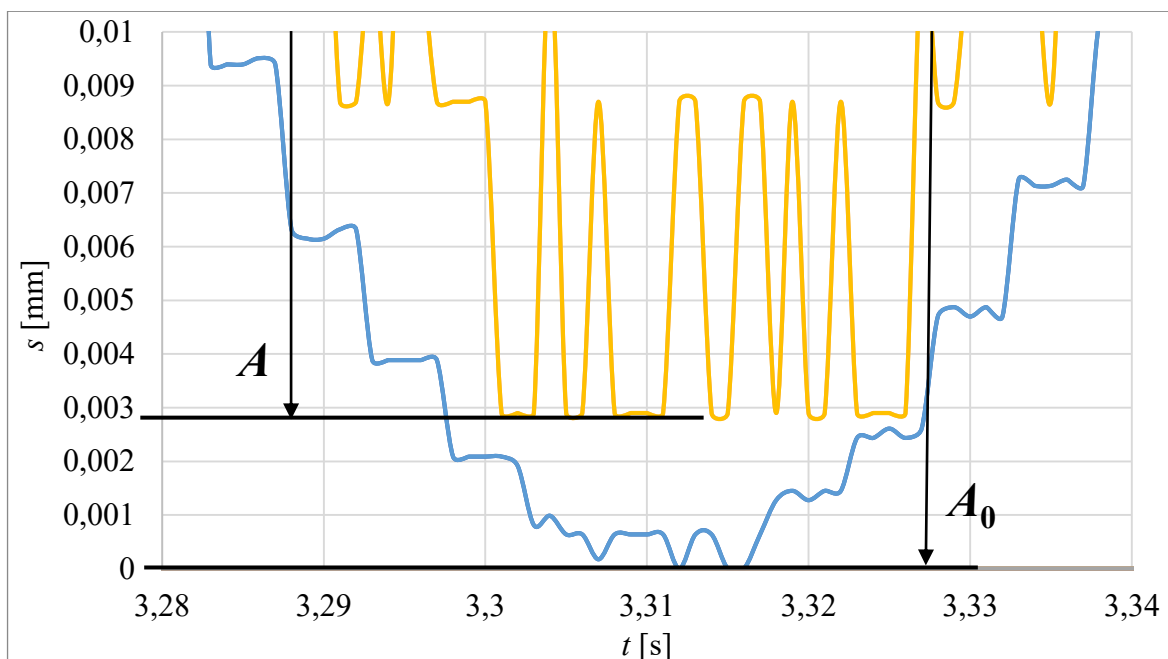
➤ Vyhodnocení frekvenčních charakteristik

Na obr. 6.9 je část záznamu měření pro stanovení frekvenčních charakteristik. Je zde porovnáván vstupní řídicí sinusový signál s frekvencí $f = 3$ Hz přivedený na rozváděč s výstupním signálem, kterým je poloha šoupátka rozváděče. Pro stanovení amplitudové frekvenční charakteristiky je zapotřebí zjistit pokles amplitudy výstupního signálu oproti vstupnímu signálu. Na obr. 6.10 je vidět odečtení poklesu amplitudy výstupního signálu. Pro stanovení fázové frekvenční charakteristiky je potřeba zjistit fázový posun výstupního signálu. Na obr. 6.11 je vidět odečtení fázového posunu výstupního signálu, který se určuje v polovině rozkmitu vstupního signálu.



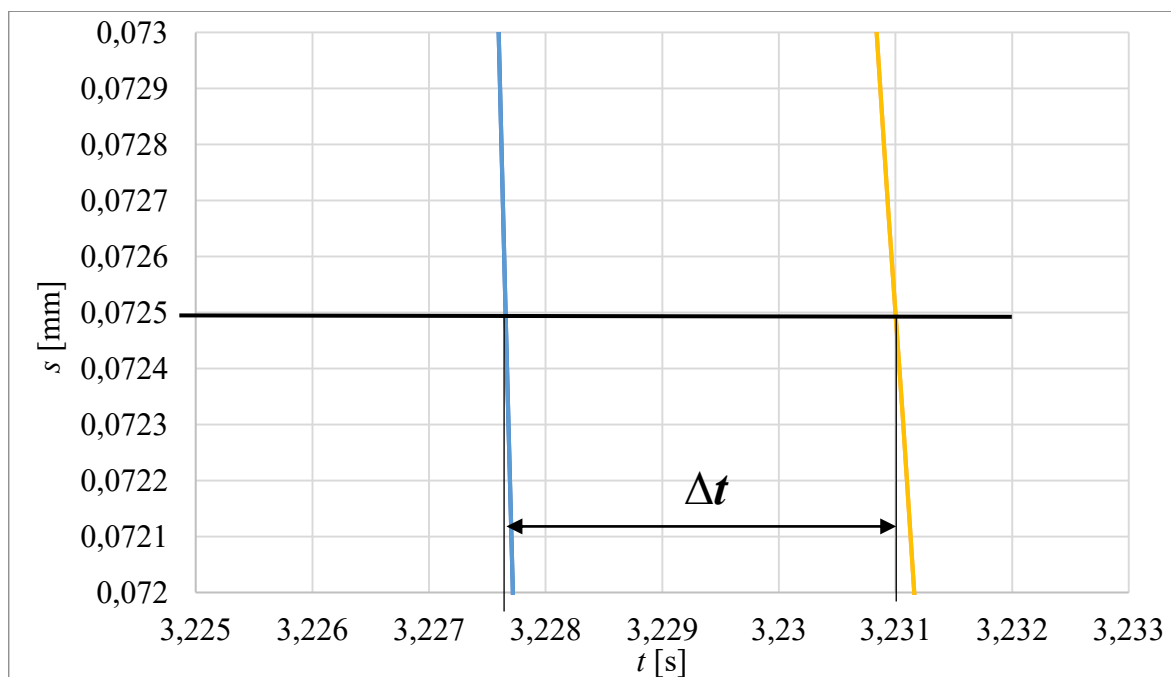
Obr. 6.9 Záznam měření pro stanovení frekvenčních charakteristik při frekvenci $f = 3$ Hz

Na obr. 6.10 je vidět detail záznamu měření pro přesné určení velikosti poklesu amplitudy výstupního signálu. Lze tedy ze záznamu určit, že amplituda výstupního signálu poklesla o 0,003 mm.



Obr. 6.10 Záznam měření pro stanovení frekvenčních charakteristik (detail 1)

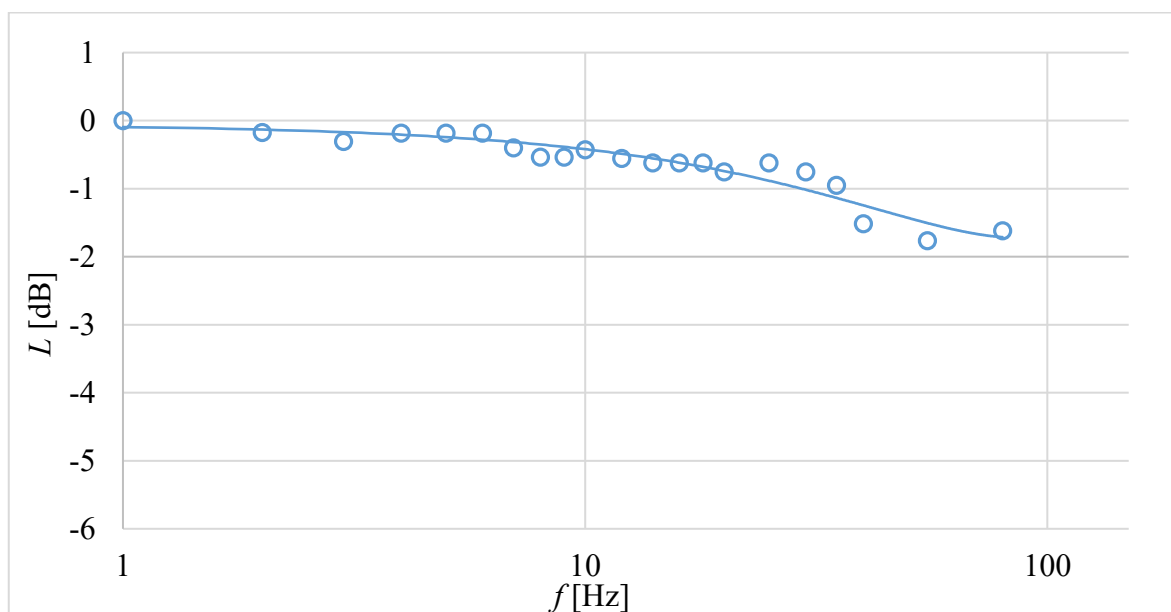
Na obr. 6.11 je vidět detail záznamu měření pro určení fázového posunu výstupního signálu. K určení fázového posunu je potřeba určit Δt , které je v tomto případě 0,003 s.



Obr. 6.11 Záznam měření pro stanovení frekvenčních charakteristik (detail 2)

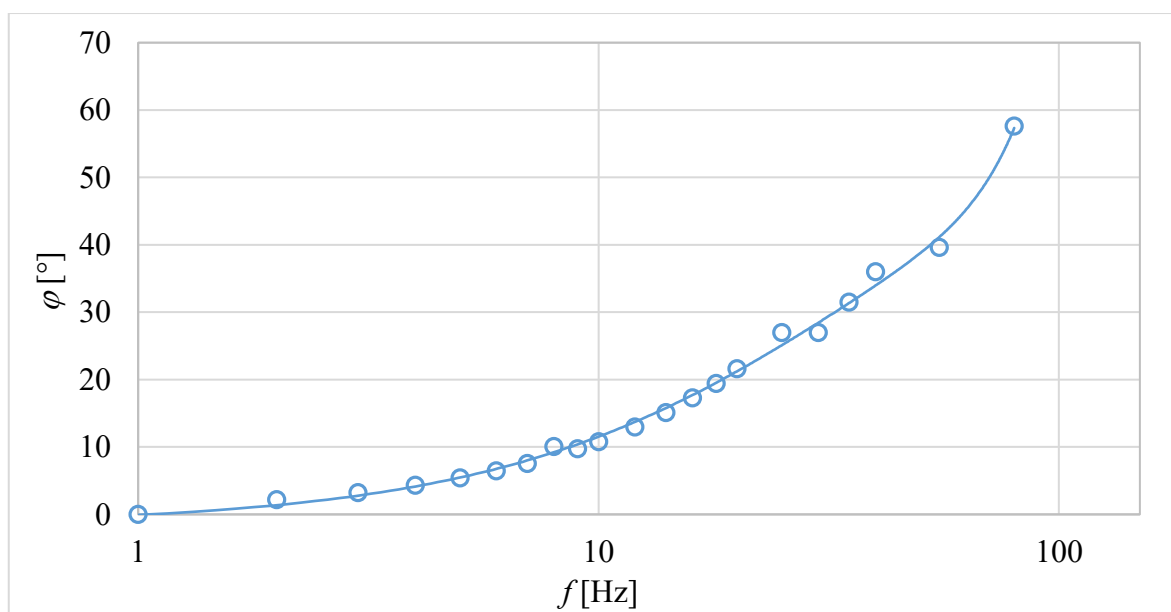
Pro stanovení frekvenčních charakteristik je potřeba postupně určit poměr amplitud A/A_0 a fázový posun φ vstupního a výstupního signálu pro jednotlivé frekvence. Poměr amplitud a fázový posun pro jednotlivé frekvence zjištěné z měření jsou uvedené v tabulce, viz příloha A.

