



# Model jednoduchého hydraulického obvodu s rotačním motorem v prostředí SimScape

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jakub Bláha**  
*Vedoucí práce:* Ing. Martin Lachman, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Bláha**  
Osobní číslo: **S12000021**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Model jednoduchého hydraulického obvodu s rotačním motorem v prostředí SimScape**  
Zadávající katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je vytvoření simulačního schématu jednoduchého hydraulického obvodu v toolboxu Matlabu - SimScape.

1. Seznámení se s toolboxem Matlabu - SimScape.
2. Vytvoření simulačního schématu v Simscape z dostupné dokumentace hydromotoru a použitých prvků v hydraulickém obvodu.
3. Ověřit výsledky simulací v laboratoři KSA.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] CERHA, J. *Hydraulické a pneumatické mechanismy I.* 2. vydání. Liberec: TU v Liberci, 2010. ISBN 80-7372-560-0.  
[2] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů.* Ostrava: MONTANEX a.s., 1999. ISBN 80-7225-030-2.  
[3] NEPRAŽ, F., J. NEVRLÝ a další. *Modelování systémů s hydraulickými mechanismy.* Brno: Bosch Rexroth, spol s.r.o., 2002. ISBN 80-214-2187-8.  
[4] DUŠEK, F. *Matlab a Simulink úvod do používání.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2000. ISBN 80-7194-273-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Lachman, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. února 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 7 7 2016

Podpis: Blaha

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mě podporovali při tvorbě mé bakalářské práce. Především panu Ing. Martinu Lachmanovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za cenné rady, předmětné připomínky a trpělivost. Rád bych chtěl poděkovat i své rodině za podporu a trpělivost, která mi byla poskytována během celého studia. Dále bych také chtěl poděkovat své partnerce Kristýně Langové za konečnou korekturu této práce.

## **Model jednoduchého hydraulického obvodu s rotačním motorem v prostředí SimScape**

### **ANOTACE:**

Bakalářská práce se zabývá tvorbou jednoduchého hydraulického obvodu s rotačním motorem v prostředí SimScape. Práce shrnuje základní poznatky o hydraulických prvcích v obvodu. V rámci této práce je seznámení se s toolboxem SimScape. Následně je popsán rozdíl mezi prostředím SimScape a Simulink. V teoretické části jsou popsány použité hydraulické prvky v obvodu. Práce se zaměřuje na řízení rychlosti hydromotoru metodou škrcení pomocí proporcionálního rozvaděče. Poté byla provedena simulace v prostředí SimScape a vysvětlena tvorba tohoto modelu. Měření probíhalo v laboratořích katedry KSA a mělo za úkol vytvořit průtokovou charakteristiku pro různé zátěže, které byly zvoleny. Na závěr bylo porovnáno měření z laboratoře s výsledky simulací.

**Klíčová slova:** hydraulický obvod, Matlab, SimScape, simulační schéma, hydromotor, proporcionální rozvaděč

## **The Model of a simple hydraulic circuit with a rotary motor in environment Matlab - SimScape**

### **ANNOTATION:**

This thesis aims to create a simple hydraulic circuit with rotary motor in environment of SimScape. Thesis includes basic knowledge about hydraulic elements in circuit. Consequently, there is written difference between SimScape and Simulink. In theoretical part there are described used hydraulic elements in circuit. Thesis aims on controlling velocity of hydraulic motor by throttling method with a proportional distribution panel. Then simulation in SimScape environment was made and was explained creation of this model. Measurements were carried out in laboratory of department KSA and also the measurements had the task to create flow characteristic for various types of stress which were chosen. In conclusion were compared measurements from laboratory with results of simulation.

**Key words:** hydraulic circuit, Matlab, SimScape, simulation scheme, hydraulic motor, proportional distribution panel

Počet stran:	66
Počet obrázků:	35
Počet tabulek:	17
Počet grafů:	10
Počet příloh:	5

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek a grafů .....	9
Seznam termínů a zkratk .....	10
Použité symboly .....	11
1 Úvod.....	13
2 Cíle práce .....	13
3 MATLAB - SimScape .....	14
3.1 Kdy MATLAB používáme? .....	14
3.2 Tvorba simulačního modelu .....	15
3.3 Prostředí SimScape a Simulink.....	16
4 Hydraulický obvod .....	22
4.1 Průtoková charakteristika .....	22
4.2 Proporcionální prvky .....	23
4.2.1 Proporcionální rozvaděče .....	23
4.3 Hydromotory.....	28
4.3.1 Statické charakteristiky rotačních převodníků.....	29
4.3.2 Popis funkce hydromotoru Mrak 5 .....	30
4.3.3 Řízení rychlosti motorů .....	31
4.4 Řízení rychlosti škrcením proporcionálními rozvaděči .....	31
5 Simulování v toolboxu SimScape.....	33
5.1 Tvorba Simulačního schéma rozvaděče v SimScapu .....	33
5.2 Simulační schéma proporcionálního rozvaděče, hydromotoru a zátěže. 38	
6 Měření.....	44
7 Porovnání výsledků.....	57
8 Závěr .....	59
9 Použitá literatura .....	60
Seznam příloh.....	62
Přílohy .....	63

## Seznam obrázků

obr. 1 - Schéma systému pružiny s tlumičem .....	16
obr. 2 - Schéma systému pružiny s tlumičem v Simulinku .....	18
obr. 3 - Schéma systému pružiny s tlumičem v SimScapu .....	18
obr. 4 - Zadání tlumícího koeficientu .....	19
obr. 5 - Zadání tuhosti pružiny.....	19
obr. 6 - Zadání hmotnosti závaží .....	20
obr. 7 - Porovnání polohy a rychlosti v závislosti na čase v SimScapu a Simulinku .....	21
obr. 8 - Průtoková charakteristika proporcionálního rozvaděče .....	22
obr. 9 - Proporcionální rozvaděč PRM7-063Z11/30-24E04S01 .....	24
obr. 10 - Řady proporcionálních rozvaděčů typu PRM .....	24
obr. 11 - Schematická značka v SimScapu .....	26
obr. 12 - Hydraulická schematická značka .....	26
obr. 13 - Hydromotor Mrak 5 .....	28
obr. 14 - Základní parametry hydromotoru Mrak 5 .....	30
obr. 15 – Schéma zapojení .....	31
obr. 16 - Knihovna bloků SimScape – Simhydraulics .....	33
obr. 17 - Uživatelské prostředí.....	34
obr. 18 - Nastavení proporcionálního rozvaděče .....	35
obr. 19 - Nastavení zdroje tlaku.....	35
obr. 20 - nastavení polohy šoupátka v proporcionálním rozvaděči .....	36
obr. 21 - Nastavení hydraulické kapaliny .....	36
obr. 22 - Hotové schéma proporcionálního rozvaděče .....	37
obr. 23 - Označení tlaků.....	37
obr. 24 - Schéma hydromotoru se zátěží.....	39
obr. 25 - Ukázka zadávání hodnot do Matlabu .....	44
obr. 26 - BD sensor DMP 333 .....	45
obr. 27 - BD sensor DMP 331 .....	45
obr. 28 - Tlakové sensory připojeny k rozvaděči.....	45
obr. 29 - Průtokový snímač Kracht-VC0,4 F1 PS H-03 .....	46
obr. 30 - Měřicí stanoviště .....	46
obr. 31 - schéma zapojení hydraulického obvodu .....	47
obr. 32 - Proporcionální rozvaděč Argo-Hytos .....	49



obr. 33 - Hydromotor Mrak-5 .....	49
obr. 34 - Spojka Rotex GS 28 .....	50
obr. 35 - Servomotor .....	50

## Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 - Základní parametry proporcionálního rozvaděče PRM7 .....	25
Tabulka 2 - Použité veličiny .....	32
Tabulka 3 - Koeficienty pro nastavení bloku hydromotoru.....	39
Tabulka 4 - Moment setrvačnosti motoru a servomotoru.....	40
Tabulka 5 - Koeficienty pro nastavení tlumiče a pružiny.....	40
Tabulka 6 - Nasimulované hodnoty pro nulovou zátěž .....	40
Tabulka 7 - Nasimulované hodnoty pro zátěž 10 [Nm] a pro zdroj tlaku 100 [bar] .....	41
Tabulka 8 - Nasimulované hodnoty pro zátěž 20 [Nm] a pro zdroj tlaku 100 [bar] .....	42
Tabulka 9 - Výkonové omezení zdroje.....	48
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro nulovou zátěž a zdroj tlaku 100 [bar] .....	51
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty pro nulovou zátěž a proměnný tlak zdroje.....	51
Tabulka 12 - Vypočtené hodnoty pro nulovou zátěž a tlak 100 [bar] .....	53
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty se zátěží 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar] .....	53
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty se zátěží 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar] .....	54
Tabulka 15 - Vypočtené hodnoty pro zátěž 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar].....	55
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty se zátěží 20 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar] .....	55
Tabulka 17 - Vypočtené hodnoty pro zátěž 20 [Nm] a zdroj tlaku 10 [bar].....	56
Graf 1 - Průtoková charakteristika proporcionálního rozvaděče .....	38
Graf 2 - Nasimulovaná průtoková charakteristika.....	41
Graf 3 - Závislost otáček na procentuálním otevření pro zátěž 10 [Nm] .....	42
Graf 4 - Závislost otáček na procentuálním otevření pro zátěž 20 [Nm] .....	43
Graf 5 - Průtoková charakteristika pro nulovou zátěž a zdroj tlaku 100 [bar] .....	51
Graf 6 - Závislost otáček na procentuálním otevření rozvaděče .....	54
Graf 7 - Závislost otáček na procentuálním otevření rozvaděče .....	56
Graf 8 - Porovnání simulace a měření pro nulovou zátěž.....	57
Graf 9 - Porovnání simulace a měření pro zátěž 10 [Nm] .....	57
Graf 10 - Porovnání simulace a měření pro zátěž 20 [Nm] .....	58

## **Seznam termínů a zkratk**

AC	Alternating Current
Argo-Hytos	ARGO - HYTOS s.r.o.
BD sensor	BD SENSORS s.r.o.
DMP 331	označení sensoru
EISPACK	matematická knihovna
ISO	International Organization for Standardization
Kracht	Kracht GmbH
KSA	katedra výrobních systémů a automatizace
LINPACK	matematická knihovna
Matlab	matematický program firmy The MathWorks, Inc.
MathCad	matematický program firmy PTC, Inc.
Mrak 5	hydromotor
PRM7	označení proporcionálního rozvaděče
Rotex GS 28	spojka
Simhydraulics	knihovna komponentů
SimScape	toolbox Simulinku
Simulink	grafické programovací prostředí pro modelování
UNIX	operační systém
VG 32	označení hydraulické kapaliny
Yaskawa	Yaskawa Electric Corporation

## Použité symboly

$F_{PR}$  [N] – síla pružiny

$F_{TL}$  [N] – síla tlumiče

$k_P$  [N/m] – tuhost pružiny

$k_T$  [N/(m/s)] – koeficient tlumení

$M_t$  [N.m] – teoretický zátěžový moment

$n_{max}$  [ot. min<sup>-1</sup>] – jmenovité otáčky hydromotoru

$p_1$  [bar] – tlak na vstupu

$p_2$  [bar] – tlak na výstupu

$p_A$  [bar] – tlak ve vedení A

$p_B$  [bar] – tlak ve vedení B

$p_m$  [bar] – tlakový spád hydromotoru

$p_n$  [bar] – jmenovitý tlak hydromotoru

$p_p$  [bar] – zdroj tlaku

$p_T$  [bar] – tlak ve vedení T

$Q_0$  [dm<sup>3</sup>/min] – teoretický průtok

$Q_m$  [dm<sup>3</sup>/min] – průtok hydromotoru

$u_{(t)}$  [-] – jednotkový skok

$v_{(t)}$  [m/s] – rychlost

$V_0$  [cm<sup>3</sup>] – geometrický pracovní objem

$x_{(t)}$  [mm] – výchylka

$\eta_c$  [-] – celková účinnost hydromotoru

$\eta_{hm}$  [-] – hydromechanická účinnost hydromotoru

$\eta_v$  [-] – objemová účinnost hydromotoru

$\Delta p$  [bar] – rozdíl tlaků

$g$  [ms<sup>-2</sup>] – gravitační zrychlení

$J$  [kg.m<sup>2</sup>] – moment setrvačnosti

$M$  [N. m] – zátěžový moment hydromotoru

$m$  [kg] – hmotnost

$n$  [ot/min] – otáčky hydromotoru

$X$  [%] – procentuální otevření šoupátka

$x$  [mm] – poloha šoupátka

$\nu$  [mm<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>] – kinematická viskozita hydraulické kapaliny

$\rho$  [kg. m<sup>-3</sup>] – hustota hydraulické kapaliny

# 1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá vytvořením simulačního schéma v toolboxu SimScape. V tomto případě se jedná o měření tlakového spádu v závislosti na průtočném množství pracovního média a na procentuálním otevření šoupátka  $\Delta p - Q$  charakteristika. Pro tento případ jsme vytvořili dva simulační modely. První má za úkol otestovat funkci proporcionálního rozvaděče „naprázdno“, tzn., že rozvaděč není zatížen. Ve druhém schématu jsme vytvořili hydraulický obvod, který je zatížen určitým krouticím momentem, který vytváří elektromotor působící v opačném směru vůči hydromotoru. Jako simulační program byl použit program Matlab - SimScape. SimScape je rozšiřující toolbox Matlabu, jedná se o grafické programovací prostředí pro vytváření dynamických modelů za použití bloků.

Tato práce zkoumá hydraulický obvod, který byl sestaven ve fyzické podobě v laboratořích spadající pod katedru KSA. Mezi nejdůležitějšími částmi obvodu patří proporcionální rozvaděč, hydromotor a zdroj tlakové kapaliny. Tyto prvky mají největší vliv na průtokovou charakteristiku. Pro lepší pochopení této problematiky, jsou tyto části podrobně popsány v této práci. Nejdůležitější je ovládání hydromotoru pomocí proporcionálního rozvaděče. V našem případě byla použita metoda řízení rychlosti škrcením proporcionálním rozvaděčem.

## 2 Cíle práce

Cílem této práce je vytvořit simulační schéma. Naučit se používat bloky v grafickém editoru a doplnit jejich parametry, které definují tyto bloky. Následně vytvořit simulační schéma, které popisuje hydraulický obvod. K tomu bylo zapotřebí odečtení všech potřebných hodnot z katalogů výrobců, veškerých použitých prvků v hydraulickém obvodu a hydromotoru. Poté bylo zapotřebí provést měření v laboratořích katedry KSA a ověřit výsledné měření, porovnáním naměřených hodnot se simulací a s katalogovými listy výrobců. Tímto se prověřila správnost zapojení systému.