Na obr. 6.12 je logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika stanovená z měření pro frekvence $f = 1 \div 80$ Hz.



Obr. 6.12 Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika

Na obr. 6.12 je fázová frekvenční charakteristika stanovená z měření pro frekvence $f = 1 \div 80$ Hz.

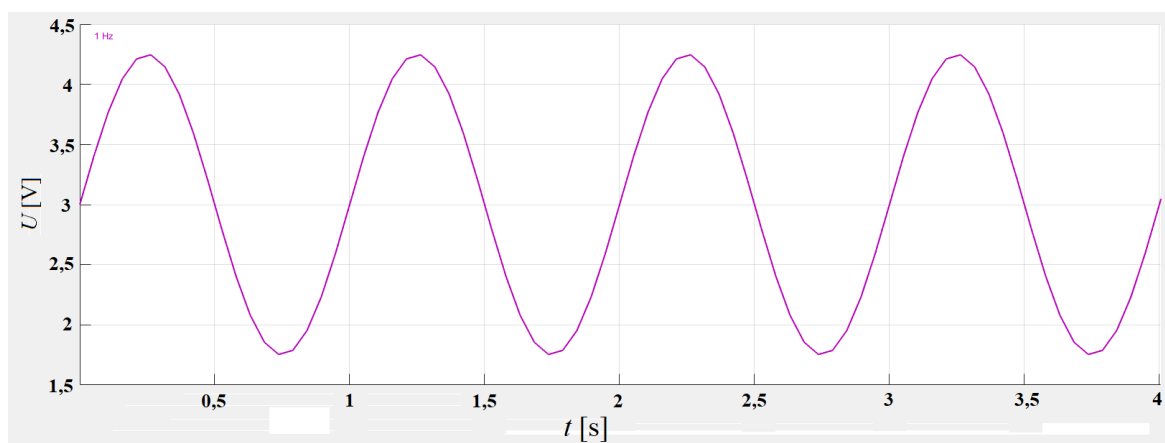


Obr. 6.12 Fázová frekvenční charakteristika

➤ Popis měření nestacionárního proudění

1. Na počítači v programu Matlab bylo vytvořeno několik harmonických sinusových signálů s různou frekvencí, kde amplituda byla $A = 1,25$ V a offset amplitudy 3 V. Vytvořené signály byly pomocí řídicí elektroniky přiváděny na proporcionální rozváděč. Měření bylo provedeno pro frekvence v rozsahu $f = 1 \div 30$ Hz.
2. Pomocí hlavního vypínače se zapne hydraulický agregát HA a na přepouštěcím ventilu se nastaví tlak $p_{pv} = 5$ MPa.
3. Na měřicím přístroji MS 5060+ je zaznamenáván průběh tlaků před a za rozváděčem PRL2 a dlouhým potrubím DP. Měření je zaznamenáváno s frekvencí snímání 1 ms.
4. Záznamy jednotlivých měření jsou přeneseny pomocí USB flash disku na počítač a poté jsou vyhodnoceny.

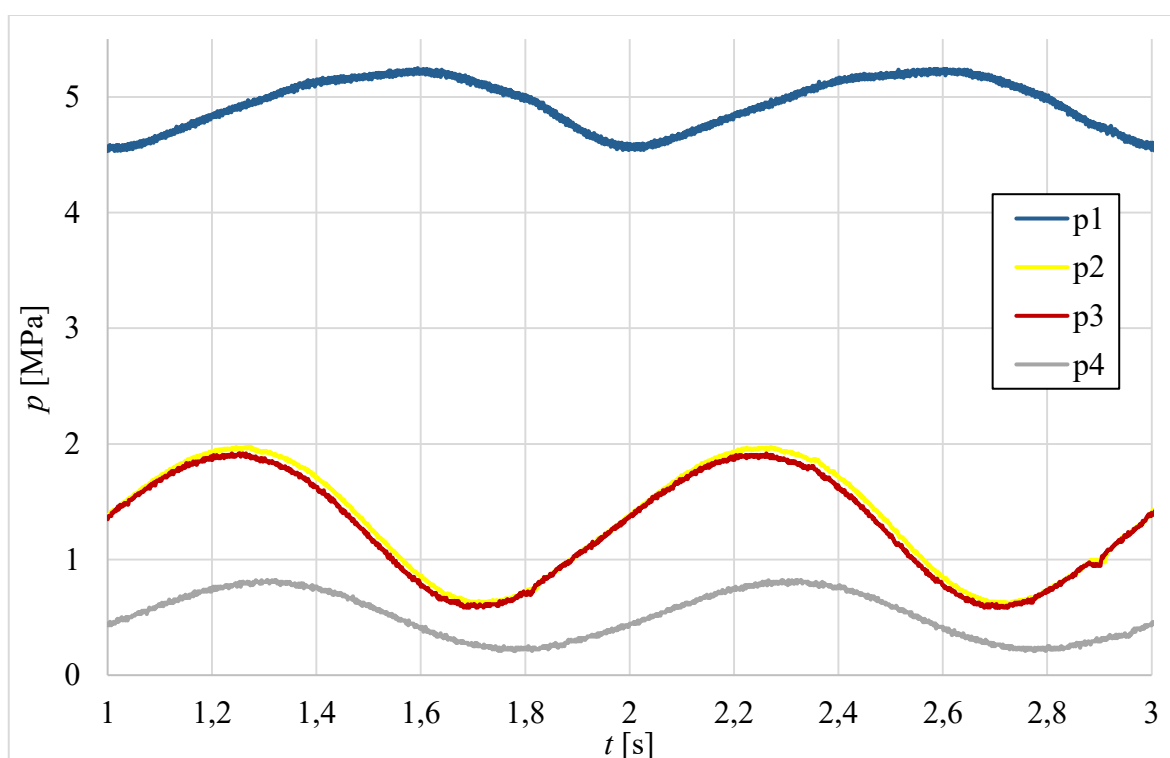
Na obr. 6.13 je zobrazen vstupní sinusový signál s frekvencí $f = 1$ Hz vytvořený v programu Matlab pro řízení proporcionálního rozváděče za účelem měření pulzací tlaků.



Obr. 6.13 Vstupní řídicí signál s frekvencí $f = 1$ Hz

➤ Vyhodnocení měření nestacionárního proudění

Na obr. 6.14 je graf, na kterém je zobrazena část záznamu měření tlakových pulzací při nestacionárním proudění pro vstupní signál s frekvencí $f = 1$ Hz. Z grafu jde vidět, že tlak p_1 před rozváděčem PRL2 pulzuje okolo tlaku $p_{pv} = 5$ MPa nastaveného na přepouštěcím ventilu. Tlak za rozváděčem p_2 výrazně klesnul. Tlak p_3 měřený před dlouhým potrubím DP se oproti tlaku p_2 za rozváděčem snížil jen nepatrně z důvodu místních ztrát na použitých hydraulických prvcích v obvodu mezi snímači tlaku. Tlak p_4 za dlouhým potrubím pulzuje výrazně při nižších hodnotách než tlak p_3 před dlouhým potrubím. Pokles tlaku p_4 za potrubím je způsobený třecími ztrátami na dlouhém potrubí a také místními ztrátami vznikajícími na T-kusech, které jsou zapojené do potrubí.



Obr. 6.14 Pulzace tlaků pro vstupní signál s frekvencí $f = 1$ Hz a tlak na přepouštěcím ventilu $p_{pv} = 5$ MPa

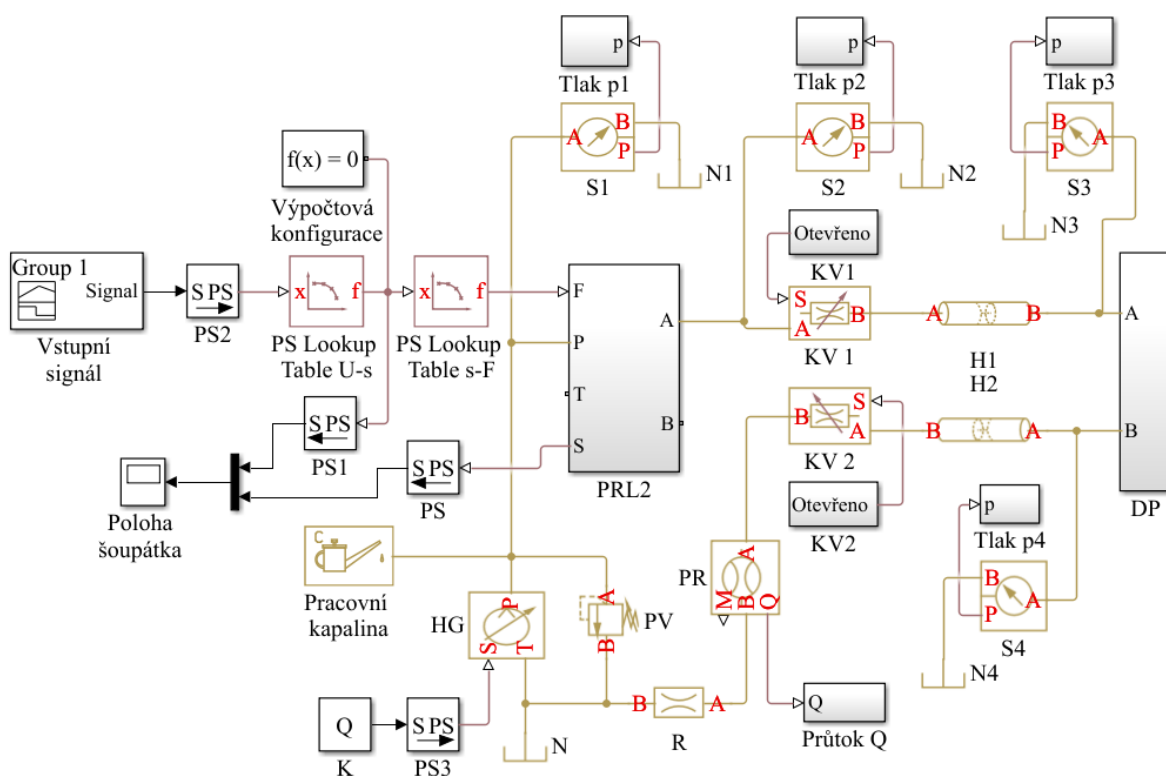
7 Simulace

V počítačovém softwaru Matlab Simulink byl vytvořen matematický model proporcionálního rozváděče a experimentálního hydraulického obvodu pro stanovení statických a dynamických charakteristik. V kapitole 7.1 je popsán matematický model hydraulického obvodu a proporcionálního rozváděče.