## 3 MATLAB - SimScape

Název Matlab byl odvozen z anglického spojení *matrix laboratory*. Matlab byl vytvořen, aby poskytoval přístup k matematickým knihovnám, které vznikaly v projektech LINPACK a EISPACK. Původně byl vyvinut pro operační systém UNIX a to ovlivnilo uživatelské prostředí. Dodnes se používá jako komunikační rozhraní příkazový řádek pro zadávání vstupních veličin. [2]

*„Matlab je vysoce výkonný jazyk pro technické výpočty. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoduše použitelného prostředí, kde problémy i řešení jsou vyjádřeny v přirozeném tvaru“.* [Dušek, 2000, s. 9]

Typické oblasti použití:

- inženýrské výpočty
- vývoj algoritmů
- modelování, simulace a vývoj prototypů
- analýza dat a jejich vizualizace
- inženýrská grafika
- vývoj aplikací [2]

### 3.1 Kdy MATLAB používáme?

Oproti konkurenčním produktům je spíše programovacím jazykem. Nemá tolik předpřipravených funkcí jako např. Mathematica, nemá integrované vlastnosti jako např. MathCad. Ale to neznamená, že je o tyto funkce ochuzen, protože obsahuje 500 jednoduchých i složitějších funkcí a lze z nich vytvářet vysoce efektivní a robustní algoritmy, které jsou součástí jádra. Z těchto funkcí lze podle aplikace vytvořit libovolně složité funkce. Skupiny takových funkcí k řešení určitého okruhu problémů se v MATLABu jmenují Toolboxy. [2]

MATLAB má samostatnou nadstavbu, která se jmenuje SIMULINK. Slouží k řešení nelineárních diferenciálních rovnic s grafickým zadáváním. Uživatelské rozhraní může připomínat zapojení na analogovém počítači. Umožňuje sledovat graficky veličiny v jakémkoliv místě zapojení. Používá se k simulaci dynamického chování sledovaného systému. [2]

MATLAB používáme tedy v případě, pokud potřebujeme vypočítat robustní výpočty, zpracovávat rozsáhle datové soubory, pracovat s velkými maticemi, nebo kdy se dá problém převést na vektorové či maticové operace. Není vhodné ho využívat pro opakující se stejné výpočty nebo opakovaně zpracovávat velké objemy dat. Rozhodující je rychlost výpočtu a ne vývoj algoritmu. [2]

### 3.2 Tvorba simulačního modelu

Modelování představuje experimentální proces, u kterého se snažíme jednoznačně popsat skutečnou součást pomocí matematického modelu podle určitých kritérií. Originální objekt nemusí být jen fyzický model, ale může být také abstraktní, nebo matematický. Matematický model neumožňuje provádět experimenty stejné jako ve skutečnosti, ale umožňuje zkoumat jevy probíhající na originále pomocí matematického popisu. Při vytváření matematického modelu vycházíme z vymezení zkoumaného jevu a definice systému na reálném objektu. Můžeme sledovat průběhy fyzikálních veličin. Samotný matematický model je nedostačující pro vyhodnocení zkoumaného děje. Řešení za nás provádí číslicové počítače ve vhodných simulačních programech. V příslušném simulačním programu vytvoříme simulační model, který představuje odvozený matematický model. Může být znázorněn pomocí grafického schéma, který představuje strukturu simulačního modelu u blokově orientovaných simulačních programů s grafickým vstupem, nebo pomocí příkazových řádků příslušného simulačního programu popisující matematický model. [3]

Způsoby modelování rozdělujeme podle podobnosti a analogie:

- fyzikální podobnost
- matematická podobnost
- kybernetická podobnost[3]

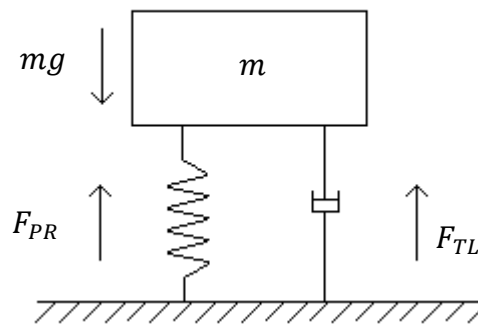
Při tvorbě matematického modelu definujeme systém zkoumaného objektu. Při definici systému musí být zajištěno, aby výstupy neovlivňovaly vstupy. Změnou vstupních parametrů můžeme analyzovat zkoumaný jev a získávat poznatky o vlastnostech. Následně ověříme správnost modelu, analýzu získaných výsledků a jejich následné využití. [3]



### 3.3 Prostředí SimScape a Simulink

SimScape je rozšiřující toolbox Simulinku s nástroji pro modelování a simulování fyzického systému, jako například mechanickými, hydraulickými, pneumatickými, tepelnými a elektrickými prvky. Na rozdíl od bloků v Simulinku, který reprezentují matematické operace nebo operace se signály, bloky v SimScapu reprezentují fyzické prvky nebo přímo vztah. Lze s ním vytvořit model systému, stejně jako bychom chtěli vytvořit fyzický systém. [16]

Na následujícím mechanickém systému (viz obrázek č. 1) jsou demonstrovány přístupy tvorby blokového schématu ve zmíněných prostředích.



obr. 1 - Schéma systému pružiny s tlumičem

Uvolněním mechanického systému a s využitím druhého Newtonova zákona byla získána rovnice vyjádřená vztahem (1):

$$m \cdot \ddot{x} = u_{(t)} + m \cdot g - F_{PR} - F_{TL} \quad (1)$$

kde síla pružiny a tlumiče je vyjádřena vztahy:

$$F_{PR} = k_P \cdot x \quad (2)$$

$$F_{TR} = k_T \cdot \dot{x} \quad (3)$$

Následnými matematickými úpravami byla odvozena pohybová rovnice ve tvaru:

$$m \cdot \ddot{x} + k_T \cdot \dot{x} + k_P \cdot x - m \cdot g = u(t) \quad /: m \quad (4)$$

Tíha ( $m \cdot g$ ) chybí, protože se při montáži sama od sebe posune směrem dolů:

$$\ddot{x} = -\frac{k_T}{m} \dot{x} - \frac{k_P}{m} x + \frac{1}{m} u(t) \quad (5)$$

Počáteční podmínky pro polohu a rychlost:

$$x_{(t=0)} = 0 \text{ [mm]}$$

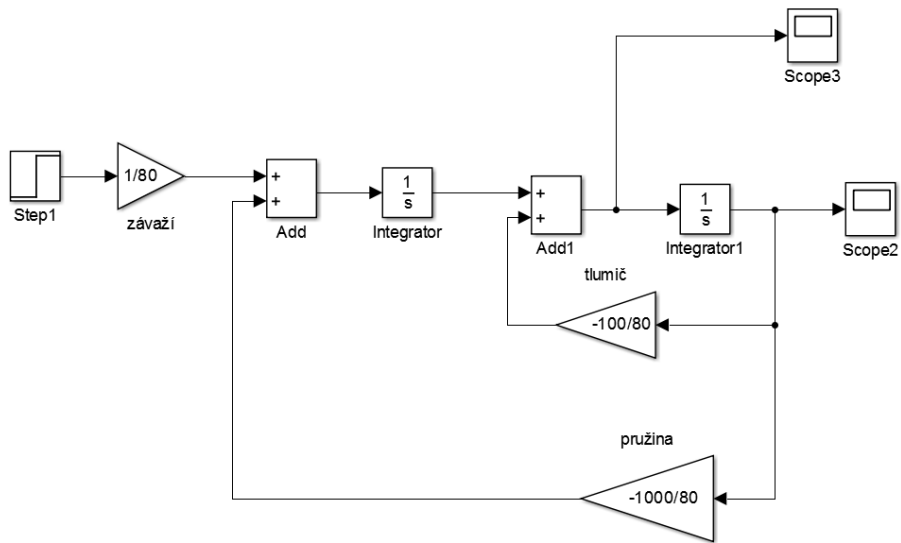
$$v_{(t=0)} = 0 \text{ [m/s]}$$

Jednotkový skok je konstantní a byl nastaven na hodnotu 1[-]:

$$u_{(t)} = 1 \text{ [-]}$$

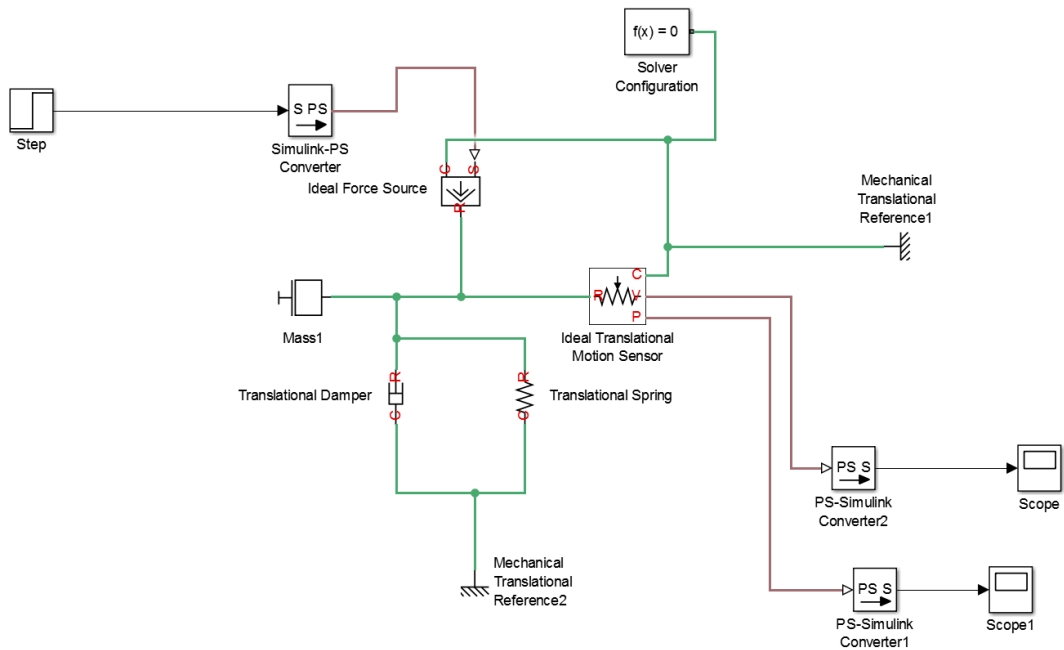
Na obrázcích č. 2 a č. 3 je vyobrazeno simulační schéma, které má v systému zátěž, pružinu a tlumič. Hmotnost zátěže byla v obou případech nastavena na stejnou hodnotu  $m = 80$  [kg], tlumicí koeficient byl nastaven na  $k_T = 100$  [N/(m/s)] a tuhost pružiny  $k_P = 1000$  [N/m].

Schéma, které je vyobrazeno na obrázku č. 2, je vytvořené metodou postupné integrace z rovnice č. 5 a následném dosazení potřebných koeficientů.



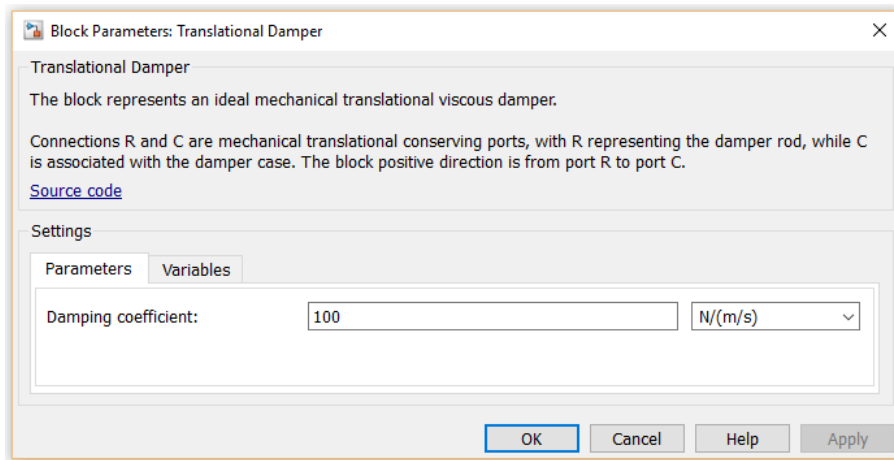
obr. 2 - Schéma systému pružiny s tlumičem v Simulinku

Na obrázku č. 3 je zobrazeno simulační schéma v prostředí SimScapu. Bloky představují konkrétní fyzické části mechanismu. Bloky byly nastaveny stejnými hodnotami, které byly použity v simulování v prostředí Simulink.



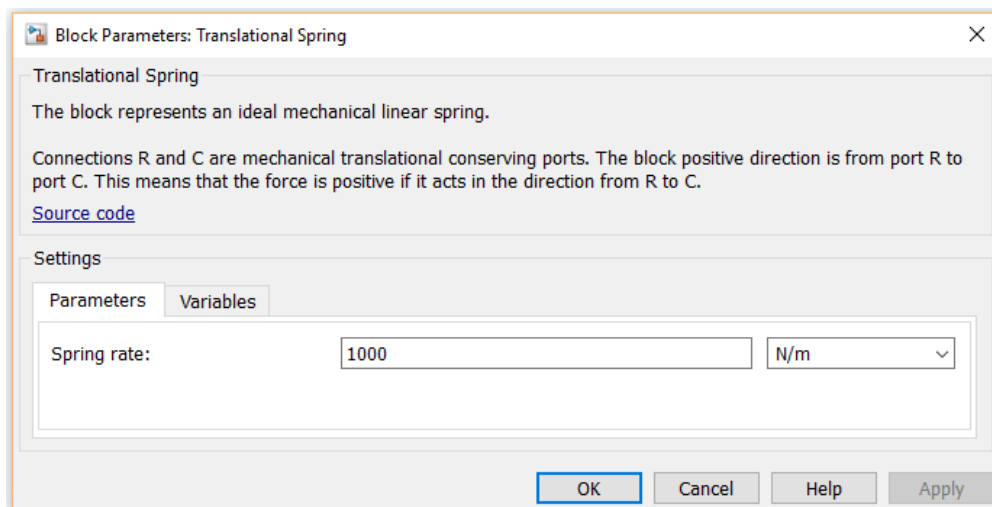
obr. 3 - Schéma systému pružiny s tlumičem v SimScapu

Tlumicí koeficient  $k_T$  byl doplněn do bloku Translational Damper (viz obrázek č. 4) a jeho hodnota je 100 [N/(m/s)].



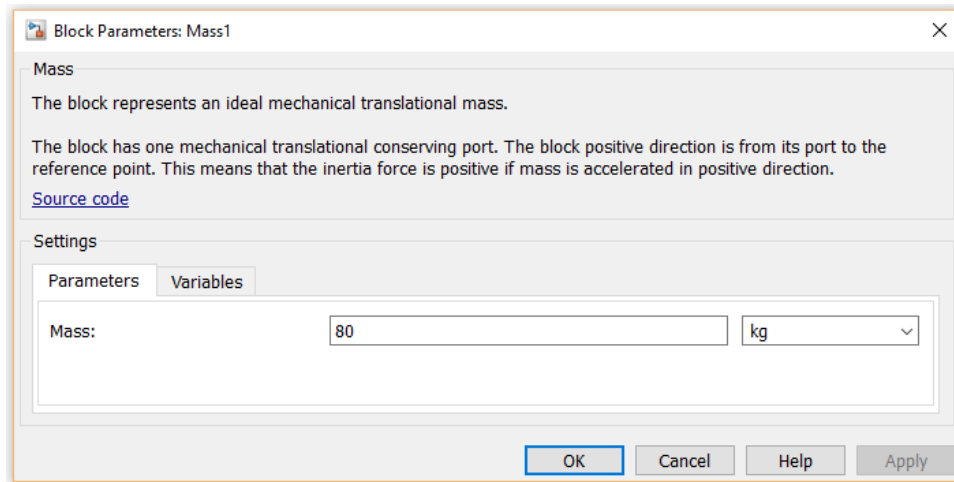
obr. 4 - Zadání tlumicího koeficientu

Tuhost pružiny  $k_P$  byla doplněna do bloku Translational Spring (viz obrázek č. 5) a jeho hodnota je 1000 [N/m].

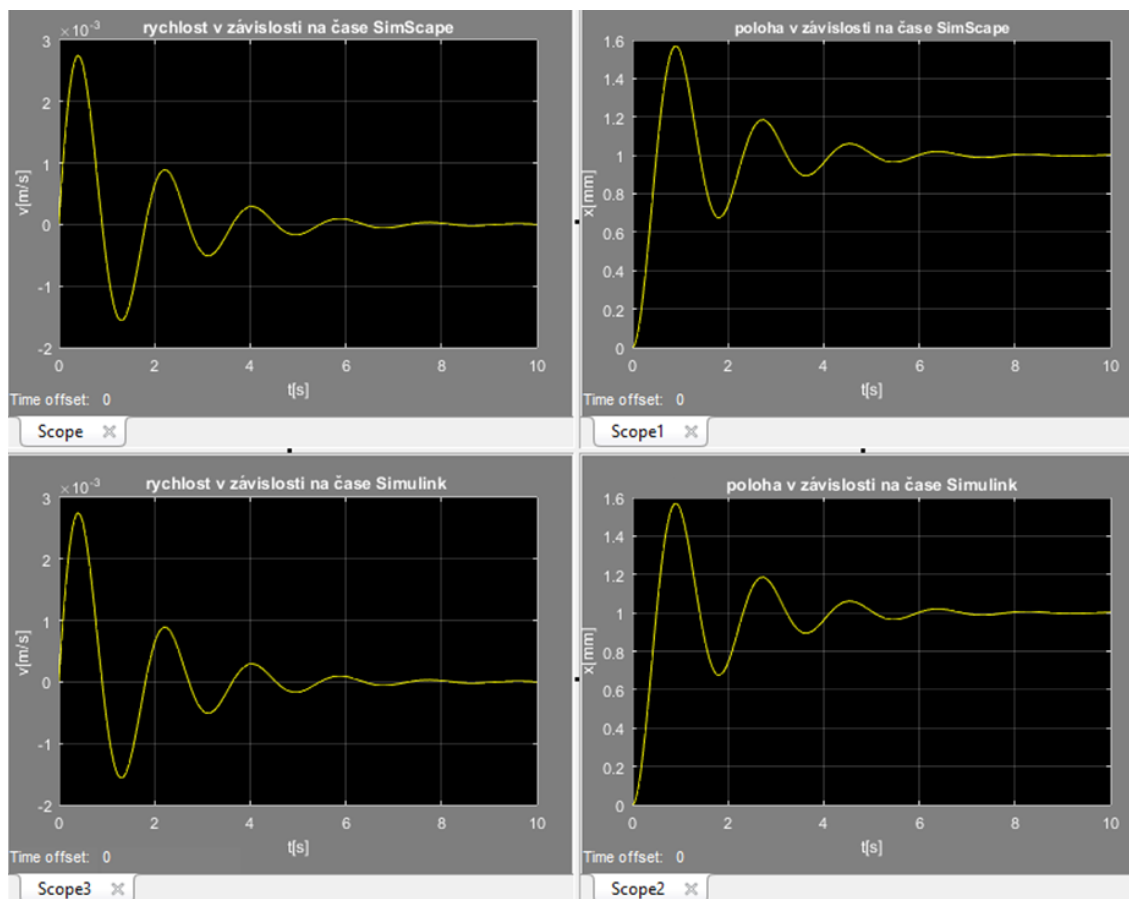


obr. 5 - Zadání tuhosti pružiny

Hmotnost závaží  $m$  byla pro tento případ zvolena 80 [kg] a zadání je zobrazeno na obrázku č. 6:



obr. 6 - Zadání hmotnosti závaží



obr. 7 - Porovnání polohy a rychlosti v závislosti na čase v SimScape a Simulinku

Na obrázku č. 7 je zobrazen výpis čtyř grafů. Z toho se jedná o dva grafy pocházející z prostředí Simulink (napravo) a dva grafy z prostředí SimScape (nalevo). Z těchto grafů lze poznat, že průběh rychlosti a průběh zrychlení jsou totožné. Průběh rychlosti v Simulinku se překryje s průběhem v SimScape a vznikne pouze jedna křivka. To samé platí u průběhu zrychlení. Z toho plyne, že u obou metod dosáhneme stejného výsledku.

## 4 Hydraulický obvod

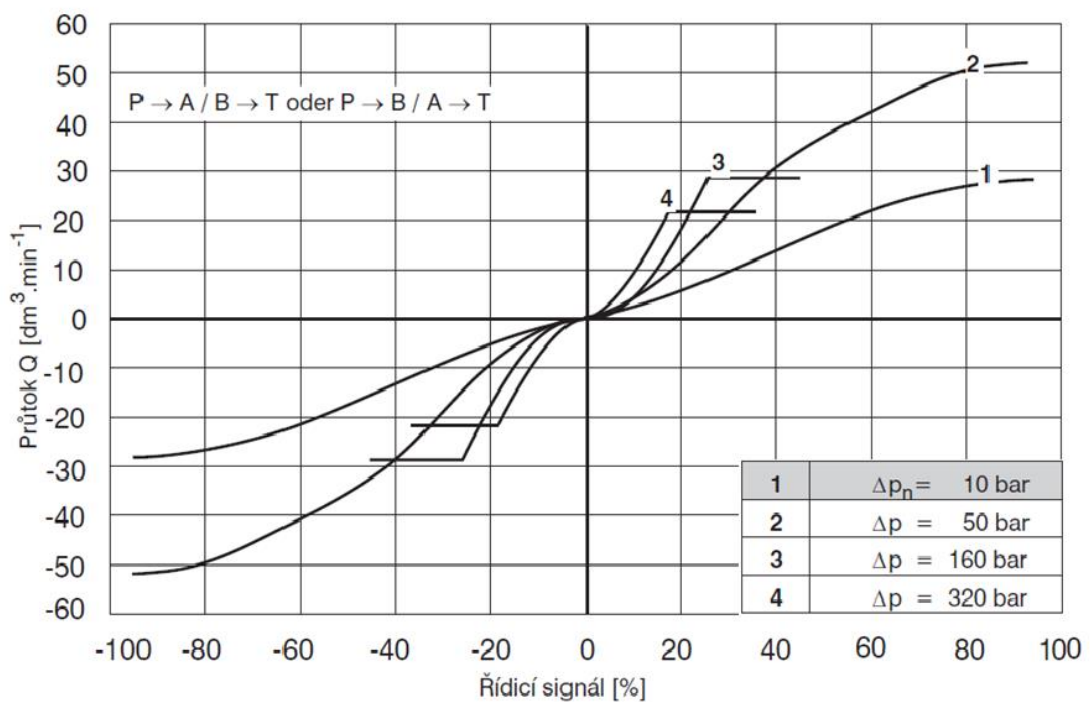
### 4.1 Průtoková charakteristika

Obecně u hydraulických prvků dochází vlivem průtoku tekutiny k tlakové ztrátě. Jedná se především o prvky, které slouží k hrazení průtoku tekutiny a k tlakové ztrátě (rozvaděče, jednosměrné ventily, rychlospojky atp.). Tyto prvky neslouží k řízení tlaku, průtoku a tlakového spádu. Jsou pouze využívány k regulaci parametrů přenášeného výkonu. [1]

U hydraulických prvků se dá snadno určit statická závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na průtoku  $Q$  prvkem. Stačí mít dva snímače na měření tlaku, na vstupu  $p_1$ , na výstupu  $p_2$  a průtokoměr. Z těchto naměřených hodnot lze sestavit  $\Delta p - Q$  diagram (viz obrázek č. 8). [1]

#### Platí pro provedení E02S01

$Q_n = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  při  $\Delta p = 10 \text{ bar}$



obr. 8 - Průtoková charakteristika proporcionálního rozvaděče [7]

## **4.2 Proporcionální prvky**

Proporcionální prvky patří do skupiny tzv. elektrohydraulických převodníků, které nám umožňují řízení průtoku a tlaku elektrickými signály. Do této skupiny patří i servoventily, ale jsou mezi nimi některé rozdíly. Servoventily byly vyvíjeny na náročné regulační obvody a servomechanismy, což se odráží na požadavcích na kvalitu výroby a na ceně. Proporcionální prvky byly naopak vyvíjeny pro četnější použití na průmyslové aplikace. Mají stejná tělesa, společné části a i stejné přípojovací rozměry. Pokud chceme, aby proporcionální prvky měnily spojitě tlak, velikost průtoku, nebo hradily a měnily směr průtoku, musíme změnit průtočnou plochu. To znamená změnit jeden z jejich geometrických parametrů. Mechanický funkční prvek je možno posunout, či natočit, který následně svým tvarem definuje průtočnou plochu. K tomuto účelu je potřeba elektromechanický převodník, který převede vstupní elektrický signál na jemu úměrnou sílu, nebo mechanickou výchylku. [1, 6]

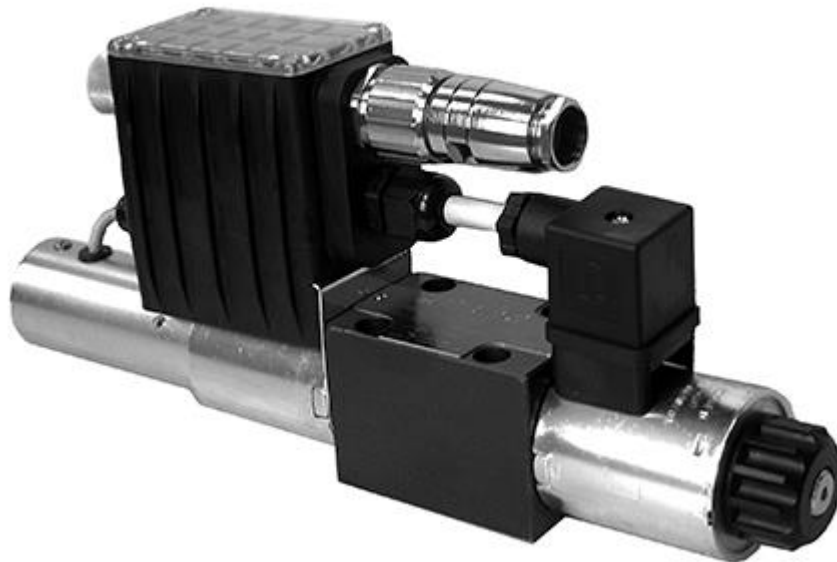
Jako jeden z hlavních prvků hydraulického obvodu, na kterém probíhalo měření je proporcionální rozvaděč (viz kapitola 4.2.1).

### **4.2.1 Proporcionální rozvaděče**

Slouží k řízení velikosti a směru průtoku obvodem na základě vstupního elektrického signálu. Rozděluje je na dva typy: jednostupňové a dvoustupňové. Poloha šoupátka je zajišťována dvěma proporcionálními zdvihovými magnety, pro každý směr pohybu jeden magnet. Proporcionální rozvaděče umožňují měnit odpory mezi jednotlivými cestami spojitě a nikoli jenom skokově. Tím umožňují řídit rychlost a smysl pohybu hydromotorů. [1]



Jedno z konstrukčních řešení proporcionálního rozvaděče je uvedeno na následujícím obrázku č. 9. Řada proporcionálních rozvaděčů je uvedena na obrázku č. 10. Ke každému rozvaděči je uveden maximální tlak a průtok a z těchto hodnot lze vybrat nejvhodnější typ rozvaděče.



obr. 9 - Proporcionální rozvaděč PRM7-063Z11/30-24E04S01 [13]

Type	Q max. l/min (GPM)	P max. bar (PSI)	Connection	Data sheet
PRM2-04	20	320	D02 (NG4)	HC 5105
PRM7-04	20	320	D02 (NG4)	HC 5120
PRM2-06	40	350	D03 (NG6)	HC 5104
PRM7-06	40	350	D03 (NG6)	HC 5119
PRM8-06	140	350	D03 (NG6)	HC 5178
PRM6-10	80	350	D05 (NG10)	HC 5115
PRM7-10	80	350	D05 (NG10)	HC 5116

obr. 10 - Řady proporcionálních rozvaděčů typu PRM [13]

Parametry námi použitého proporcionálního rozvaděče PRM7-063Z11/30-24E04S01 jsou uvedeny v následující tabulce č. 1:

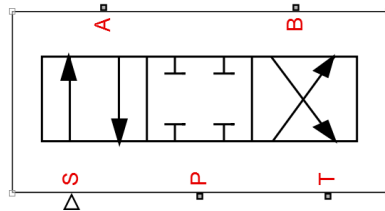
Tabulka 1 - Základní parametry proporcionálního rozvaděče PRM7 [7]

<b>Základní parametry rozvaděče</b>		
Jmenovitá světlost	mm	06
Maximální provozní tlak ve vývodech P, A, B	bar	350
Maximální provozní tlak ve vývodu T	bar	210
Tlaková kapalina		Minerální olej výkonových tříd HL, HLP dle DIN 51524
Rozsah provozní teploty kapaliny (NBR / Viton)	°C	-30 ... +80 / -20 ... +80
Teplota okolí max.	°C	+50
Rozsah provozní viskozity	mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	20 ... 400
Předepsaný stupeň čistoty kapaliny		Třída 21/18/15 podle ČSN ISO 4406
Jmenovitý průtok při $\Delta p = 10$ bar	dm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>	15 /30
Hystereze - otevřená smyčka	%	< 6
Hystereze - uzavřená polohová smyčka	%	< 0.5
Hmotnost - PRM7-062 - PRM7-063	kg	2.3 2.8
Montážní poloha		libovolná
Stupeň elektrického krytí dle ČSN EN 60529		IP65

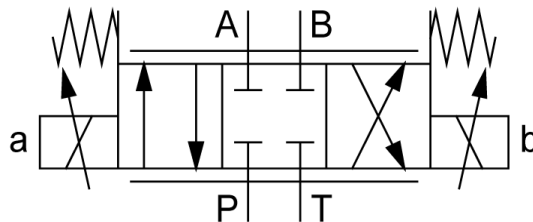
### 4.2.1.1 Schématické značení a popis rozvaděče

- Čtyřcestný proporcionální rozvaděč

Schématické značení:



obr. 11 - Schématická značka v SimScapu



obr. 12 - Hydraulická schématická značka [15]

Blok čtyřcestného rozvaděče reprezentuje skutečný díl. Kapalina je přiváděna do rozvaděče na vstup (P) a vedením (A) jde do hydromotoru, vrací se vedením (B), poté vystupuje vedením (T) a vrací se do nádrže. Rozvaděč má jeden vstupní napěťový signál k portu (S), který mění polohu šoupátka. [12]

Nastavení rozvaděče má tři možnosti:

- podle maximální hodnoty plochy a otevření
- podle plochy v závislosti na otevření
- podle průtokové charakteristiky [12]

Maximální hodnota plochy a otevření:

Zadávatel zadává hodnoty pro maximální průchozí hodnotu rozvaděče a maximální otevření rozvaděče. Průchozí plocha je lineárně závislá na poloze šoupátka. V nulové poloze šoupátka je rozvaděč zcela uzavřený. V opačném případě je zcela otevřený rozvaděč, když se poloha šoupátka nachází v maximální hodnotě. [12]

Podle průtokové charakteristiky:

Zadávají se tabulková data pro otevření rozvaděče, tlakový spád a průtok. Průtok je určen dvojrozměrným tabulkovým výběrem. [12]

Matice pro otevření rozvaděče:

Je specifický vektor ke vstupním datům pro pozici otevření rozvaděče jako jednodimenzionální pole. Vstupní hodnoty musí být stoupající. Výchozí hodnoty jsou v metrech a jsou [-0.002 0 0.002 0.005 0.015] pro čtyři polohy šoupátka. [12]

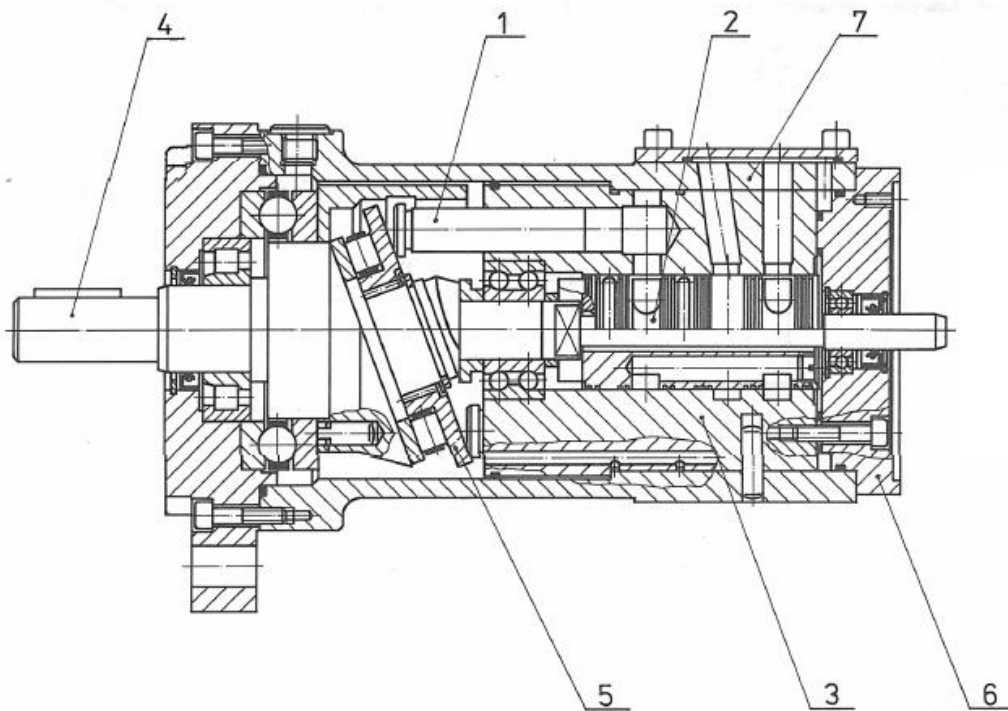
Matice pro hodnoty tlakového spádu:

Je specifický vektor ke vstupním datům pro tlakový spád jako jednodimenzionální pole. Vektor musí být stoupající. [12]

### 4.3 Hydromotory

Prvky určené k převodu tlakové energie tekutiny na mechanickou energii. Na rozdíl od hydrogenerátoru, který plní opačnou funkci, mění mechanickou energii na tlakovou energii. Dělí se podle druhu pohybu jejich výstupního členu na rotační, přímočaré a s kyvným pohybem. Rotační hydromotory rozlišujeme podle prvků, které tvoří geometrický objem hydromotoru. Označujeme je zubové, lamelové, šroubové a pístové hydromotory. Nejvíce používané motory jsou lamelové a šroubové. Lamelové motory mají velký geometrický objem při malých vnějších rozměrech ve srovnání s ostatními rotačními hydromotory. Axiální pístové hydromotory vzhledem ke svým dynamickým vlastnostem se mohou používat pro vysoké pohybové frekvence na rozdíl od radiálních pístových hydromotorů, které jsou vhodné pro nízké frekvence a velké točivé momenty [1,4].