7.1 Matematický model

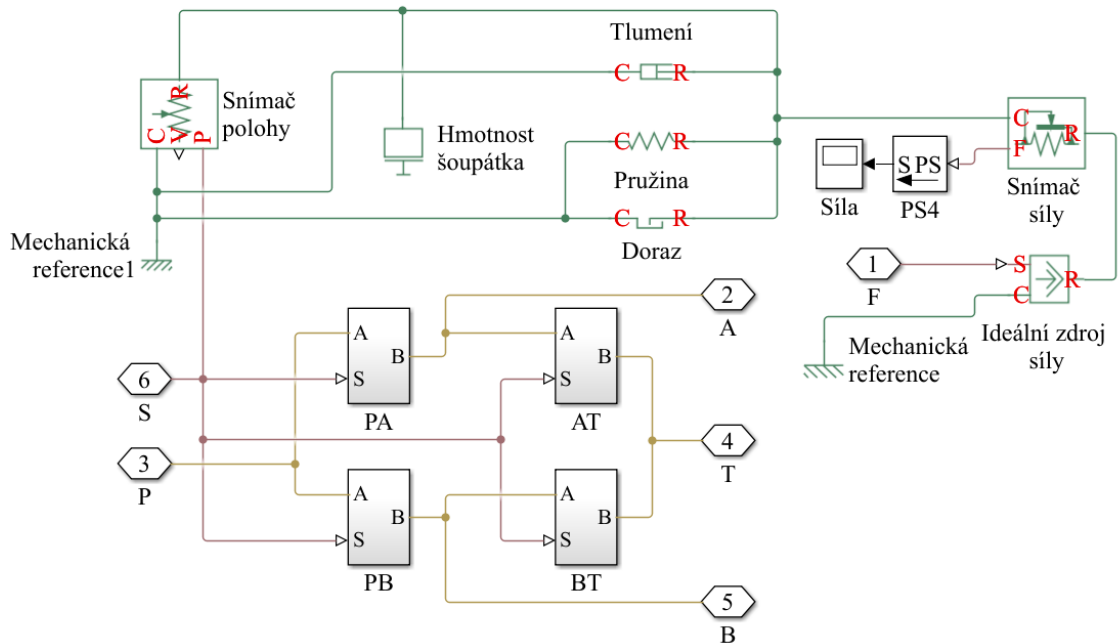
Na obr. 7.1 je zobrazeno schéma navrženého matematického modelu proporcionálního rozváděče a experimentálního obvodu v programu Matlab Simulink. V obvodu byly vytvořeny pro některé prvky subsystemy. Subsystemy byly vytvořeny z důvodu větší přehlednosti a lepší orientace v obvodu. V obvodu je subsystem proporcionálního rozváděče PRL2, dlouhého potrubí DP a subsystem prvků pro vyhodnocení jednotlivých tlaků a průtoku.

Popisky k jednotlivým blokům jsou uvedeny v tab. 7.1. Jednotlivé bloky použité v obvodu jsou popsány v kapitole 7.2, včetně jejich nastavení.

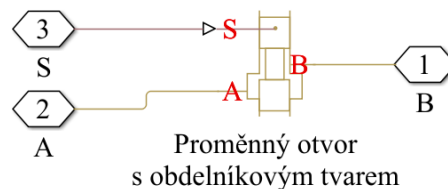


Obr. 7.1 Schéma matematické modelu experimentálního obvodu

Na obr. 7.2 je zobrazen subsystém proporčního rozváděče PRL2. Jsou zde vytvořeny ještě další čtyři subsystémy, které tvoří jednotlivé cesty rozváděče. Všechny čtyři subsystémy jsou zapojené stejně. Pro správnou funkci rozváděče musely být prvky jednotlivých subsystému nastaveny tak, aby po přivedení kladného signálu proudila kapalina přes PA, BT a PB, AT zůstaly uzavřené. Na obr. 7.3 je zobrazen subsystém cesty PA.

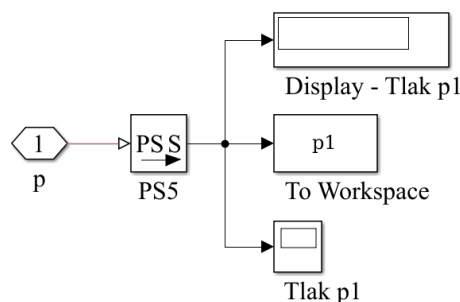


Obr. 7.2 Subsystém proporčního rozváděče PRL2



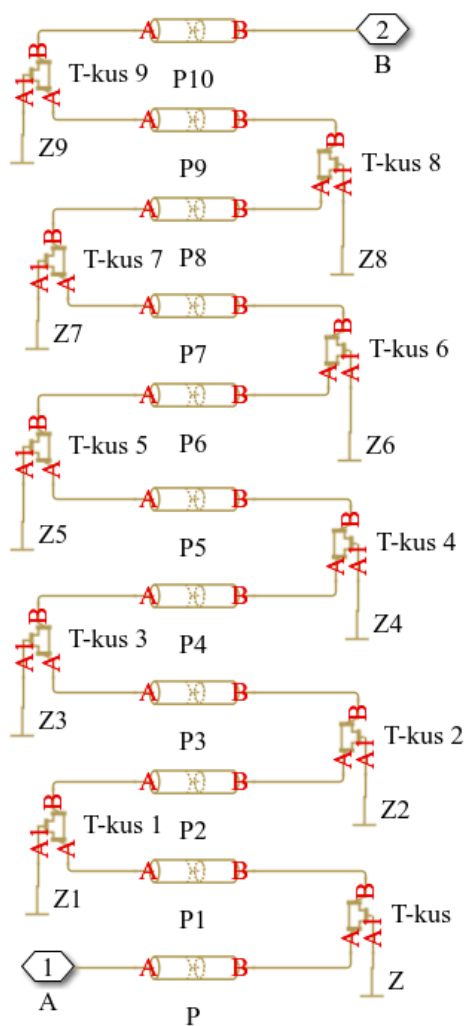
Obr. 7.3 Subsystém jednotlivých cest rozváděče

Na obr. 7.4 je zobrazen subsystém pro vyhodnocení tlaku před rozváděčem p_1 . Subsystémy pro vyhodnocení ostatních tlaků v obvodu a také průtoku jsou totožné.



Obr. 7.4 Subsystém pro vyhodnocení tlaku před rozváděčem p_1

Na obr. 7.5 je zobrazen subsystém dlouhého potrubí DP.



Obr. 7.5 Subsystém dlouhého potrubí DP

V tab. 7.1 jsou uvedeny popisky pro jednotlivé bloky v matematické modelu.

Tab. 7.1 Seznam popisků použitých bloků v matematické modelu

K	Konstanta
PS	Převodník
HG	Zdroj průtoků
PV	Pojistný ventil
R	Hydraulický odpor
S	Snímač tlaku
KV	Kulový ventil
DP	Dlouhé potrubí
N	Nádrž
H	Hadice
P	Potrubí
PR	Průtokoměr
Z	Zátka

7.2 Popis a nastavení vybraných bloků

V této kapitole jsou popsány vybrané bloky matematického modelu, včetně jejich nastavení. V příloze B jsou popsány všechny ostatní bloky modelu.

Hydraulická kapalina

Blok hydraulická kapalina (*Hydraulic Utilities*), viz obr. 7.6, určuje vlastnosti hydraulické kapaliny, jako je kinematická viskozita, hustota, objemový modul a relativní množství nerozpuštěného vzduchu, pro všechny hydraulické bloky v obvodu. Vlastnosti kapaliny se předpokládají v průběhu simulace konstantní. Blok má jeden port [13]. V tab. 7.2 jsou uvedeny hodnoty nastavení bloku.



Obr. 7.6 Blok hydraulické kapaliny

Tab. 7.2 Nastavené hodnoty bloku kapaliny

Hustota oleje	880	[kg·m ⁻³]
Kinematická viskozita	28e-6	[m ² ·s ⁻¹]
Modul pružnosti	1,4e9	[Pa]
Obsah nerozpuštěného vzduchu	0,001	[-]

Segmentové potrubí

Blok segmentové potrubí (*Segmented Pipeline*), viz obr. 7.7, představuje hydraulické potrubí s kruhovým průřezem, jako sadu do série zapojených segmentů se soustředěnými parametry. Každý segment potrubí se skládá z odporu proti pohybu, odporu proti zrychlení a odporu proti deformaci. Blok segmentového potrubí obsahuje vstupní port A a výstupní port B. V bloku lze nastavit hodnotu vnitřního průměru potrubí, délky potrubí, počtu segmentů a součinitele poměru tlaku a světlosti potrubí [13]. V tab. 7.3 jsou uvedeny hodnoty nastavení bloku pro ocelové potrubí a v tab. 7.4 jsou uvedeny hodnoty nastavení bloku pro hydraulickou hadici.



Obr. 7.7 Blok segmentového potrubí

Tab. 7.3 Nastavené hodnoty bloku segmentového potrubí (ocelové potrubí)

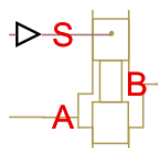
Vnitřní průměr	0,012	[m]
Délka potrubí	5,66	[m]
Počet segmentů	5	[-]
Drsnost vnitřního povrchu	1,5e-8	[m]
Součinitel poměru tlaku a světlosti potrubí	9,59e-14	[m·Pa ⁻¹]

Tab. 7.4 Nastavené hodnoty bloku segmentového potrubí (hydraulická hadice)

Vnitřní průměr	0,0095	[m]
Délka potrubí	1	[m]
Počet segmentů	1	[-]
Drsnost vnitřního povrchu	1,5e-5	[m]
Součinitel poměru tlaku a světlosti potrubí	5,55e-12	[m·Pa ⁻¹]

Proměnný otvor s obdélníkovým tvarem

Blok proměnný otvor s obdélníkovým tvarem (*Orifice with Variable Area Slot*), viz obr. 7.8, představuje průtočnou plochu tvořenou válcovým ostrohranným šoupátkem a obdélníkovým otvorem v tělese rozváděče. Průtok otvorem je úměrný velikosti průtočné plochy a tlakovému spádu přes otvor. V bloku lze nastavit šířku obdélníkového otvoru, průtokový součinitel, počáteční otevření a plochu pro průtokové ztráty. Blok obsahuje vstupní port A, výstupní port B a signální port S, kterým se řídí posunutí válcového šoupátka, tudíž velikost průtočné plochy [13]. V tab. 7.5 jsou uvedené hodnoty nastavení bloku.



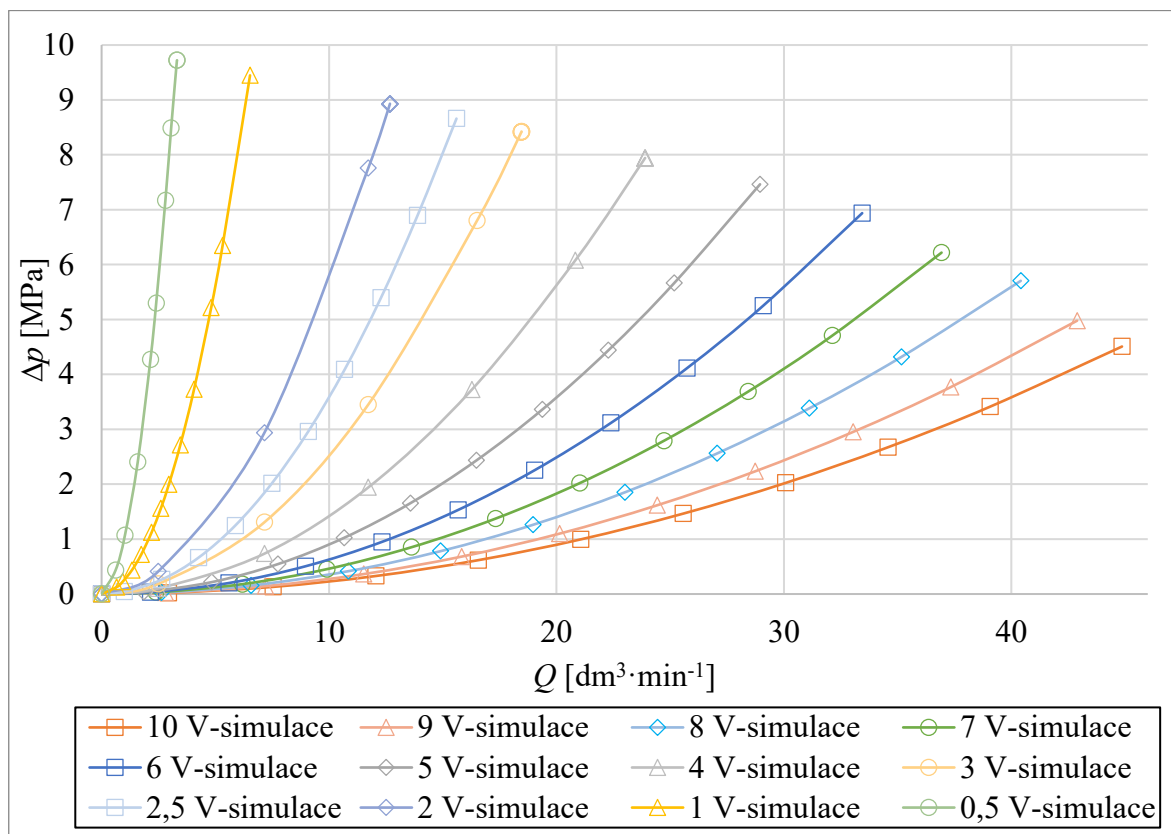
Obr. 7.8 Blok proměnného otvoru s obdélníkovým tvarem

Tab. 7.5 Nastavené hodnoty bloku proměnného otvoru s obdélníkovým tvarem

Šířka otvoru	18,25	[mm]
Průtokový součinitel	0,7	[-]
Počáteční otevření	0	[mm]
Plocha průtokových ztrát	0,001	[mm ²]

7.3 Vyhodnocení simulace statických Δp - Q charakteristik

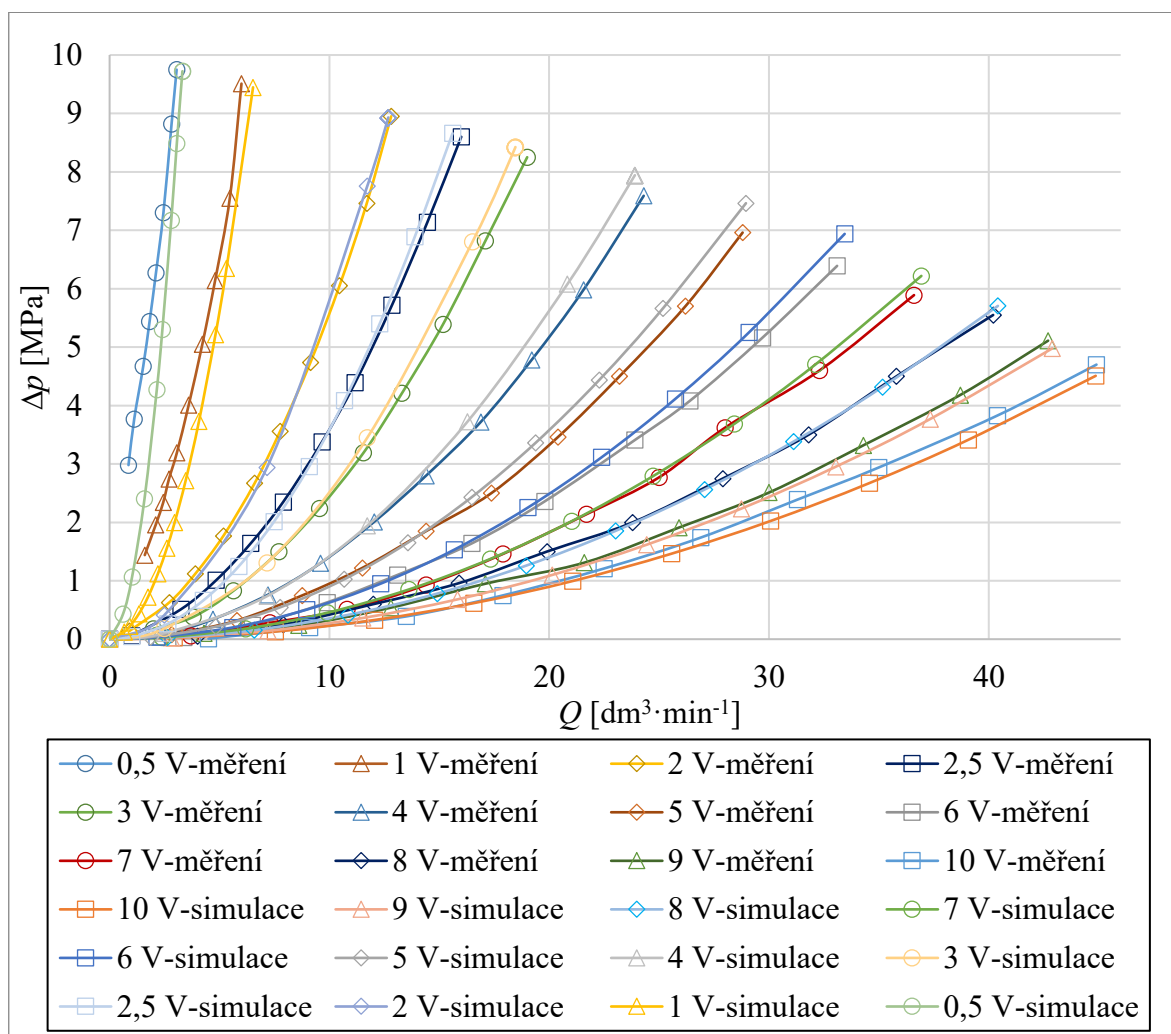
Na matematickém modelu byla provedena simulace měření pro stanovení statických charakteristik pro vstupní napětí $U = 0,5 \div 10$ V, stejně jako u experimentálního měření. Na obr. 7.9 je zobrazen graf, na kterém jsou vyhodnoceny z dat získaných simulací jednotlivé Δp - Q charakteristiky rozváděče.



Obr. 7.9 Závislost tlakového spádu Δp na průtoku Q získaná simulací matematického modelu

7.4 Porovnání simulace a měření statických Δp - Q charakteristik

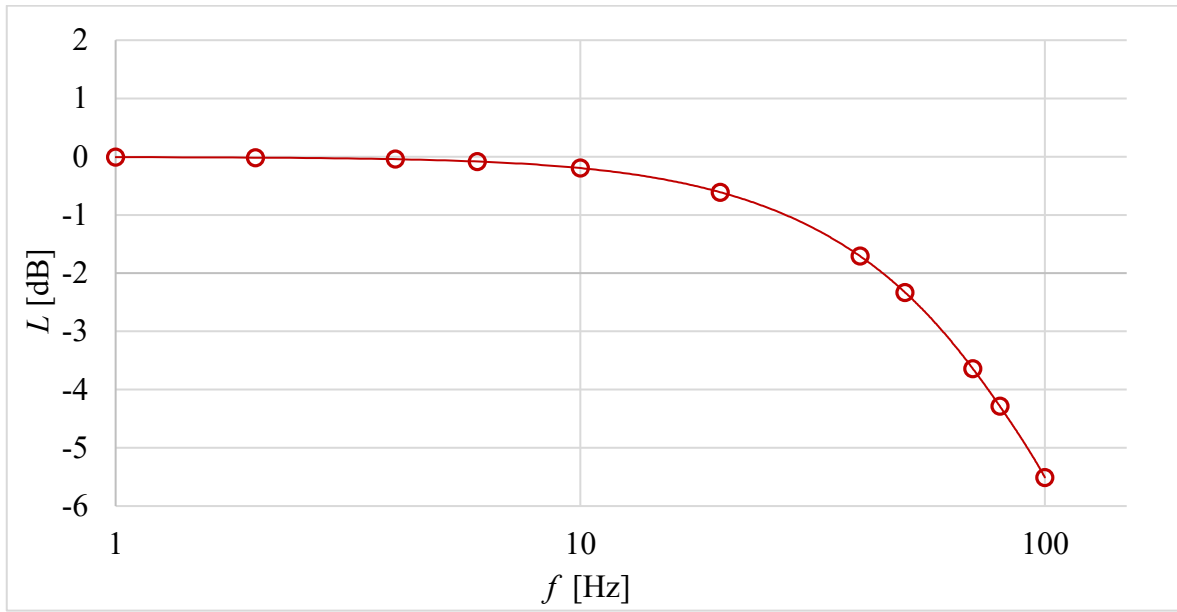
Na obr. 7.10 jsou porovnány statické Δp - Q charakteristiky rozváděče stanovené z měření na experimentálním obvodu a stanovené simulací na matematickém modelu. Z grafu lze vidět, že charakteristiky pro jednotlivá vstupní napětí jsou při malém průtoku téměř totožné a s rostoucím průtokem se mírně od sebe odchyľují. Odchyľky jednotlivých charakteristik jsou malé a lze tedy říct, že statické vlastnosti matematického modelu proporcionálního rozváděče téměř odpovídají těm skutečným.