MRAK 5 – je axiální pístový hydromotor, který převádí tlakovou energii na mechanickou. Smysl otáčení lze měnit změnou prouděním kapaliny. Typ Mrak 5 se převážně používá pro servopohon k elektrohydraulickému řízení. Jeho výhody jsou plynulá regulace otáček, krátká doba rozběhu, reverzace, malý zastavěný prostor a jeho montážní poloha je libovolná. Tento hydromotor je vyobrazen na obrázku č. 13. [14]



obr. 13 - Hydromotor Mrak 5 [14]

### **4.3.1 Statické charakteristiky rotačních převodníků**

Základními parametry jsou geometrický objem, tlakový spád a otáčky (pohybová frekvence) a z nich odvozený průtok, moment a výkon. Vlastnosti převodníků jsou také ovlivněny typem použité kapaliny, z nichž je sledována teplota a viskozita. Dalším zásadním parametrem je čas, pokud charakteristika není závislá na čase, resp. s časem se nemění, je statická. Pokud jsou charakteristické veličiny závislé na čase, získáme charakteristiky dynamické. [1]

### 4.3.2 Popis funkce hydromotoru Mrak 5

Hydromotor se skládá z šikmé rotující desky a axiálních pístů. Ve statoru jsou umístěny písty a čep, které umožňují radiální rozvod kapaliny. Hřídel s šikmou deskou je uložena ve třech ložiscích. Zadní příruba s vývodem od hřídele slouží k montáži snímače otáček. Pro připojení napájecí desky s proporcionálním rozvaděčem na hydromotor je určena dosedací plocha s připojovacími rozměry rozvaděče na zadní část hydromotoru. Ten pracuje s malými rotačními hmotami a pomocí radiálního rozvodu je docíleno malých pasivních odporů. Základní technické parametry jsou uvedeny na obrázku č. 14.[14]

ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY			
Název parametru	značka	rozměr	MRAK 5-40
Geometrický pracovní objem	$V_g$	$\text{cm}^3$	39,36
Tlak jmenovitý	$P_n$	MPa	16
pro MRAK 5-40-1			16
pro MRAK 5-40-2			
Tlak maximální	$P_{max}$	MPa	16
Otáčky	$n_{min}$	$\text{min}^{-1}$	1
minimální pro MRAK 5-40-1			2
minimální pro MRAK 5-40-2			
maximální pro MRAK 5-40-1	$n_{max}$		1600
maximální pro MRAK 5-40-2			1600
Maximální nerovnoměrnost otáček $n_{min}$ při středním tlaku 5 MPa		%	60
Moment setrvačných rotujících hmot	$I$	$\text{kgm}^2$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Kroutčf moment při $P_n$ a $n_n$	$M_k$	Nm	85
Teoretický kroutčf moment při $P_n$	$M_t$	Nm	100,2
Rozběhový kroutčf moment při $P_n$	$M_o$	Nm	80
Celková účinnost při jmen. parametrech	$\eta$	%	80
Maximální hlučnost se servoventilem při 10 MPa a $1000 \text{ min}^{-1}$		dB	80
Maximální vnější svodový průtok	$Q_z$	$\text{cm}^3/\text{min}$	250
Rozsah viskozity pracovní kapaliny		$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	16
minimální			50
maximální			
Teplota pracovní kapaliny	$t_{po}$	$^{\circ}\text{C}$	+10 až +60
Teplota okolí	$t$	$^{\circ}\text{C}$	+10 až +40
provozní			-20 až +70
přepravní			
Jmenovitá jemnost čištění	$\sigma_{f_n}$	$\mu\text{m}$	10
Druh klimatické odolnosti dle ČSN 03 8805			N 32
Hmotnost bez pracovní kapaliny		kg	19,2

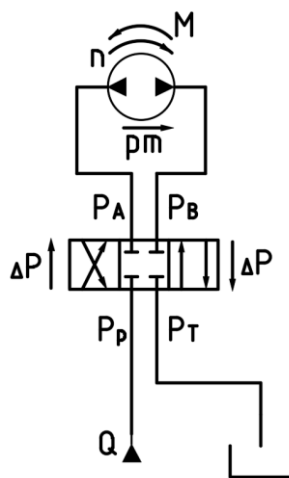
obr. 14 - Základní parametry hydromotoru Mrak 5 [14]

### 4.3.3 Řízení rychlosti motorů

Řízením rychlosti se musíme zabývat už při návrhu hydraulického obvodu. Rychlost motoru je obecně dána velikostí geometrického objemu motoru a přiváděným průtokem. Řídit rychlost lze provádět změnou průtoku přiváděného do motoru, což můžeme zajistit proměnnými odpory (škrtícími ventily, škrtícími ventily se stabilizací tlakového spádu, řídicími šoupátky, proporcionálními škrtícími ventily a rozvaděči, servoventily), změnou geometrického objemu hydromotoru. V našem případě byla použita metoda řízení rychlosti škrcením pomocí proporcionálního rozvaděče (viz kapitola č. 4.4). [1]

### 4.4 Řízení rychlosti škrcením proporcionálními rozvaděči

Proporcionální rozvaděče umožňují ovládat velikost průtoku a řídit směr hydromotoru. Průtok řídí vždy dvěma hranami. Pro tlakové spády na jednotlivých hranách platí následující vztahy č. 6 a 7. Použité veličiny jsou uvedeny v tabulce č. 2. [1]



obr. 15 – Schéma zapojení

$$\Delta p = \frac{1}{2} (p_p - p_T - p_m) \quad (6)$$

$$p_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{V_0} \quad (7)$$

Rovnice č. 6 a 7 poslouží k výpočtu tlakového spádu na jednotlivých hranách. [1,5]



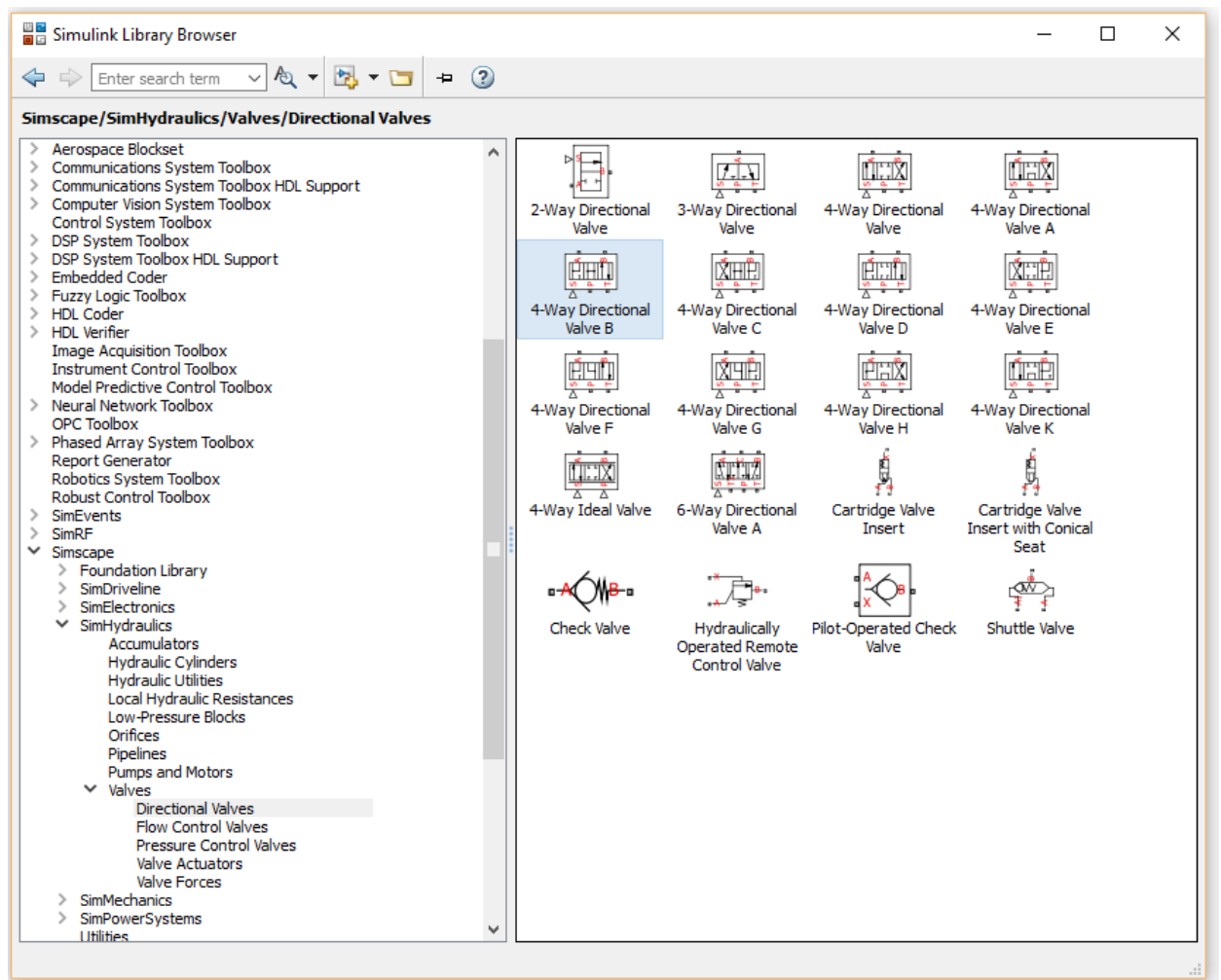
Tabulka 2 - Použité veličiny

název	značení	jednotky
rozdíl tlaků	$\Delta p$	[bar]
zdroj tlaku	$p_p$	[bar]
tlak ve vedení T	$p_T$	[bar]
tlakový spád na motoru	$p_m$	[bar]
zátěžový moment	$M$	[N. m]
Geometrický objem hydromotoru	$V_0$	[cm <sup>3</sup> ]

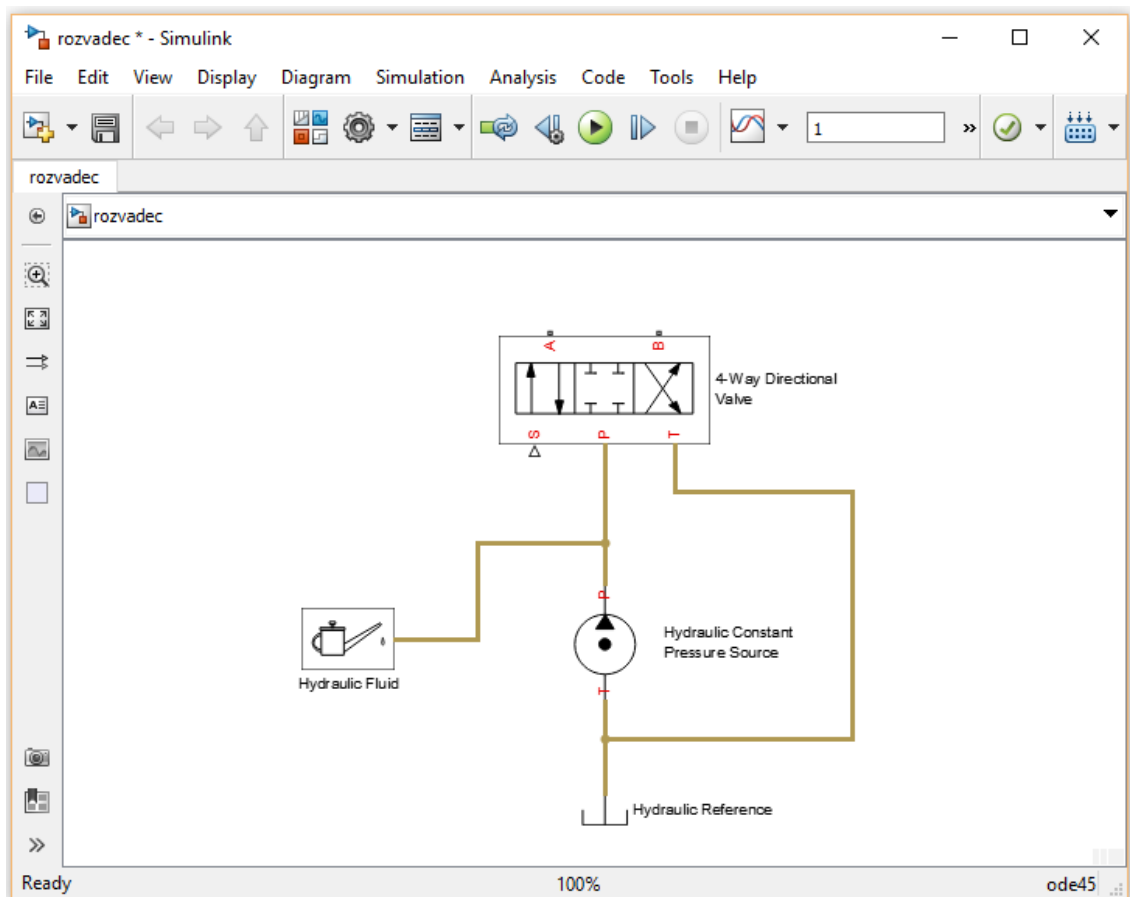
## 5 Simulování v toolboxu SimScape

### 5.1 Tvorba Simulačního schéma rozvaděče v SimScapu

Bloky jednotlivých částí vybíráme z knihovny (viz obrázek č. 16) a vkládáme je do uživatelského prostředí (viz obrázek č. 17). Do tohoto prostředí si vložíme všechny potřebné bloky a spojíme je dohromady. Bloky po vložení do prostředí se musí nadefinovat potřebnými parametry.

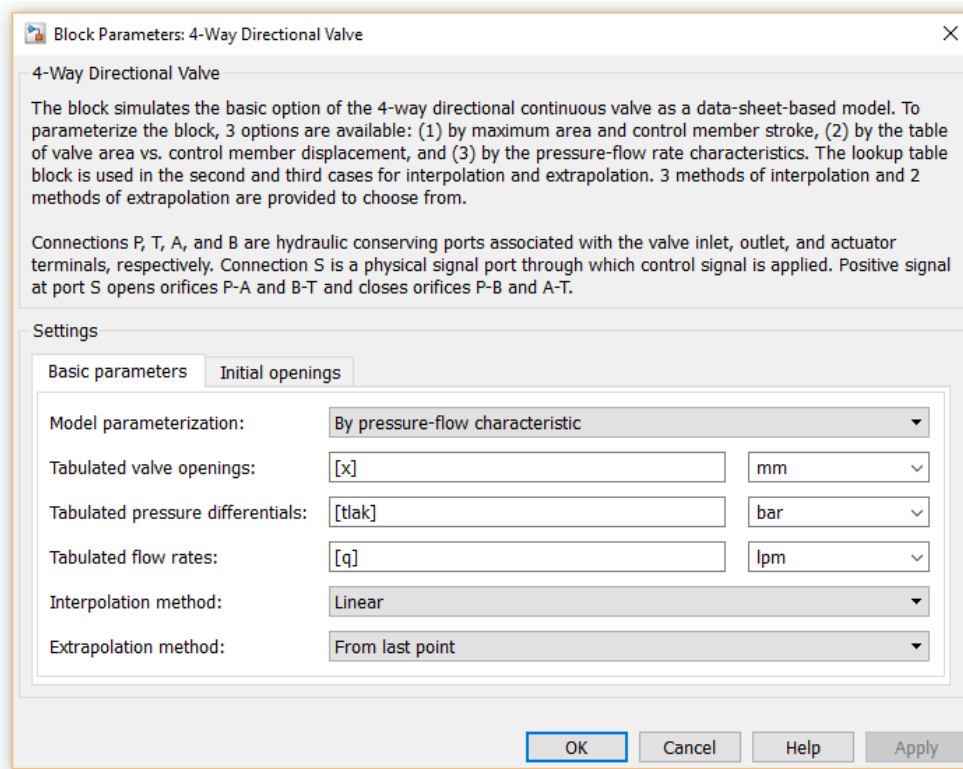


obr. 16 - Knihovna bloků SimScape



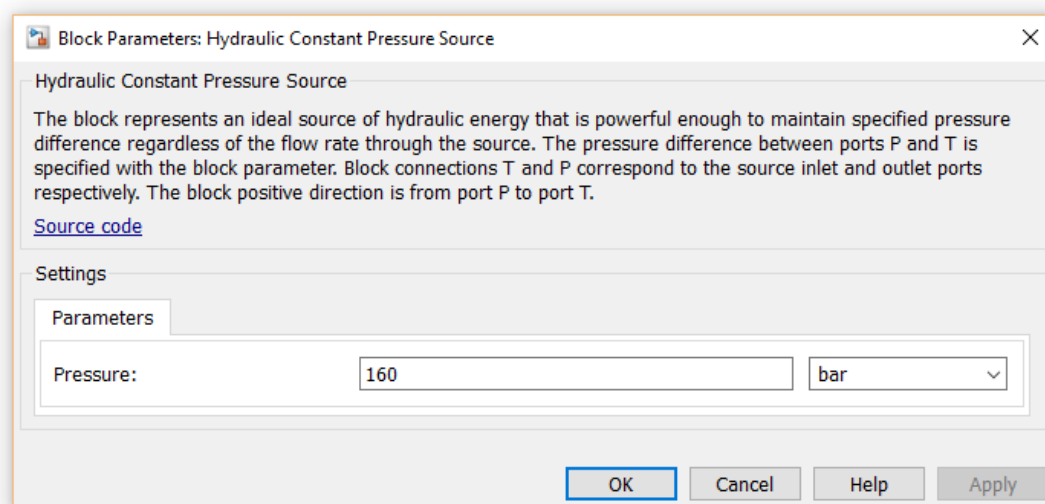
obr. 17 - Uživatelské prostředí

V rozvaděči na obrázku č. 18 si musíme nadefinovat správné jednotky, které budeme zadávat. Pro polohu šoupátka  $x$  jsme zvolili [mm]. Představují nám procentuální otevření, tzn., že když budeme mít otevření 1, šoupátko bude otevřeno na 100 [%]. Jelikož je rozvaděč symetrický, platí to i v záporném smyslu. Tlak  $p$  má jednotku [bar], a průtok  $Q$  má jednotky [dm<sup>3</sup>/min]. V Matlabu si můžeme vytvořit tři matice: pro polohu šoupátka, tlak a průtok. Tyto hodnoty byly odečteny z katalogových listů výrobce proporcionálního rozvaděče značky Argo-Hytos PRM7 (viz obrázek č. 9). Polohu šoupátka máme nadefinovanou od 0 do 100 [%] s krokem 5 [%], tlakový spád je nadefinován pro 4 hodnoty  $\Delta p = (10, 50, 160, 320)$  [bar] a průtok  $Q$  je odečten pro každý tlakový spád v závislosti na poloze  $X$  a polohu jsme odečítali s krokem 5 [%].