Obr. 7.10 Porovnání naměřených a nasimulovaných Δp - Q charakteristik

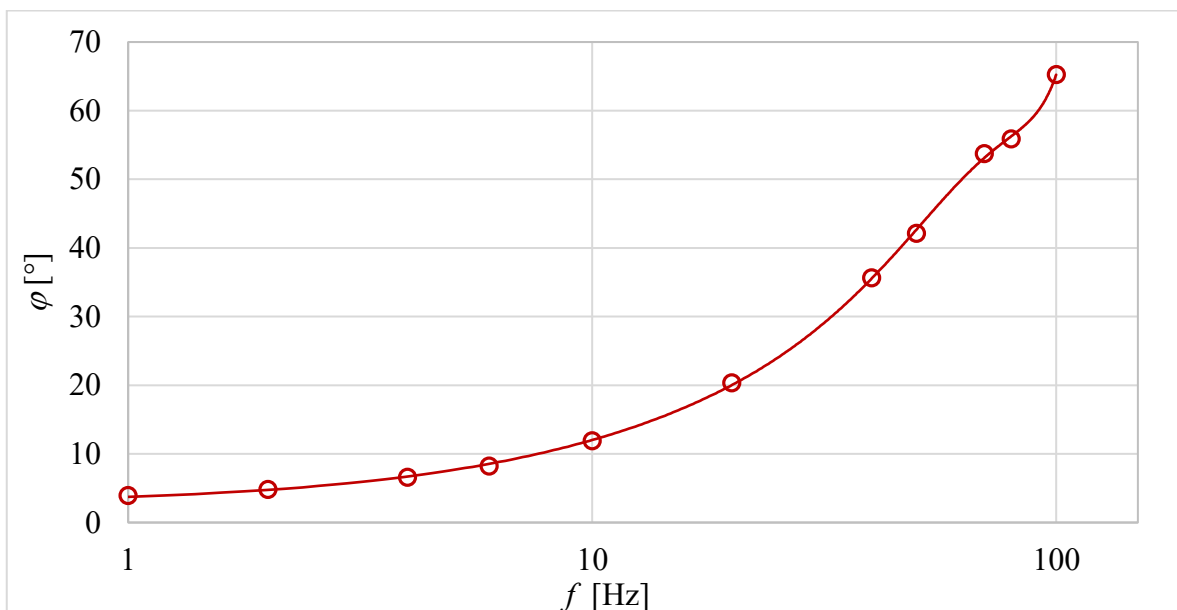
7.5 Vyhodnocení simulace frekvenčních charakteristik

Na obr. 7.11 je vyhodnocená logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika stanovená simulací matematického modelu pro vstupní sinusový signál s frekvencí $f = 1 \div 100$ Hz. V grafu je vidět že u amplitudy pro nízké frekvence přibližně do $f = 10$ Hz dochází jen k mírnému poklesu, ale poté s rostoucí frekvencí dojde k rychlému poklesu amplitudy.



Obr. 7.11 Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika stanovená simulací matematického modelu proporcionálního rozváděče

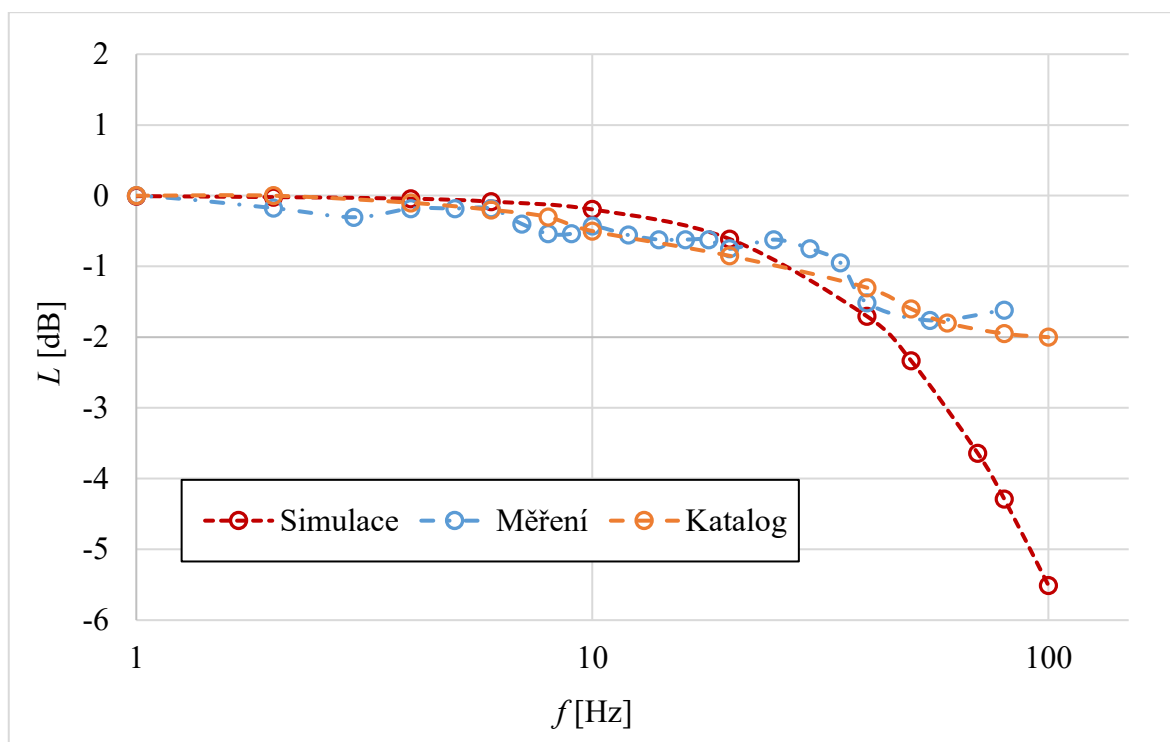
Na obr. 7.12 je vyhodnocená fázová frekvenční charakteristika stanovená simulací matematického modelu pro vstupní sinusový signál s frekvencí $f = 1 \div 100$ Hz.



Obr. 7.12 Fázová frekvenční charakteristika stanovená simulací matematického modelu

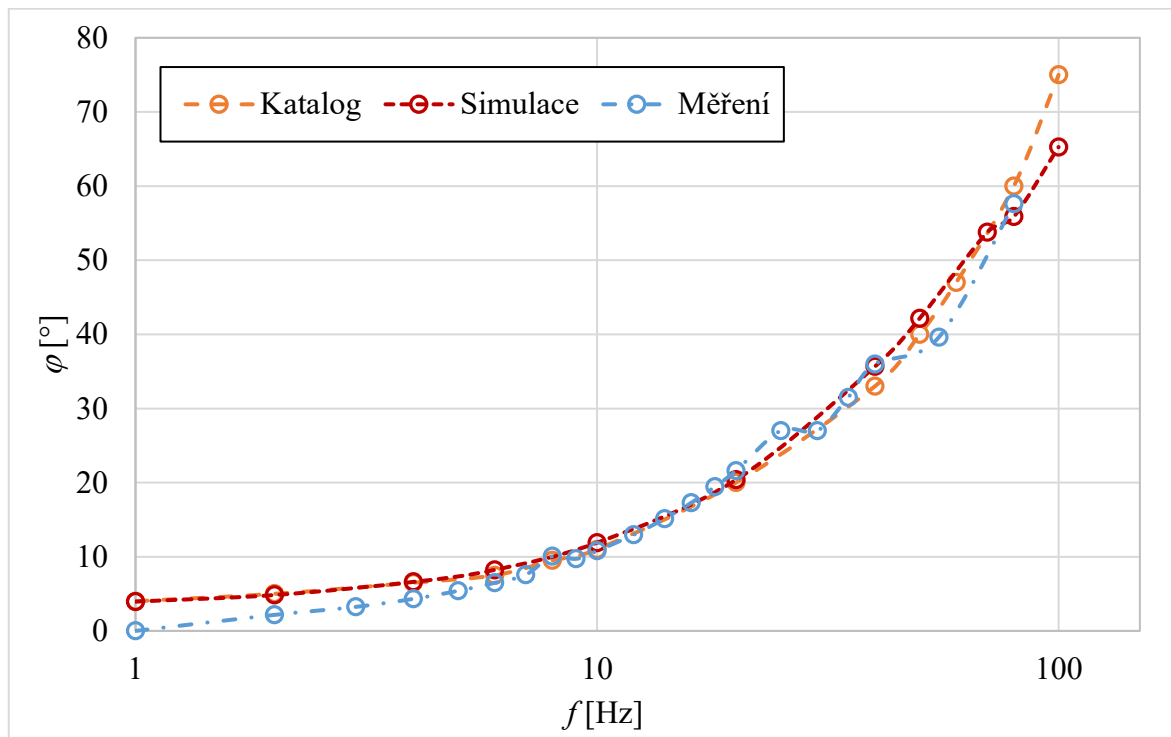
7.6 Porovnání simulace a měření frekvenčních charakteristik

Na obr. 7.13 jsou porovnány logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky získané měřením a simulací s katalogovou charakteristikou rozváděče. Při porovnání naměřené charakteristiky s charakteristikou z katalogu je vidět, že do frekvence $f = 30$ Hz naměřená charakteristika přibližně kopíruje s menšími odchylkami tu z katalogu. S vyššími frekvencemi dochází k větším odchylkám mezi jednotlivými charakteristikami. Charakteristika získaná simulací matematického modelu do frekvence $f = 30$ Hz dosahuje přibližně stejných hodnot jako charakteristika katalogu. S rostoucí frekvencí se začne charakteristika získaná simulací výrazně lišit od té naměřené i katalogové. Z toho vyplývá, že matematický model proporcionálního rozváděče lze použít pro přesné a rychlé řízení pouze do frekvence $f = 30$ Hz.



Obr. 7.13 Porovnání logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik

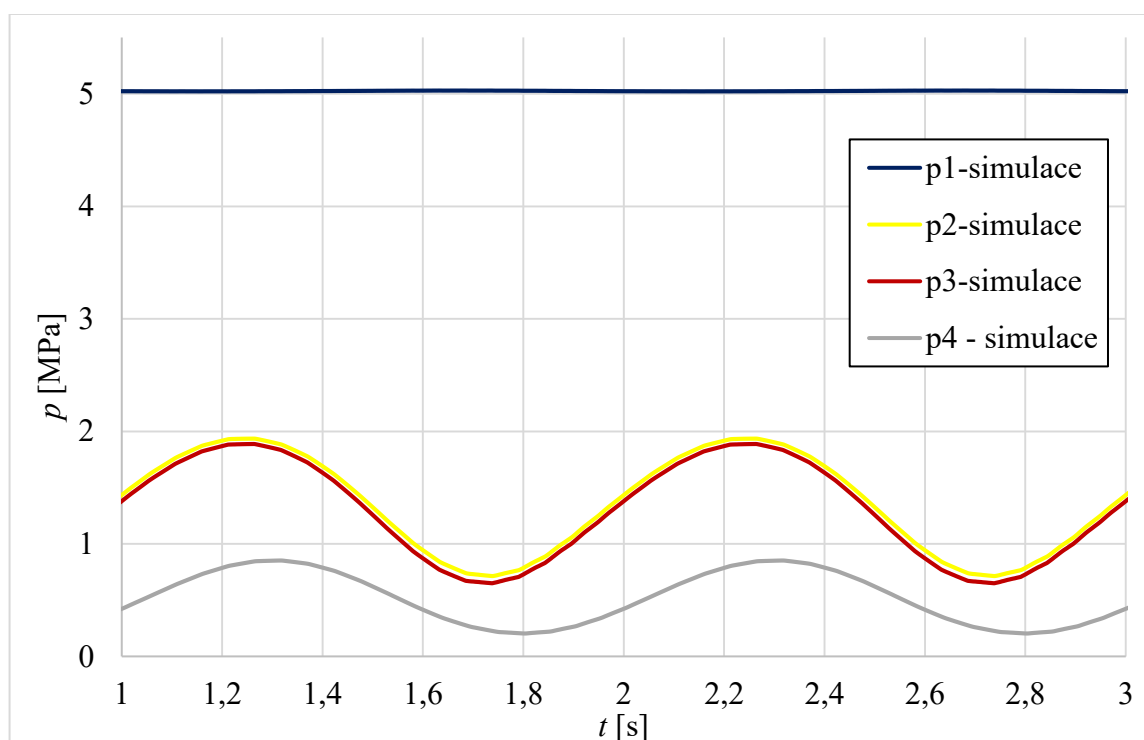
Na obr. 7.14 jsou porovnány fázové frekvenční charakteristiky získané měřením a simulací s katalogovou charakteristikou rozváděče. Naměřená charakteristika se s charakteristikou z katalogu při nízkých frekvencích mírně liší ale s rostoucí frekvencí začne naměřená charakteristika odpovídat té z katalogu. Charakteristika získaná simulací je téměř totožná jako charakteristika z katalogu.



Obr. 7.14 Porovnání fázových frekvenčních charakteristik

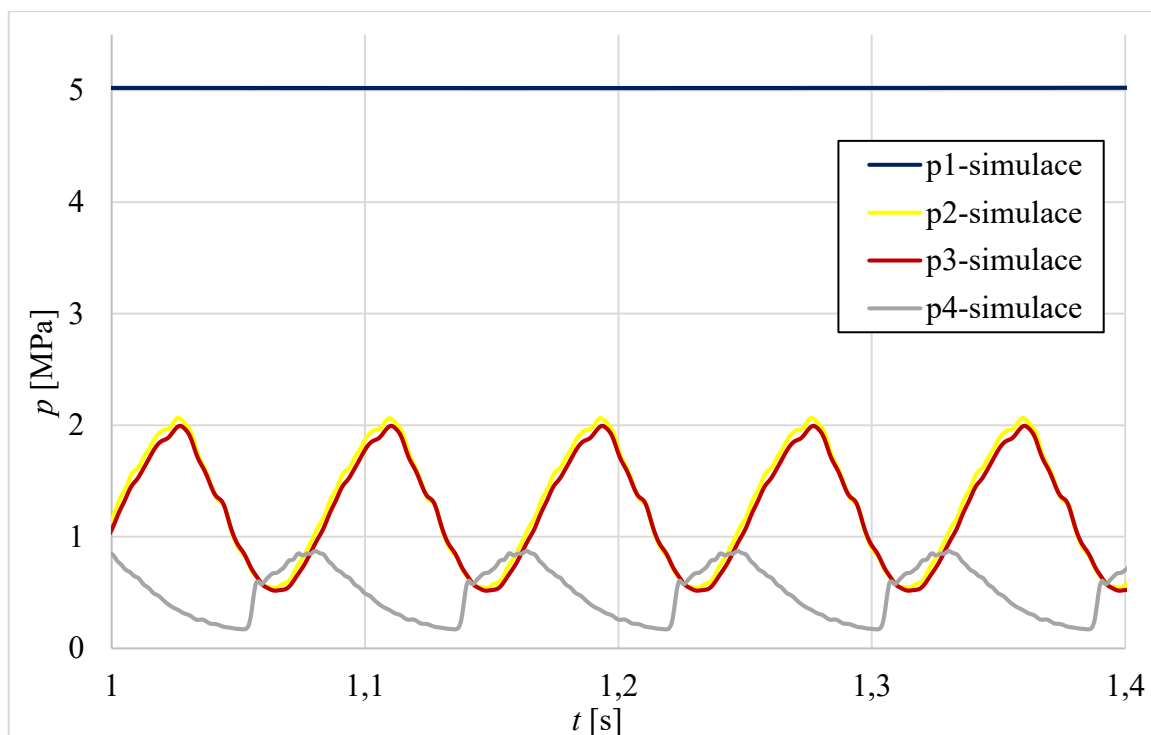
7.7 Vyhodnocení simulace nestacionárního proudění

Na obr. 7.15 je zobrazená část záznamu simulace tlakových pulzací při frekvenci vstupního napětí $f = 1$ Hz. V grafu jde vidět, že tlak před rozváděčem p_1 nepulzuje a je ustálený na hodnotě odpovídající tlaku nastaveném na bloku pojistného ventilu. Tlaky za rozváděčem p_2 a před dlouhým potrubím p_3 pulzují se stejnou amplitudou, ale tlak před potrubím je nižší. Pokles tlaku je způsoben hydraulickým odporem proti proudění vznikající na prvcích v matematickém modelu představující kulový ventil a hydraulickou hadici. Tlak za dlouhým potrubím p_4 pulzuje s nižší amplitudou a je fázově posunutý v porovnání s tlakem před dlouhým potrubím p_3 . Fázové posunutí je způsobenou délkou potrubí.



Obr. 7.15 Závislost průběhů tlaků na čase při vstupním řídicím signálu s frekvencí $f = 1$ Hz a tlaku na pojistném ventilu $p_{pv} = 5$ MPa

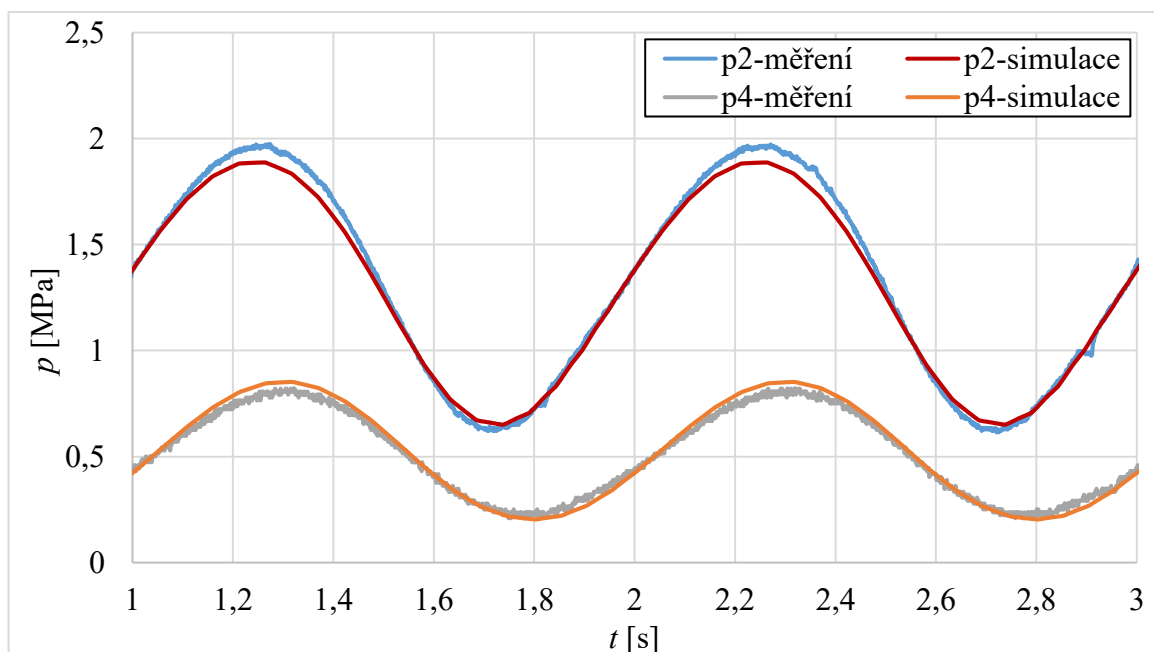
Na obr. 7.16 je zobrazená část záznamu simulace tlakových pulzací stejně jako na obr. 7.15 ale s rozdílnou frekvencí vstupního napětí, která je u této simulace $f = 12$ Hz. V grafu jde vidět, že průběh tlaku p_4 je odlišný než průběh tlaků p_2 a p_3 .



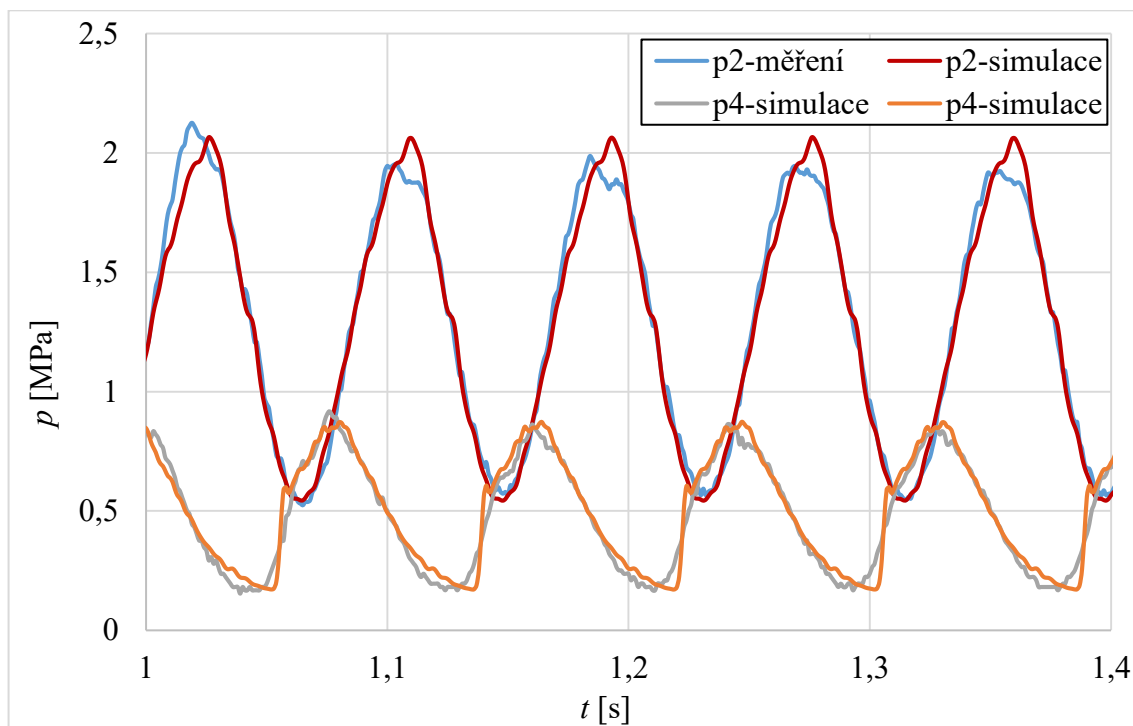
Obr. 7.16 Závislost průběhů tlaků na čase při vstupním řídicím signálu s frekvencí $f = 12$ Hz a tlaku na pojistném ventilu $p_{pv} = 5$ MPa

7.8 Porovnání simulace a měření nestacionárního proudění

Na obr. 7.17 a obr. 7.18 jsou porovnány pulzace tlaků p_2 na začátku dlouhého potrubí a p_4 na konci dlouhého potrubí změřené na experimentálním obvodu a nasimulované pomocí matematického modelu pro vstupní napětí s frekvencí $f=1$ Hz a $f=12$ Hz. Simulace průběhů tlaků s malými odchylkami téměř kopíruje naměřené průběhy tlaků.



Obr. 7.17 Porovnání pulzací tlaků pro měření a simulaci při frekvenci $f=1$ Hz



Obr. 7.18 Porovnání pulzací tlaků pro měření a simulaci při frekvenci $f=12$ Hz

8 Závěr

Diplomová práce se zabývá měřením a matematickou simulací pro stanovení statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče s lineárním motorem.