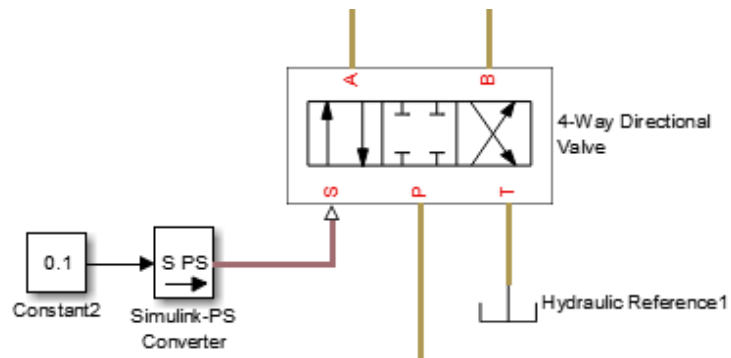


obr. 18 - Nastavení proporcionálního rozvaděče

Na obrázku č. 22 je schéma, které poslouží k simulování průtoku kapaliny rozvaděčem. Vstupní tlak se může nastavit na libovolnou hodnotu (viz obrázek č. 19). Poloha šoupátka v rozvaděči se může pohybovat od 1 do -1, jak je zobrazeno na obrázku č. 20, což představuje otevření rozvaděče. Měření rozvaděče provádíme přes jednu hranu, za použití jednoho tlakového senzoru a jednoho průtokového senzoru.



obr. 19 - Nastavení zdroje tlaku

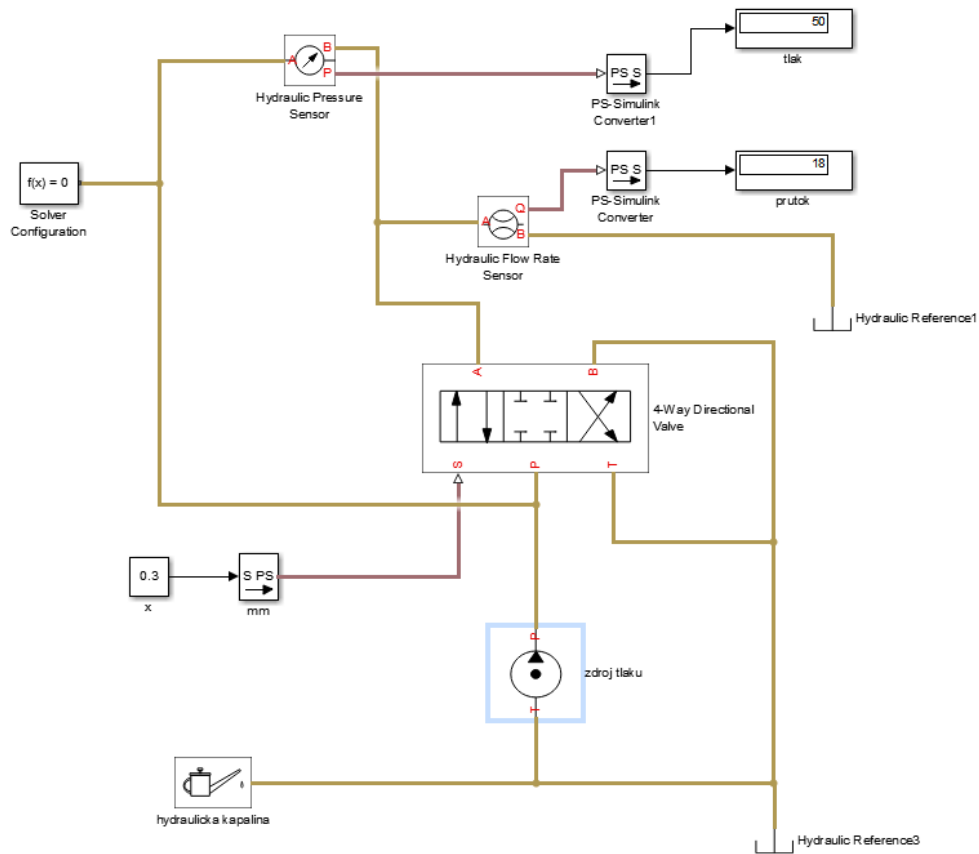


obr. 20 - nastavení polohy šoupátka v proporčním rozvaděči

Kapalina byla použita ISO VG 32 (viz obrázek č. 21):

Parameters	
Hydraulic fluid:	ISO VG 32 (ESSO UNIVIS N 32)
Relative amount of trapped air:	0.005
System temperature (C):	60
Viscosity derating factor:	1
Pressure below absolute zero:	Error
Fluid Properties:	
Density (kg/m <sup>3</sup> ):	844.4
Viscosity (cSt):	15.9869
Bulk modulus (Pa) at atm. pressure and no gas:	1.26653e+09

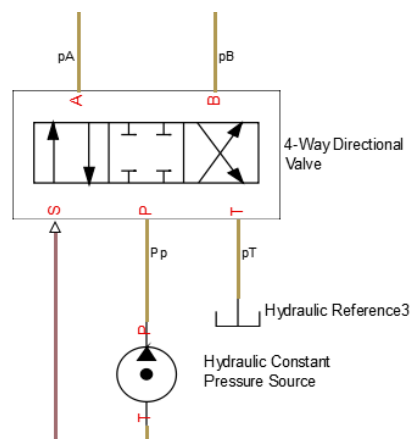
obr. 21 - Nastavení hydraulické kapaliny



obr. 22 - Hotové schéma proporcionálního rozvaděče

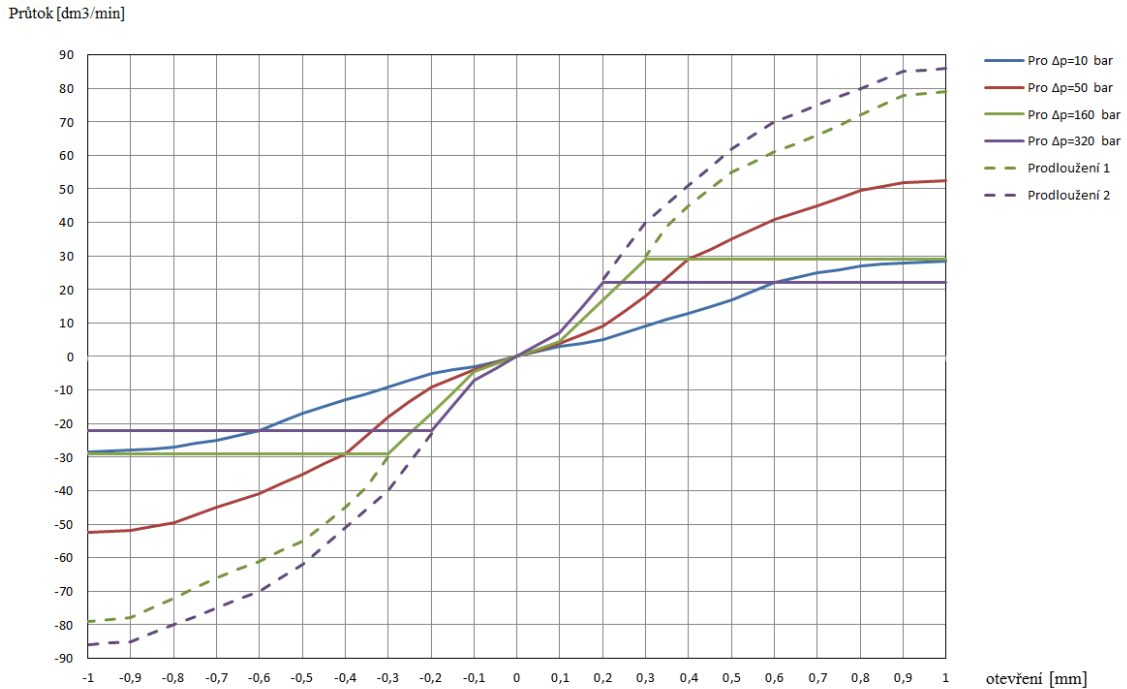
Postoupnou změnou vstupních hodnot tlaku a změnou polohy šoupátka byl vytvořen graf č. 1.

Na obrázku č. 23 je detail proporcionálního rozvaděče, ve kterém jsou označeny jednotlivé větve a jaký tlak v nich je. Vyznačeny jsou  $p_A$ ,  $p_B$ ,  $p_P$  a  $p_T$ .



obr. 23 - Označení tlaků

## Průtoková charakteristika proporcionálního rozvaděče

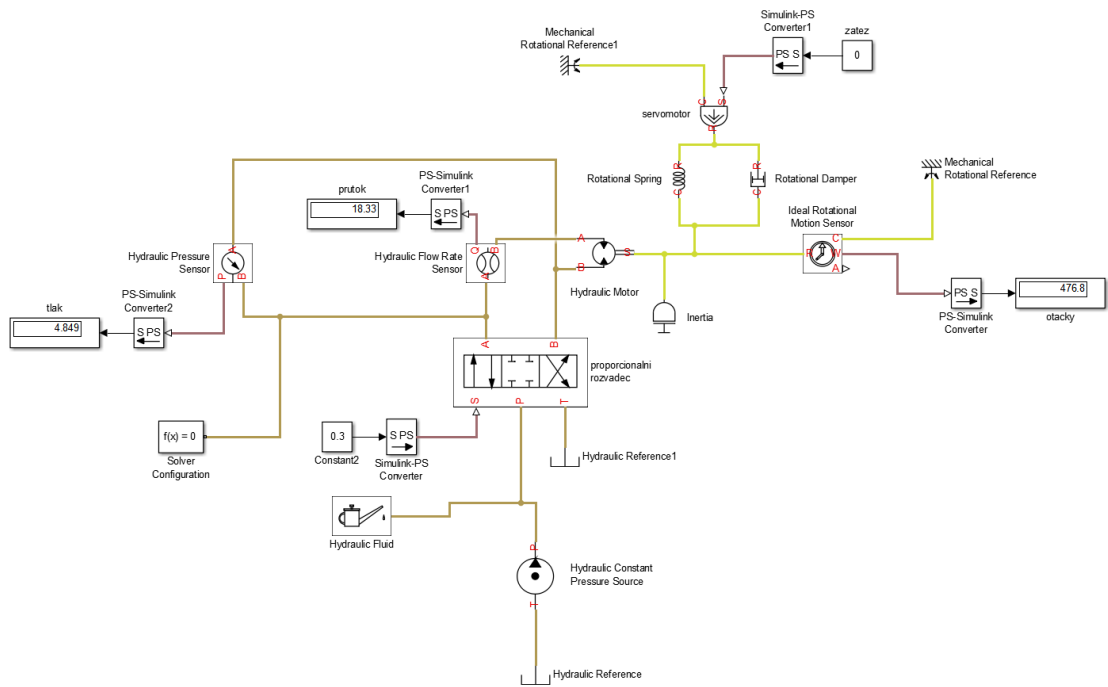


Graf 1 - Průtoková charakteristika proporcionálního rozvaděče

Nasimulované hodnoty jsou uvedeny v příloze 2 a 3, z nich byl vytvořen graf č. 1.

## 5.2 Simulační schéma proporcionálního rozvaděče, hydromotoru a zátěže

V této kapitole je popsáno simulační schéma (viz obrázek č. 24). Proporcionální rozvaděč je připojen na zdroj tlakové kapaliny o určitém tlaku. Výstupy jsou připojeny do hydromotoru a výstup z rozvaděče jde do nádrže. Proporcionální rozvaděč má nastavený otevření na  $x$  [%] v kladném smyslu. Do série je zapojen snímač průtoku  $Q$  a paralelně tlakový snímač, který nám udává hodnotu  $p_m$ . V hydromotoru se nám převádí tlaková energie na mechanickou a vytváří se na hřídeli určitý krouticí moment. Krouticí moment je převeden pružnou spojkou a to nám simuluje tlumič s pružinou. Tlumič a pružinu jsme nastavili podle hodnot z katalogového listu. Blok inertia je moment setrvačnosti hydromotoru a servomotoru. Ideal Torque source si nastavujeme podle potřeby a simuluje nám zatížení hydromotoru krouticím momentem  $M$  a vytváří nám ho servomotor Yaskawa. K fyzické části je připojen rotační pohybový sensor, který snímá otáčky  $n$  [ot/min].



obr. 24 - Schéma hydromotoru se zátěží

V následujících tabulkách jsou všechny potřebné koeficienty, které byly zadány do SimScapu.

Nastavení konstantních veličin v hydromotoru:

Tabulka 3 - Koeficienty pro nastavení bloku hydromotoru

Název veličiny	Značení	hodnota
geometrický pracovní objem	$V_0$	39,36 [cm <sup>3</sup> ]
celková účinnost	$\eta_c$	0,8 [-]
jmenovitý tlak	$p_n$	160 [bar]
jmenovité otáčky	$n_{max}$	1600 [ot. min <sup>-1</sup> ]
kinematická viskozita	$\nu$	18 [mm <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ]
hustota hydraulické kapaliny	$\rho$	900 [kg. m <sup>-3</sup> ]



Nastavení bloku inertia:

Tabulka 4 - Moment setrvačnosti motoru a servomotoru

Název veličiny	Značení	hodnota
moment setrvačnosti	$J$	0,00895 [kg. m <sup>2</sup> ]

Nastavení tlumiče a pružiny:

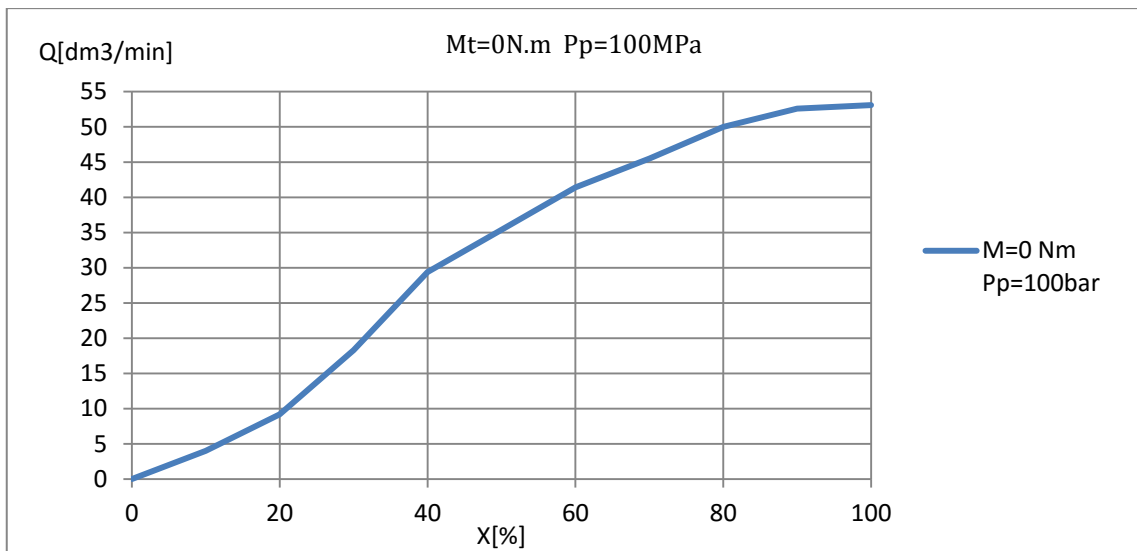
Tabulka 5 - Koeficienty pro nastavení tlumiče a pružiny

Název veličiny	Značení	hodnota
tuhost pružiny	$k_p$	200 [N. m]
koeficient tlumení	$k_T$	0,001 [N. m/(rad/s)]

V simulačním schématu nám vyšly hodnoty pro nulovou zátěž a zdroj tlaku  $p_p = 100$  [bar]. Hodnoty tlakového spádu motoru, průtoku a otáček byly zaznamenány v tabulce č. 6. Poté byl vytvořen graf č. 2.