V úvodu práce byla zpracována literární rešerše problematiky statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče. Byly zde popsány jednotlivé statické a dynamické charakteristiky, které se vyhodnocují na proporcionálních rozváděčích. Dále zde byla popsána konstrukce a funkce proporcionálního rozváděče s lineárním motorem PRL2 od firmy Argo Hytos, pro který byly následně vyhodnocovány jednotlivé charakteristiky. V závěru rešerše byla popsána pohybová rovnice šoupátkového proporcionálního rozváděče společně s jednotlivými silami působícími na šoupátko rozváděče.

V praktické části byl nejprve navržen experimentální hydraulický obvod pro měření jednotlivých charakteristik. Experimentální obvod byl navržen tak, aby bylo možné ho zapojit i pro měření jiných experimentů např. měření hydraulického rázu. Experimentální obvod byl sestaven a následně odzkoušen v laboratoři N108. Obvod pro měření statických a dynamických charakteristik proporcionálního rozváděče byl navržen včetně umístění tlakových snímačů, průtokoměru, teplotního snímače a měřicích přístrojů pro zaznamenávání jednotlivých měření. Po připojení všech snímačů tlaků, průtokoměru a teplotního snímače do obvodu bylo provedeno nastavení parametrů jednotlivých snímačů na měřicím přístroji MS 5060+. K měřicímu přístroji HMG 3000 byl připojen snímač polohy šoupátka. Na proporcionálním rozváděči byly postupně provedeny měření pro stanovení statických $\Delta p-Q$ charakteristik, frekvenčních charakteristik a měření pulzací tlaků vyvolané proporcionálním rozváděčem.

Nejprve byl obvod zapojen pro měření statických $\Delta p-Q$ charakteristik. Pro stanovení $\Delta p-Q$ charakteristik bylo potřeba měřit tlak před a za rozváděčem. Dále byl měřený průtok, který se měnil pomocí škrticího ventilu, a teplota oleje. Měření statických $\Delta p-Q$ charakteristik bylo provedeno pro vstupní napětí přivedené na proporcionální rozváděč $U = 0,5 \div 10$ V. Hodnoty měřených veličin byly odečítány z displeje měřicího přístroje MS 5060+ a zapisovány do předem připravených tabulek. Poté byly hodnoty měření pro jednotlivá vstupní napětí vyhodnoceny v programu Excel a graficky zpracovány. Z grafického vyhodnocení $\Delta p-Q$ charakteristik je vidět, že proporcionální rozváděč reguluje průtok v celém rozsahu vstupního napětí. Dále bylo provedeno měření pro stanovení

frekvenčních charakteristik. Měření bylo provedeno bez průtoku přes rozváděč. Na proporcionální rozváděč byl postupně přiváděn vstupní sinusový signál s frekvencí $f = 1 \div 80$ Hz, velikostí amplitudy $A = 1,25$ V a s ofsetem 1,25 V. Na měřicím přístroji MS 5060+ byl zaznamenáván průběh vstupního napětí a na měřicím přístroji HMG 3000 poloha šoupátka rozváděče. Záznamy jednotlivých měření byly převedeny do počítače a následně byly graficky vyhodnoceny logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika a fázová frekvenční charakteristika. Z grafického vyhodnocení můžeme říci, že rozváděč má dynamické vlastnosti jako proporcionální člen se setrvačností, 1. řádu. Jako poslední bylo provedeno měření nestacionárního proudění, které bylo vyvoláno proporcionálním rozváděčem. Zaznamenávány byly průběhy tlaků před a za rozváděčem a před a za dlouhým potrubím. Záznamy měření byly převedeny do počítače, kde byly následně graficky vyhodnoceny.

Další část práce se zabývá návrhem matematického modelu proporcionálního rozváděče a experimentálního obvodu. V programu Matlab - Simulink je navržen model proporcionálního rozváděče, který byl navíc ještě doplněn o experimentální obvod, tak aby bylo možné provést simulace pro stanovení $\Delta p-Q$ charakteristik a simulaci nestacionárního proudění. Jednotlivé bloky modelu byly nastavené tak, aby simulace jednotlivých měření co nejlépe odpovídala reálným měřením. Simulace jednotlivých měření byla provedena na nastaveném matematickém modelu pro stejné vstupní signály jako byly u jednotlivých měření na experimentálním obvodu. Záznamy jednotlivých simulací byly poté vyhodnoceny a porovnány s měřením.

Při porovnání naměřených a nasimulovaných $\Delta p-Q$ charakteristik je v grafu vidět, že charakteristiky odpovídající stejnému vstupnímu napětí se příliš neliší a pro menší průtoky jsou téměř totožné. Z toho lze říci, že statické vlastnosti modelu proporcionálního rozváděče téměř odpovídají statickým vlastnostem reálného rozváděče. Dále byly porovnány naměřené a nasimulované frekvenční charakteristiky s frekvenčními charakteristikami z katalogu rozváděče. U porovnání logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik je vidět, že do frekvence $f = 30$ Hz naměřená charakteristika přibližně odpovídá charakteristice uvedené v katalogu. Při vyšších frekvencích dochází ke vzniku větších odchylek charakteristik. Charakteristika získaná simulací při nízkých frekvencích odpovídá katalogové charakteristice. Do frekvence $f = 30$ Hz mají jednotlivé logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky podobný průběh, ale s nárůstem frekvence dochází u charakteristiky získané simulací k prudkému poklesu. To znamená, matematický model rozváděče lze využívat pouze do frekvence $f = 30$ Hz.

Fázová frekvenční charakteristika získaná simulací a katalogová jsou téměř totožné. Charakteristika získaná měřením má při nízkých frekvencích mírnou odchylku od charakteristiky z katalogu. Naměřená fázová frekvenční charakteristika však u vyšších frekvencí odpovídá jak katalogové charakteristice, tak charakteristice získané simulací. Porovnání pulzací tlaků měření a simulace bylo provedeno pro frekvence $f = 1$ Hz a $f = 12$ Hz. Při porovnání jde vidět, že simulace pulzací tlaků u obou frekvencí má stejný průběh jako u měření, pouze dochází k menším odchylkám při dosažení maximální amplitudy kmitání. Z jednotlivých porovnání dynamických charakteristik můžeme říct, že dynamika matematického modelu do frekvence $f = 30$ Hz přibližně odpovídá dynamice reálného rozváděče.

9 Seznam použité literatury

- [1] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, díl 2. Řídicí prvky hydrostatických systémů. Příslušenství hydraulických obvodů*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2008, 2. vyd., 140 s. ISBN 978-80-248-1827-6.
- [2] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 159 s. ISBN 80-030-0308-3.
- [3] BAROŠKA, J. *Hydrostatické mechanismy*. Hydropneutech s.r.o., Žilina 2012, 388 s. ISBN 978-80-970 897-2-6.
- [4] PIVOŇKA, J. a kol. *Tekutinové mechanismy*, Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987, 04-255-87, 623 s.
- [5] DÖRR, H., EWALD, R., et al. *Der Hydraulik Trainer Band 2, Proportional-und Servoventil - Technik*. Lohr am Main: Mannesmann Rexroth GmbH, 1986. ISBN 3-8023-0898-0.
- [6] MANRING, Noah. *Hydraulic control systems*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-69311-1.
- [7] VESELÝ, František. *Návrh hydraulických řídicích prvků s využitím simulačních výpočtů*. Ostrava, 2010. Disertační práce. VŠB-TUO. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.
- [8] *Hydrotechnik.com* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.hydrotechnik.com/>
- [9] Argo-Hytos, *Firemní dokumentace* [online]. [cit. 2018-04-2]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/12388388-Pr12-popis-konstrukce-a-funkce-hc-5103-12-98-s-linearnim-motorem-dn-06-pmax-25-mpa-qmax-32-dm-3-min-1-nahrazuje-hc-5103-6-98.html>
- [10] *Oemautomatic.cz* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.oemautomatic.cz/Products/Tlak_a_prutok/Ventily/Proporcionalni_ventily/Pro_rizeni_tlaku/Asco_Vseobecne_informace_o_proporcionalnich_ventilech/2350523-310929.html

- [11] FITCH, E.C. a I.T. HONG. *Hydraulic system modeling and simulation*. Stillwater, Okla: BarDyne, 2001.
- [12] *hydraforce.com* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:
http://www.hydraforce.com/svtraining/files/sdjskjf_Chap8.pdf
- [13] MATLAB SimHydraulics, [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z:
<https://www.mathworks.com/help/>
- [14] Bosch Rexroth, *Firemní dokumentace* [online]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z:
https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re29055_2005-10.pdf?db=brmv2&lvid=1097266&mvid=13366&clid=20&sid=DAE6330B50303D45AC982ACC04661403.borex-tc&sch=M&id=13366,20,1097266

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Adamovi Burečkovi, Ph.D. za jeho odborné rady, informace a vedení při zpracování této diplomové práce. Také děkuji svým blízkým za jejich podporu při studiu.

Tato práce byla podpořena v rámci projektu SGS „Modelování a experimentální ověření dynamických jevů v tekutinových a vakuových systémech“ SP2018/157.

Přílohy

Příloha A

Příloha obsahuje tabulku naměřených a vypočtených hodnot pro stanovení frekvenčních charakteristik.

Tab. 1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stanovení frekvenční charakteristiky

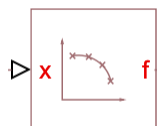
f	A_0	A	Δt	A/A_0	L	φ
[Hz]	[mm]	[mm]	[s]	[-]	[dB]	[°]
1	0,145	0,145	0	1	0	0
2	0,145	0,1421	0,003	0,98	-0,1755	2,16
3	0,145	0,14	0,003	0,96552	-0,3048	3,24
4	0,145	0,142	0,003	0,97931	-0,1816	4,32
5	0,145	0,142	0,003	0,97931	-0,1816	5,4
6	0,145	0,142	0,003	0,97931	-0,1816	6,48
7	0,145	0,1385	0,003	0,95517	-0,3984	7,56
8	0,145	0,1363	0,0035	0,94	-0,5374	10,08
9	0,145	0,1363	0,003	0,94	-0,5374	9,72
10	0,145	0,138	0,003	0,95172	-0,4298	10,8
12	0,145	0,136	0,003	0,93793	-0,5566	12,96
14	0,145	0,135	0,003	0,93103	-0,6207	15,12
16	0,145	0,135	0,003	0,93103	-0,6207	17,28
18	0,145	0,135	0,003	0,93103	-0,6207	19,44
20	0,145	0,133	0,003	0,91724	-0,7503	21,6
25	0,145	0,135	0,003	0,93103	-0,6207	27
30	0,145	0,133	0,0025	0,91724	-0,7503	27
35	0,145	0,13	0,0025	0,89655	-0,9485	31,5
40	0,145	0,1218	0,0025	0,84	-1,5144	36
55	0,1421	0,116	0,002	0,816327	-1,76272	39,6
80	0,11095	0,0928	0,002	0,83638	-1,5519	57,6

Příloha B

Příloha obsahuje popis ostatních použitých bloků v matematické modelu, včetně jejich nastavení.