Tabulka 6 - Nasimulované hodnoty pro nulovou zátěž

X [%]	$p_m$ simulace [bar]	$Q_0$ simulace [dm <sup>3</sup> /min]	$n$ simulace [ot/min]
0	0	0	0
10	5	4,0	102
20	5	9,2	234
30	5	18,3	477
40	5	29,4	747
50	5	35,4	899
60	5	41,4	1052
70	5	45,5	1156
80	5	50,0	1270
90	5	52,6	1336
100	5	53,1	1349

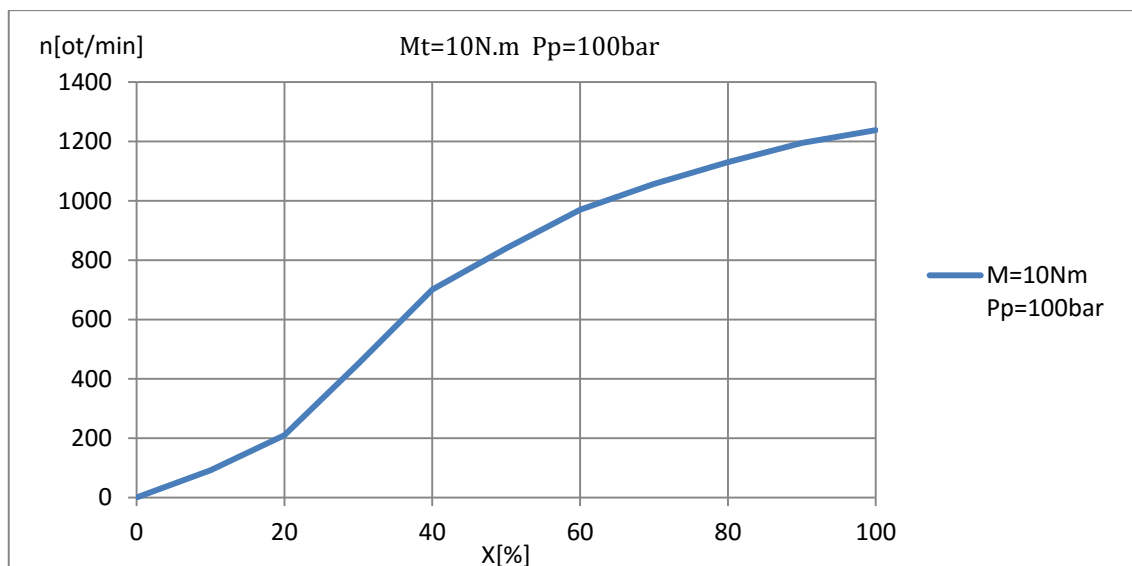


Graf 2 - Nasimulovaná průtoková charakteristika

Nasimulované hodnoty pro zátěž  $M_t = 10 \text{ [Nm]}$  a zdroj tlaku  $p_p = 100 \text{ [bar]}$  jsou uvedeny tabulce č. 7 a z těchto hodnot byl vytvořen graf č. 3.

Tabulka 7 - Nasimulované hodnoty pro zátěž 10 [Nm] a pro zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$Q_0$ simulace [dm3/min]	$p_m$ simulace [bar]	$n$ simulace [ot/min]
0	0	0	0
10	3,6	20	92
20	8,3	20	210
30	17,8	20	451
40	27,6	20	701
50	33,1	20	840
60	38,2	20	970
70	41,6	20	1057
80	44,5	20	1130
90	47,0	20	1195
100	48,7	20	1238

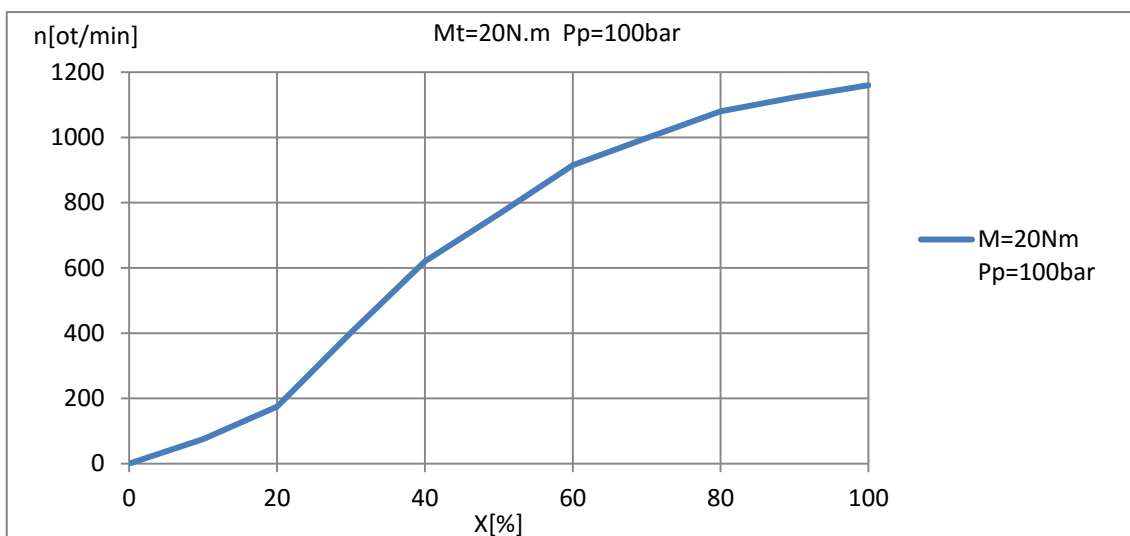


Graf 3 - Závislost otáček na procentuálním otevření pro zátěž 10 [Nm]

Nasimulované hodnoty pro zátěž  $M_t = 20$  [Nm] a zdroj tlaku  $p_p = 100$  [bar] jsou uvedeny tabulce č. 8 a z těchto hodnot byl vytvořen graf č. 4.

Tabulka 8 - Nasimulované hodnoty pro zátěž 20 [Nm] a pro zdroj tlaku 100 [bar]

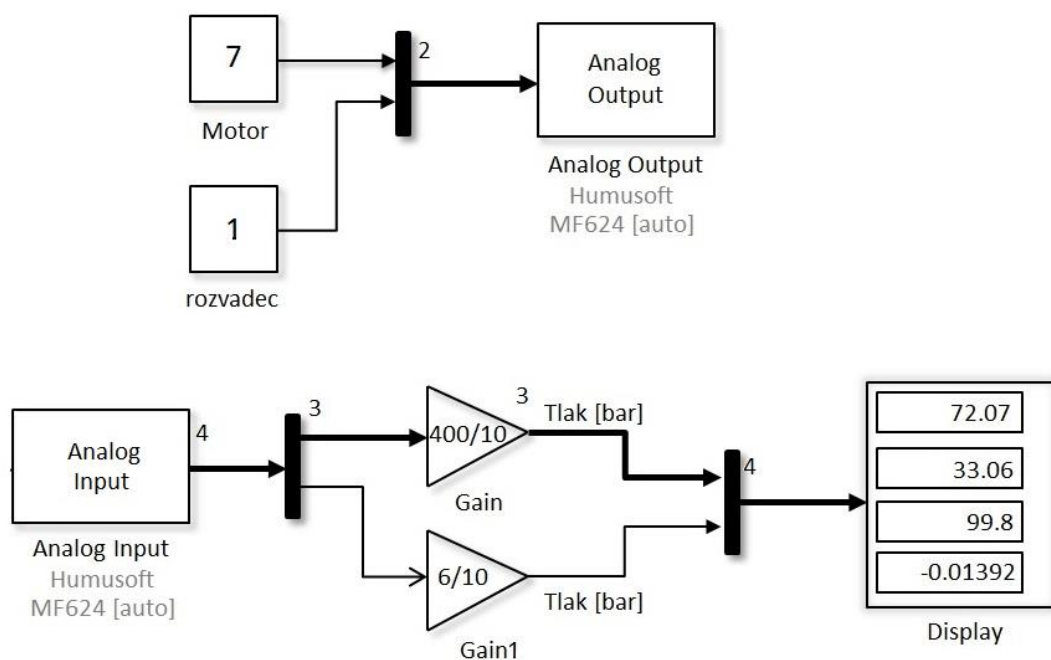
X [%]	$Q_0$ simulace [dm <sup>3</sup> /min]	$p_m$ simulace [bar]	n simulace [ot/min]
0	0	0	0
10	3,0	37	75
20	6,9	37	175
30	15,8	37	402
40	24,4	37	620
50	28,7	37	765
60	36,8	37	915
70	39,8	37	998
80	42,5	37	1080
90	44,2	37	1123
100	45,7	3,7	1160



Graf 4 - Závislost otáček na procentuálním otevření pro zátěž 20 [Nm]

## 6 Měření

Měření probíhalo v laboratoři KSA, k měření byly použity následující komponenty: hydromotor, proporcionální rozvaděč, servomotor, snímače tlaku a průtoku, zdroj tlaku a nádrž. V Matlabu byly nastaveny (viz obrázek č. 25) vstupní hodnoty pro motor a rozvaděč, kde u motoru 7 znamená 70 [%] výkonu motoru, a to představuje 20 [Nm]. Pro rozvaděč máme nastavený otevření na 10 [%] v kladném smyslu. Výstupem byly hodnoty  $p_A = 72$  [bar],  $p_B = 33$  [bar],  $p_P = 100$  [bar] a  $p_T = 0$  [bar].



obr. 25 - Ukázka zadávání hodnot do Matlabu

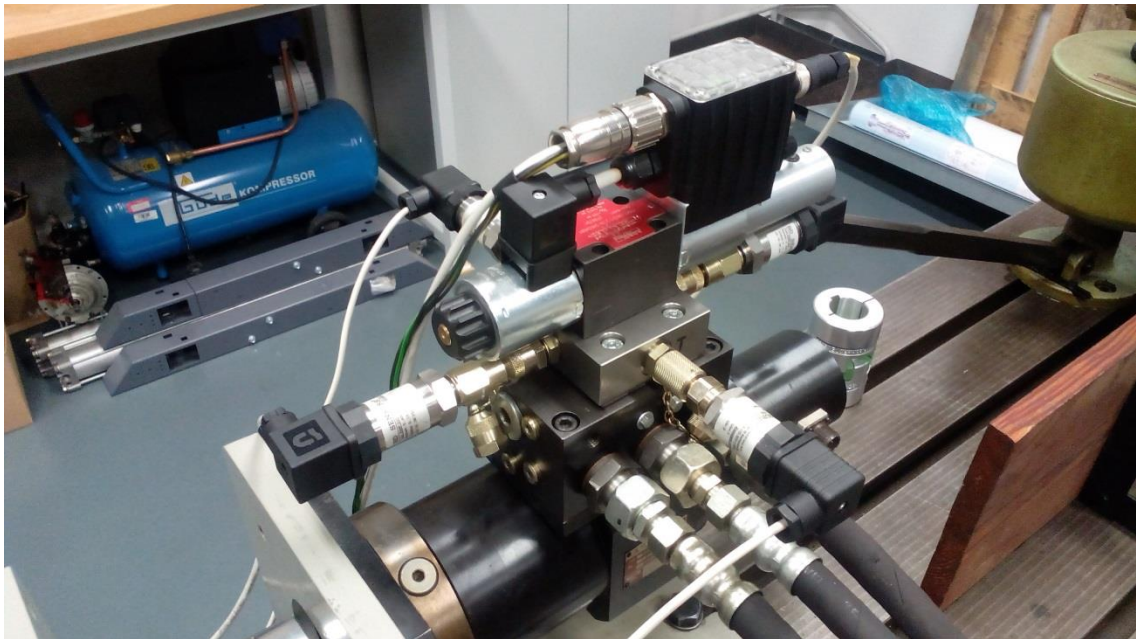
Tlakové sensory, které byly použity, jsou na obrázku č. 28. Pro tlaky  $p_A$ ,  $p_B$ , a  $p_P$  byl použit BD sensor DMP 333 s rozsahem tlaku od 0 [bar] do 400 [bar] a napětí od 0 [V] do 10 [V] s přesností  $\pm 0,35$  [%] měřicího rozsahu (viz obrázek č. 26). Na měření  $p_T$  jsme použili BD sensor DMP 331 s rozsahem tlaků od 0 do 6 [bar] a napětí od 0 do 10 [V] s přesností  $\pm 0,35$  [%] měřicího rozsahu (viz obrázek č. 27).



obr. 26 - BD sensor DMP 333 [8]

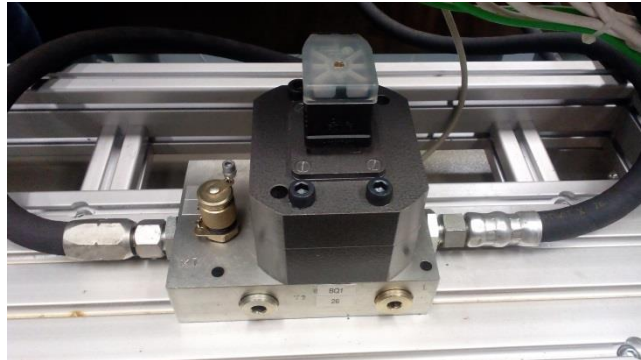


obr. 27 - BD sensor DMP 331 [9]



obr. 28 - Tlakové sensory připojeny k rozvaděči

Průtokový snímač firmy Kracht typ: VC 0,4 F1 PS H-03 má geometrický objem  $0,4 \text{ [cm}^3\text{]}$  a může pracovat při maximálním tlaku  $p_{max} = 400 \text{ [bar]}$ , je zobrazen na obrázku č. 29. Snímá nám průtok  $Q_m \text{ [dm}^3\text{/min]}$ .



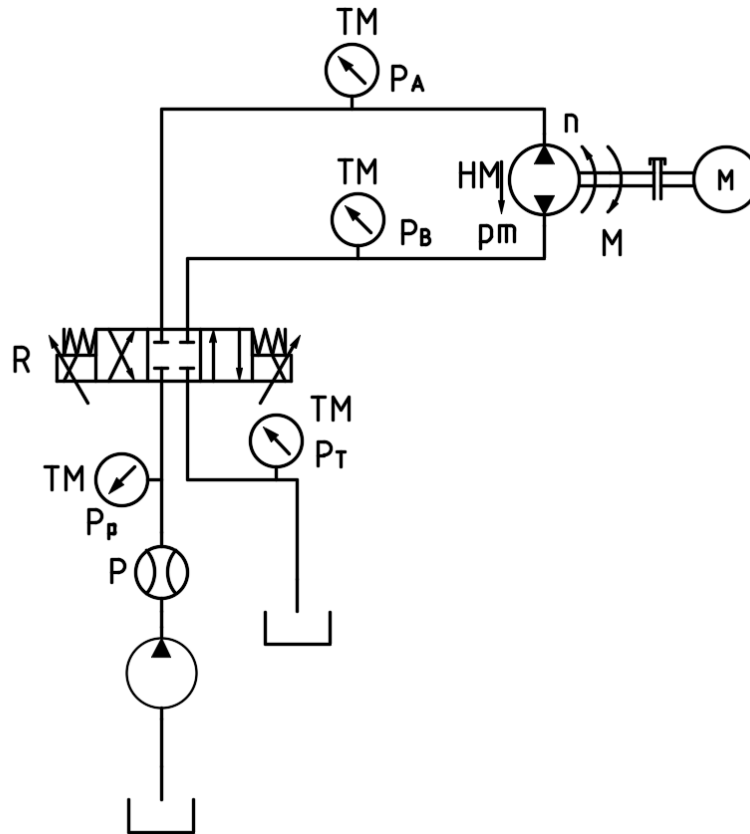
obr. 29 - Průtokový snímač Kracht-VC0,4 F1 PS H-03

Na obrázku č. 30 je zobrazeno měřicí stanoviště a zdroj tlaku s nádrží kapaliny, který nám dodává potřebný tlak  $p_p$  do rozvaděče. Náplň nádrže je hydraulická kapalina ISO VG 32.



obr. 30 - Měřicí stanoviště

Na obrázku č. 31 je zobrazeno schéma hydraulického obvodu, které popisuje náš případ. Obsahuje proporcionální rozvaděč R, hydromotor HM, servomotor M, čtyři tlakoměry TM, průtokoměr P, zdroj tlaku a nádrž s kapalinou.



obr. 31 - schéma zapojení hydraulického obvodu



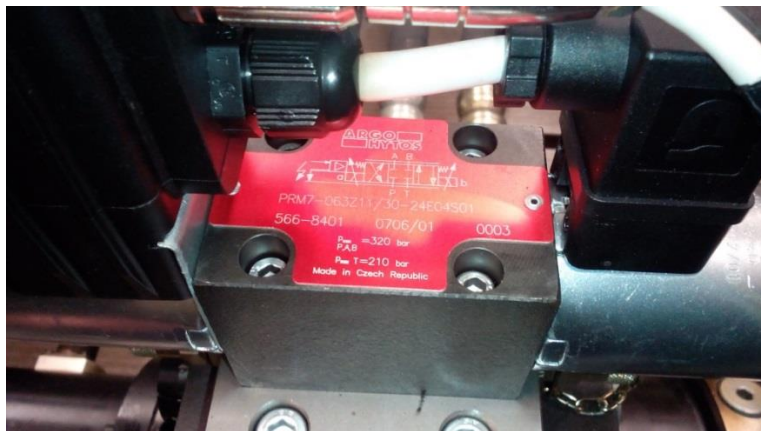
V tabulce č. 9 máme výkonové omezení zdroje a z něho lze poznat, že nebudeme moci plně otevřít proporcionální rozvaděč, aniž by nám klesl tlak.

Tabulka 9 - Výkonové omezení zdroje

Výkonové omezení zdroje tlaku pro 7,5 kW										
Tlak [bar]	50	100	150	160	170	180	190	200	210	220
Průtok [dm <sup>3</sup> /min]	29	29	29	28	26	25	23	22	21	20
Otáčky páky	8,7	8,7	8,7	8,4	7,9	7,5	7,1	6,7	6,4	6,1
Výkonové omezení zdroje tlaku pro 7,5 kW										
Tlak [bar]	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
Průtok [dm <sup>3</sup> /min]	19	18	18	17	16	16	15	15	14	14
Otáčky páky	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0	4,8	4,6	4,5	4,3	4,2

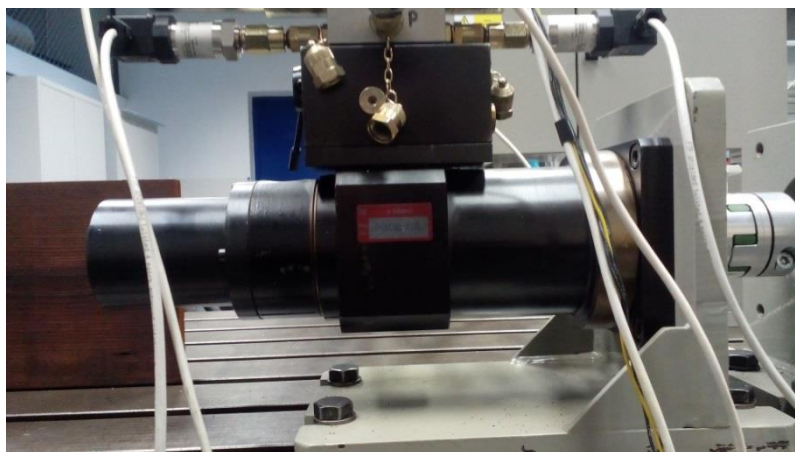
Proporcionální rozvaděč byl použit od firmy Argo-Hytos typ: PRM7-063Z11/30-24E04S01, podrobnější informace o rozvaděči (viz kapitola 4.2.1), v kapitole 4.4 je podrobně popsána metoda řízení rychlosti škrcením, na obrázku č. 8 je průtoková charakteristika z katalogových listů a v grafu č. 1 máme nasimulované hodnoty z programu SimScape. Proporcionální rozvaděč je připojen rozvodovou kostkou k hydromotoru Mrak-5 (viz obrázek č. 33), více o hydromotoru v kapitole 4.3. Hřídel je výstupem z hydromotoru, na kterou je připojena spojka Rotex GS 28 (viz obrázek č. 34) a následně přenáší krouticí moment do servomotoru, který nám simuluje zátěž.

Na obrázku č. 32 je znázorněn proporcionální rozvaděč, který byl připojen k rozvodové kostce.



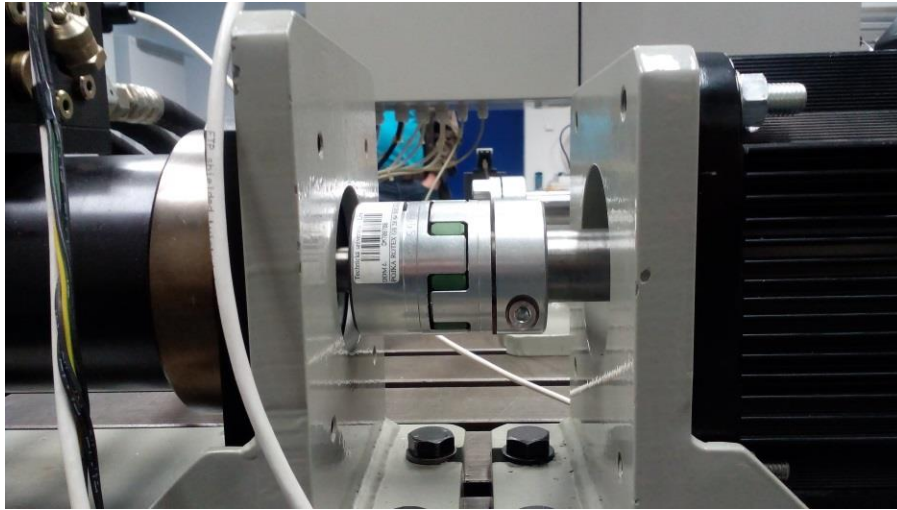
obr. 32 - Proporcionální rozvaděč Argo-Hytos

Na obrázku č. 33 je vyfocen hydromotor Mrak-5.



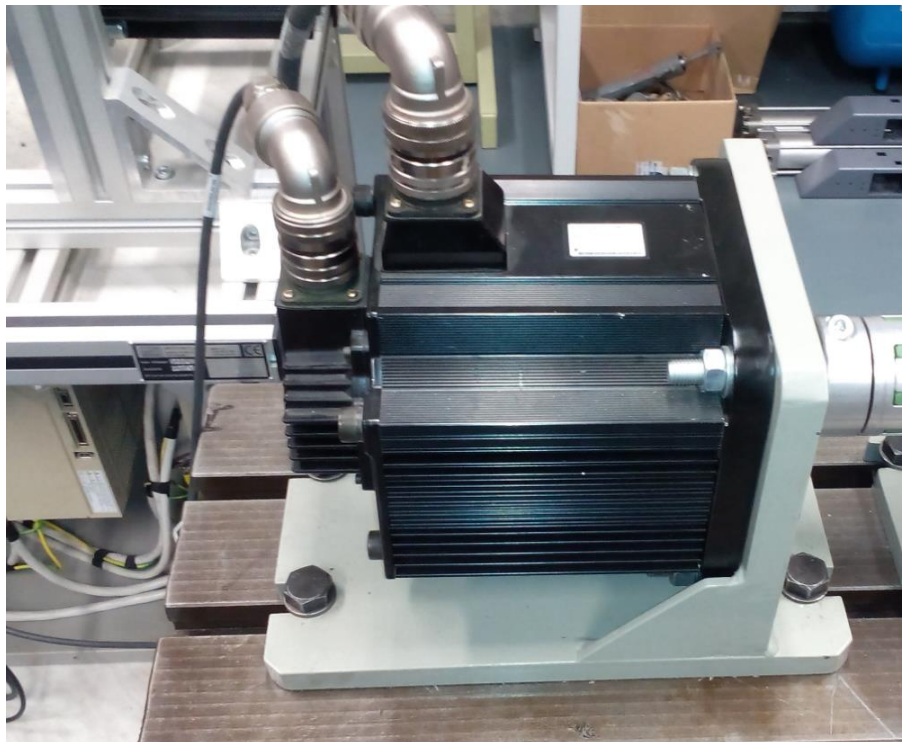
obr. 33 - Hydromotor Mrak-5

Na obrázku č. 34 je vyfocena spojka Rotex GS 28, která nám zajišťuje mechanické spojení hydromotoru a servomotoru.



obr. 34 - Spojka Rotex GS 28

Na obrázku č. 35 je AC servomotor Yaskawa, který nám vytváří kroučící moment proti směru otáčení hydromotoru. Jeho maximální výkon je 15kW a maximální otáčky jsou 1500 ot/min.[11]



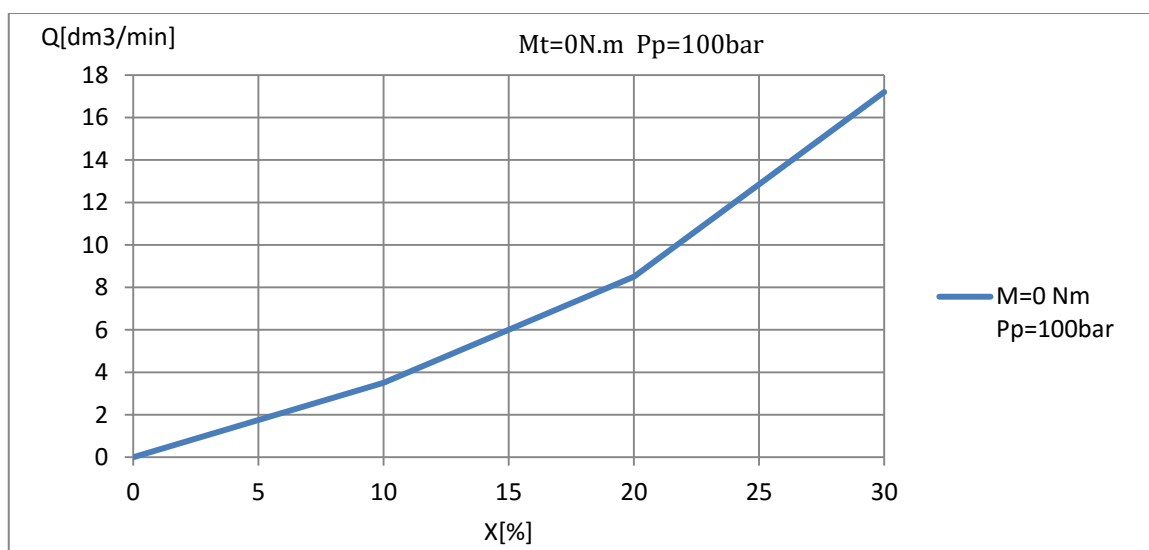
obr. 35 - Servomotor

Pro krouticí moment  $M = 0$  [Nm] a zdroj tlaku  $p_p=100$  [bar] byly naměřeny následující hodnoty:

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro nulovou zátěž a zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$p_A$ [bar]	$p_B$ [bar]	$p_T$ [bar]	$p_P$ [bar]	$Q_m$ [dm <sup>3</sup> /min]
0	0	0	0	100	0,0
10	60	56	0	100	3,5
20	58	54	0	100	8,5
30	55	49	1	100	17,2

Z tabulky č. 10 byla vytvořena závislost průtoku na otevření proporcionálního rozvaděče.



Graf 5 - Průtoková charakteristika pro nulovou zátěž a zdroj tlaku 100 [bar]

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty pro nulovou zátěž a proměnný tlak zdroje

X [%]	$p_A$ [bar]	$p_B$ [bar]	$p_T$ [bar]	$p_P$ [bar]	$Q_m$ [dm <sup>3</sup> /min]
40	48	41	2	80	28,0
50	28	23	3	46	31,0
60	20	15	3	32	31,0
70	17	12	3	24	31,4
80	14	09	3	19	31,3
90	13	09	3	18	31,4
100	12	08	2	17	31,4

V tabulce č. 11 nám začal klesat zdrojový tlak, protože zdroj tlaku nebyl dostatečně výkonný. Tuto tabulku nelze zahrnout do grafu č. 5, jelikož nemáme konstantní  $p_p$ .

Z naměřených hodnot jsem vypočetl tlakový spád motoru  $p_m$  a ztrátový moment vlivem pasivních odporů. K výpočtu jsme použili následující vzorce č. 8 a 9.

Tlakový spád na hydromotoru:

$$p_m = p_A - p_B \quad (8)$$

Kroutící moment působící na hydromotor:

$$M = \frac{p_m \cdot v_0}{2\pi} \quad (9)$$

Z těchto rovnic byl vypočítán tlakový spád a kroutící moment. [1]

Ukázkový příklad pro 10 [%] otevření proporcionálního rozvaděče:

$$p_m = p_A - p_B = 60 [bar] - 56 [bar] = 4 [bar] \quad (10)$$

$$M = \frac{4 \cdot 10^5 [Pa] \cdot 39,36 \cdot 10^{-6} [m^3]}{2 \cdot \pi} = 2,5 [Nm] \quad (11)$$

Vyšly tyto hodnoty v tabulce č. 12:

Tabulka 12 - Vypočtené hodnoty pro nulovou zátěž a tlak 100 [bar]

x [%]	$p_m$ vypočteno [bar]	M vypočteno [Nm]
0	0	0,0
10	4	2,5
20	4	2,5
30	6	3,8
40	7	4,4
50	5	3,1
60	5	3,1
70	5	3,1
80	5	3,1
90	4	2,5
100	4	2,5

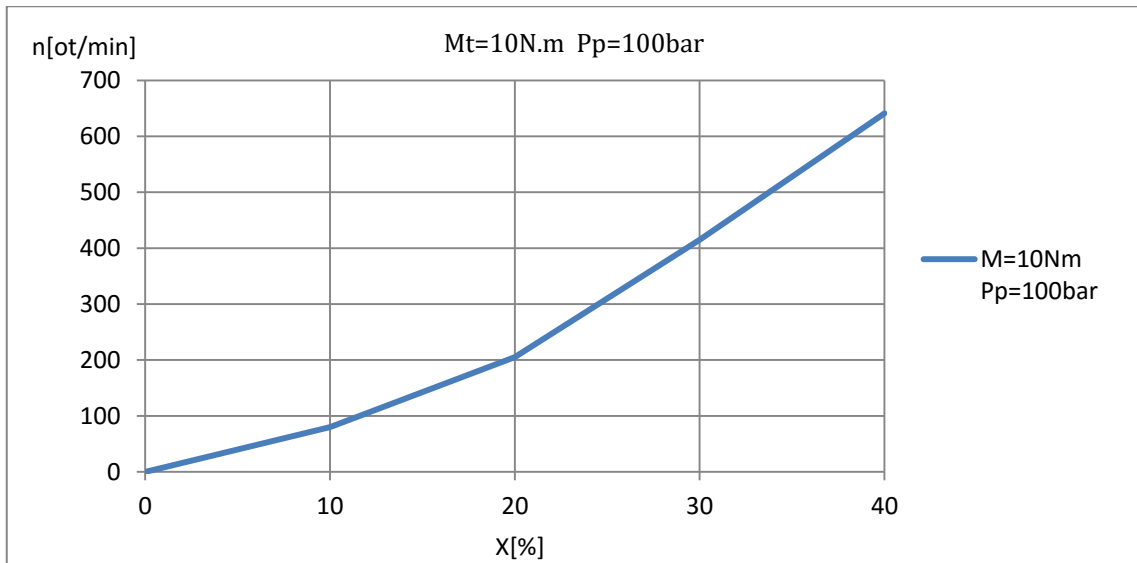
Pro krouticí moment 10 [Nm] a zdroj tlaku  $p_p=100$  [bar] byly naměřeny následující hodnoty:

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty se zátěží 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$p_A$ [bar]	$p_B$ [bar]	$p_T$ [bar]	$p_P$ [bar]	$Q_m$ [dm <sup>3</sup> /min]	n [ot/min]
0	0	0	0	100	0	0
10	66	46	0	100	3,5	80
20	63	44	0	100	9	205
30	77	56	1	100	20	415
40	60	39	1	100	26,5	641

Z důvodu rozkmitání hřídele jsme ukončili měření při otevření 50 [%] a tlaku 100 [bar] (viz tabulka č. 13).