Změna signálu

Blok změna signálu (*PS Lookup Table*), viz obr. 1, představuje měnič signálu, jehož vztah vstup-výstup je specifikován vyhledávací tabulkou [13]. V obvodu byl použit tento blok pro dvě změny signálu. V tab. 2 a tab. 3 jsou uvedené hodnoty tabulek pro změnu signálu.



Obr. 1 Blok změny signálu

Tab. 2 Nastavené hodnoty tabulek pro změnu napětí na polohu šoupátka

Napětí U	[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]	[V]
Poloha šoupátka s	[0, 0.058, 0.116, 0.174, 0.232, 0.29, 0.348, 0.406, 0.464, 0.522, 0.58]	[mm]

Tab. 3 Nastavené hodnoty tabulek pro změnu polohy šoupátka na sílu elektromagnetu

Poloha šoupátka s	[0, 0.058, 0.116, 0.174, 0.232, 0.29, 0.348, 0.406, 0.464, 0.522, 0.58]	[mm]
Síla F	[31.45, 62.85, 94.25, 125.65, 157.05, 188.45, 219.85, 251.25, 282.62, 314.05]	[N]

Pojistný ventil

Blok pojistný ventil (*Pressure Relief Valve*), viz obr. 2, představuje model hydraulického pojistného ventilu. V bloku lze nastavit tlak při kterém se ventil otevře, maximální průtočnou plochu ventilu a rozsah tlakové regulace ventilu. Blok obsahuje vstupní port A a výstupní port B [13]. V tab. 4 jsou uvedené hodnoty nastavení bloku. Nastavení pojistného tlaku bylo pro simulování statických a dynamických charakteristik různé.



Obr. 2 Blok pojistného ventilu

Tab. 4 Nastavené hodnoty bloku pojistného ventilu

Pojistný tlak	10e6, 5e6	[Pa]
Rozsah tlakové regulace	3e5	[Pa]
Maximální průtočná plocha	1e-4	[m ²]

Clona s proměnným průřezem

Blok clona s proměnným průřezem (*Variable orifice*), viz obr. 3, představuje v obvodu model dvoucestného kulového ventilu. Model byl nastavený pomocí maximální plochy a otevření. V bloku lze dále nastavit průtokový součinitel, počáteční otevření a plochu pro průtokové ztráty [13]. V tab. 5 jsou uvedené hodnoty nastavení bloku.



Obr. 3 Blok clony s proměnným průřezem

Tab. 5 Nastavené hodnoty bloku clony s proměnným průřezem

Maximální plocha	1,13e-4	[m ²]
Maximální otevření	0,01	[m]
Průtokový součinitel	0,85	[-]
Počáteční otevření	0	[m]
Plocha průtokových ztrát	0	[m ²]

Clona s konstantním průřezem

Blok clona s konstantním průřezem (*Constant Area Hydraulic Orifice*), viz obr. 4, představuje prvek, který v obvodu zohledňuje prvky, které jsme v modelu nezahrnuli. V bloku lze nastavit plochu průřezu clony a průtokový součinitel [13]. V tab. 6 jsou uvedené hodnoty nastavení bloku.



Obr. 4 Blok clony s konstantním průřezem

Tab. 6 Nastavené hodnoty bloku clony s konstantním průřezem

Plocha průřezu	9e-6	[m ²]
Průtokový součinitel	0,7	[-]

Tlumení

Blok tlumení (*Translational Damper*), viz obr. 5, představuje třecí sílu působící na šoupátko rozváděče. V bloku se nastavuje hodnota koeficientu viskózního tlumení [13]. Tento model je popsán rovnicí 4.4.



Obr. 5 Blok tlumení

Pružina

Blok pružina (*Translational Spring*), viz obr. 6, představuje pružinu, která působí silou na šoupátko rozváděče. V bloku se nastavuje tuhost pružiny [13]. Tento model je popsán rovnicí 4.2.



Obr. 6 Blok pružiny

Mechanický doraz

Blok mechanický doraz (*Mechanical translational hard stop*), viz obr. 7, představuje mechanický translační tvrdý doraz, který omezuje pohyb šoupátka mezi horní a dolní hranicí. Zastavení je realizováno jako pružina [13]. V tab. 7 jsou uvedené hodnoty nastavení bloku.



Obr. 7 Blok mechanického dorazu

Tab. 7 Nastavené hodnoty bloku mechanického dorazu

Horní hranice	0,58	[mm]
Dolní hranice	-0,58	[mm]
Tuhost v horní hranici	1e6	[N·m ⁻¹]
Tuhost v dolní hranici	1e6	[N·m ⁻¹]
Tlumení v horní hranici	150	[N·m ⁻¹ ·s]
Tlumení v dolní hranici	150	[N·m ⁻¹ ·s]

Hmotná zátěž

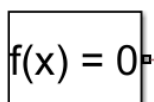
Blok hmotná zátěž (*Mass*), viz obr. 8, představuje hmotnost šoupátka rozváděče. Blok obsahuje jeden translační port. Kladný směr bloku je dán od portu k referenční bodu [13].



Obr. 8 Blok hmotné zátěže

Výpočtová konfigurace

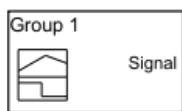
Blok výpočtová konfigurace (*Solver Configuration*), viz obr. 9, specifikuje parametry řešitele, které model potřebuje ke spuštění simulace [13].



Obr. 9 Blok výpočtové konfigurace

Signál

Blok signál (*Signal Builder*), viz obr. 10, umožňuje vytvářet skupiny signálních zdrojů a používat je v matematickém modelu [13].



Obr. 10 Blok signálu

Převodník PS-S

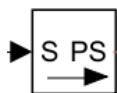
Blok převodník PS-S (*PS-Simulink Converter*), viz obr. 11, převádí vstupní fyzikální signál na bezrozměrný výstupní signál Simulinku. V bloku se nastavuje jednotka vstupního fyzikálního signálu [13].



Obr. 11 Blok PS-S převodníku

Převodník S-PS

Blok převodník S-PS (*Simulink-PS Converter*), viz obr. 12, převádí vstupní bezrozměrný signál Simulinku na výstupní fyzikální signál. V bloku se nastavuje jednotka vstupního fyzikálního signálu [13].



Obr. 12 Blok S-PS převodníku

Displej

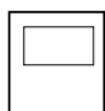
Blok displej (*Display*), viz obr. 13, zobrazuje aktuální hodnotu výstupního signálu. V tomto bloku se nenastavuje žádná hodnota [13].



Obr. 13 Blok displeje

Graf

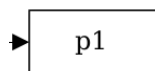
Blok graf (*Scope*), viz obr. 14, vykresluje grafickou závislost zobrazované veličiny v čase. V tomto bloku se nenastavuje žádná hodnota [13].



Obr. 14 Blok grafu

Zapisování dat

Blok zapisování dat (*To Workspace*), viz obr. 15, slouží k zapisování dat měřených veličin do pracovního prostoru Matlab, odkud data lze dále kopírovat. V bloku se nastavuje časový krok pro zapisování dat a název pod kterým lze data následně najít v pracovním prostoru Matlabu [13].



Obr. 15 Blok zapisování dat

Nádrž

Blok nádrž (*Hydraulic reference*), viz obr. 16, slouží k propojení do atmosféry. K bloku lze připojit prvky, které je potřeba propojit s atmosférou. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 16 Blok nádrže

Referenční bod

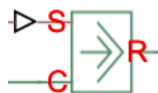
Blok referenční bod (*Mechanical Translation Reference*), viz obr. 17, představuje uzemnění. Blok se připojuje k mechanickým translačním portům, které jsou pevně připojené k zemi nebo k rámu. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 17 Blok referenčního bodu

Zdroj síly

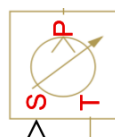
Blok zdroj síly (*Ideal Force Source*), viz obr. 18, představuje ideální zdroj síly. Síla je úměrná vstupnímu fyzickému signálu. Blok obsahuje mechanické translační porty R a C. Řídicí signál je připojen pomocí portu S. Pozitivní signál na portu S generuje sílu působící ve směru od portu C k portu R. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 18 Blok zdroje síly

Zdroj průtoku

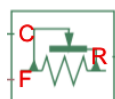
Blok zdroj průtoku (*Hydraulic Flow Rate Source*), viz obr. 19, představuje ideální zdroj hydraulické energie dostatečné k udržení specifikovaného průtoku na svém výstupu bez ohledu na tlakový spád. Blok obsahuje porty T a P, které odpovídají vstupním a výstupním portům hydrauliky. Fyzický signál, kterému je přímo úměrný průtok zdrojem, je připojen pomocí portu S. Kladný směr bloku je od portu T k portu P. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 19 Blok zdroje průtoku

Senzor síly

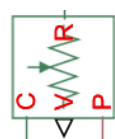
Blok senzor síly (*Ideal Force Sensor*), viz obr. 20, představuje ideální snímač síly. Snímač je ideální, protože nezohledňuje setrvačnost, tření, zpoždění, spotřebu energie atd. Blok obsahuje mechanické translační porty C a R, které spojují snímač s vedením, kde je síla sledována. Výsledek měření je vyveden pomocí fyzického signálového portu F. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 20 Blok senzoru síly

Senzor pohybu

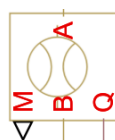
Blok senzor pohybu (*Ideal Translational Motion Sensor*), viz obr. 21, představuje ideální snímač pohybu. Snímač je ideální, protože nezohledňuje setrvačnost, tření, zpoždění, spotřebu energie atd. Blok obsahuje mechanické translační porty C a R. Dále obsahuje porty V a P, které jsou fyzikální výstupní porty pro rychlost a polohu. V bloku se nastavuje hodnota výchozí polohy, která je v tomto případě nulová [13].



Obr. 21 Blok senzoru pohybu

Průtokoměr

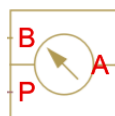
Blok průtokoměr (*Hydraulic Flow Rate Sensor*), viz obr. 22, představuje ideální snímač průtoku. Snímač je ideální, protože nezohledňuje setrvačnost, tření, zpoždění, spotřebu energie atd. Na snímači nedochází k žádné změně tlaku. Kladný směr průtoku snímačem je od portu A k portu B. Výstupy fyzického signálu Q a M udávají hmotnostní a objemový průtok. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 22 Blok průtokoměru

Snímač tlaku

Blok snímač tlaku (*Hydraulic Pressure Sensor*), viz obr. 23, představuje ideální snímač tlaku nebo tlakového spádu mezi dvěma body. Blok obsahuje připojovací porty A, B a signální port S. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 23 Blok snímače tlaku

Hydraulická zátka

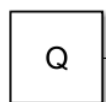
Blok hydraulická zátka (*Hydraulic Cap*), viz obr. 24, představuje prvek, pomocí kterého se uzavře hydraulický obvod. Připojením k hydraulickým přípojkům jiných bloků neumožní průtok. V bloku se nenastavují žádné hodnoty [13].



Obr. 24 Blok hydraulické zátky

Konstanta

Blok konstanta (*Constant*), viz obr. 25, slouží k zadávání konstantních hodnot [13].



Obr. 25 Blok konstanty