Na následujícím grafu je nanesena závislost otáček na otevření rozvaděče. Hodnoty jsou z tabulky č. 13.



Graf 6 - Závislost otáček na procentuálním otevření rozvaděče

Při měření 50 [%] otevření nám začala klesat hodnota  $p_p$ , to znamená, že zdroj nedodává požadovaný tlak. Tabulku č. 14 nelze zahrnout do grafu č. 6.

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty se zátěží 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$p_A$ [bar]	$p_B$ [bar]	$p_T$ [bar]	$p_P$ [bar]	$Q_m$ [dm <sup>3</sup> /min]	n [ot/min]
50	49	27	2	65	28	680

Ukázkový příklad pro 10 [%] otevření proporcionálního rozvaděče pro zátěž 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar]:

Výpočet průtoku hydromotorem

$$Q_0 = V_0 \cdot n = 0,03936 \cdot 80 = 3,1[\text{dm}^3/\text{min}] \quad (12)$$

Výpočet objemové účinnosti:

$$\eta_v = \frac{Q_0}{Q_m} = \frac{3,1}{3,5} = 0,9 [-] \quad (13)$$

Výpočet hydromechanické účinnosti:

$$\eta_{hm} = \frac{M_t}{M} = \frac{10}{12,5} = 0,8[-] \quad (14)$$

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_{hm} = 0,72[-] \quad (15)$$

Z těchto rovnic jsme vypočítali průtok hydromotoru, objemovou účinnost, hydromechanickou účinnost a následně byla vypočítána celková účinnost. [1]

Tabulka 15 - Vypočtené hodnoty pro zátěž 10 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$p_m$ vyp. [bar]	M vyp. [N.m]	$\eta_v$ [-]	$\eta_{hm}$ [-]	$\eta_c$ [-]	$Q_0$ vyp. [dm <sup>3</sup> /min]
0	0	0				0
10	20	12,5	0,90	0,80	0,72	3,1
20	19	11,9	0,90	0,84	0,75	8,1
30	21	13,2	0,82	0,76	0,62	16,3
40	21	13,2	0,95	0,76	0,72	25,2
50	22	13,8	0,96	0,73	0,69	26,8

Pro krouticí moment 20 [Nm] a zdroj tlaku  $p_p=100$  [bar] byly naměřeny následující hodnoty:

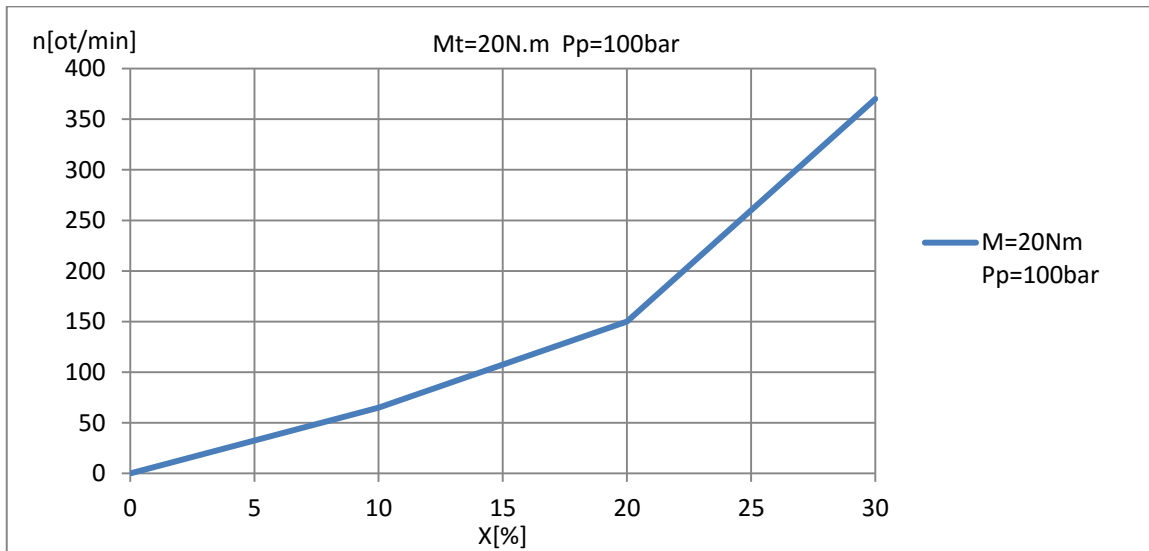
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty se zátěží 20 [Nm] a zdroj tlaku 100 [bar]

X [%]	$p_A$ [bar]	$p_B$ [bar]	$p_T$ [bar]	$p_P$ [bar]	$Q_m$ [dm <sup>3</sup> /min]	n [ot/min]
0	0	0	0	100	0	0
10	72	33	0	100	3,0	65
20	129	89	0,3	100	6,2	150
30	69	30	0,9	100	16,0	370



Tabulka 17 - Vypočtené hodnoty pro zátěž 20 [Nm] a zdroj tlaku 10 [bar]

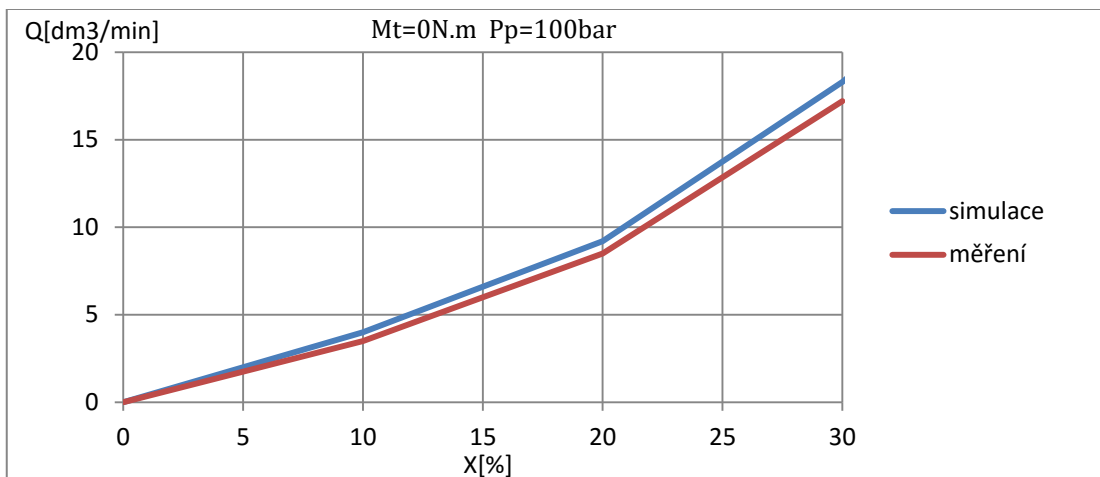
X [%]	$p_m$ vyp. [bar]	M vyp. [N.m]	$\eta_v$ [-]	$\eta_{hm}$ [-]	$\eta_c$ [-]	$Q_m$ vyp. [dm <sup>3</sup> /min]
0	0	0,0				0
10	39	24,4	0,85	0,82	0,70	2,6
20	40	25,1	0,95	0,80	0,76	5,9
30	39	24,4	0,91	0,82	0,75	14,6



Graf 7 - Závislost otáček na procentuálním otevření rozvaděče

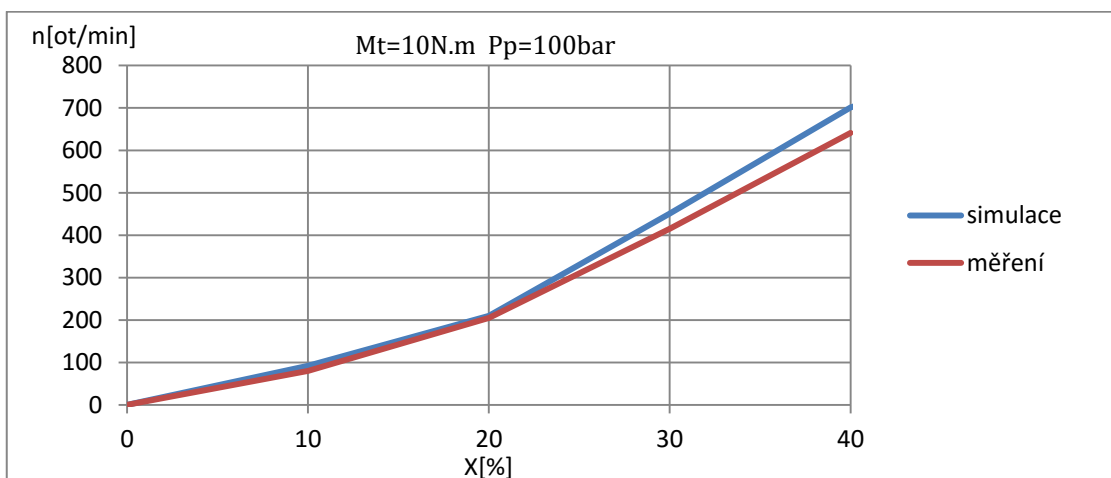
## 7 Porovnání výsledků

Porovnání měření a simulace pro nulovou zátěž a zdroj tlaku  $P_p$  100 [bar]. U toho měření nejsme schopni porovnat otáčky, protože snímač otáček byl odpojen. Pro srovnání byly použity průtoky ze simulace a měření (viz graf č. 8). Měření je možné porovnat pouze do 30 [%] otevření. Nejnižší odchylka byla při 30 [%] otevření, a to 6 [%]. Nejvyšší odchylka byla při 30 [%] otevření, a to 12,5 [%].



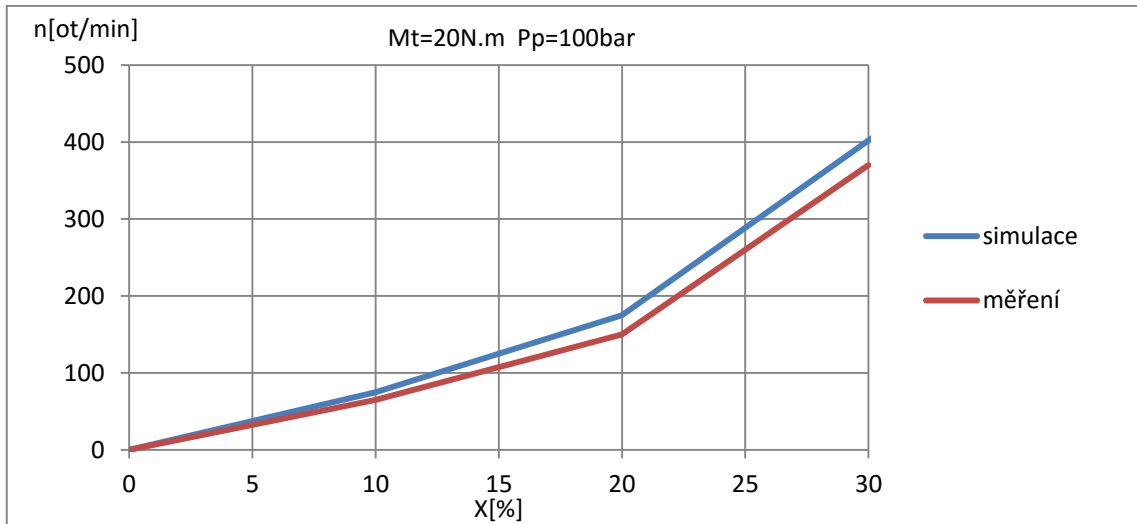
Graf 8 - Porovnání simulace a měření pro nulovou zátěž

Měření a simulace pro zátěž  $M_t$ , která byla 10 [Nm] a zdroj tlaku  $P_p$ , který byl nastaven na 100 [bar]. Při tomto měření jsme snímali otáčky pomocí servomotoru a následně byly porovnány se simulací (viz graf č. 9). Nejnižší odchylka byla při 20 [%] otevření, a to 2,4 [%]. Nejvyšší odchylka byla při 10 [%] otevření, a to 13 [%].



Graf 9 - Porovnání simulace a měření pro zátěž 10 [Nm]

Měření a simulace pro zátěž  $M_t$ , která byla 20 [Nm] a zdroj tlaku  $P_p$ , který byl nastaven na 100 [bar]. Při tomto měření jsme snímali otáčky pomocí servomotoru a následně byly porovnány se simulací (viz graf č. 10). Nejnižší odchylka byla při 20 [%] otevření, a to 4,8 [%]. Nejvyšší odchylka byla při 10 [%] otevření, a to 14,7 [%].



Graf 10 - Porovnání simulace a měření pro zátěž 20 [Nm]

## 8 Závěr

Výsledkem bakalářské práce bylo vytvoření simulačního schématu hydraulického obvodu, kde hlavními prvky jsou: proporcionální rozvaděč firmy Argo-hytos typu PRM7 a hydromotor Mrak 5 firmy Pelikán Vrchlabí. K úspěšnému splnění cílů bakalářské práce byly využity principy a znalosti z oblasti aplikované kybernetiky a hydraulických a pneumatických pohonů.

V této práci byly vytvořeny dvě simulační schéma, bez nichž by nebylo možné ověřit správnost výsledků. První simulační schéma uvedené na obrázku č. 22 posloužilo k vytvoření průtokové charakteristiky. Hodnoty se simulovaly pro čtyři různé tlakové spády rozvaděče  $\Delta p = (10, 50, 160, 320)$  [bar]. Průtok  $Q$  byl odečítán pro každý tlakový spád v závislosti na poloze  $x$  s krokem 5 [%]. Vznikl nám graf č. 1, který v porovnání s katalogovými hodnotami vychází shodně. Druhé simulační schéma (viz obrázek č. 24) bylo použito k simulaci se zátěží a k ověření výsledků z měření. Zdroj tlaku byl použit shodný, jako u měření pro hodnotu  $P_p = 100$  [bar], a postupné hodnoty zátěží  $M_t$  (0, 10, 20) [Nm]. Krok otevírání šoupátka byl nastaven na 10 [%] a vždy byly odečteny hodnoty tlakového spádu a průtoku. Simulace (viz tabulka č. 6) a měření s nulovou zátěží (viz tabulka č. 10) se nejvíce liší při malém otevření šoupátka. Pro 10 [%] otevření je průtok o 12,5 [%] nižší než simulace. Při zvyšování otevření se rozdíl průtoku snížil až na 6 [%] rozdíl při 30 [%] otevření rozvaděče. Velká odchylka byla způsobena vysokými vibracemi. Nad 40 [%] otevření zdroj tlaku klesl na  $P_p = 80$  [bar] (viz tabulka č. 11), to bylo způsobeno výkonovým omezením zdroje tlakové kapaliny. Měření probíhalo do 100 [%] otevření a průtok  $Q_m$  se ustálil kolem hodnoty 31,4 [dm<sup>3</sup>/min] a zdroj tlaku klesl až na  $P_p = 17$  [bar] (viz tabulka č. 11). Při zátěži  $M_t = 10$  [Nm] nám vyšly hodnoty otáček z měření (viz tabulka č. 13) a ze simulace (viz tabulka č. 7). Porovnání je možné pouze do 40 [%] otevření, protože při zvětšení otevření začne klesat tlak (viz tabulka č. 14). Velká odchylka byla zapříčiněna rozkmitáním hřídele a vypadáváním kroutícího momentu během měření. Při zátěži  $M_t = 20$  [Nm] nám vyšly hodnoty otáček z měření (viz tabulka č. 16) a nasimulované hodnoty otáček (viz tabulka č. 8). Toto měření bylo náročné, protože při zapnutí vznikaly velké rázy, docházelo k rozkmitání hřídele a vypadávání kroutícího momentu. Porovnání výsledků z měření a simulace bylo uvedeno v kapitole č. 7.

## 9 Použitá literatura

- [1] CERHA, Josef. *Hydraulické a pneumatické mechanismy I*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-560-0.
- [2] DUŠEK, František. *MATLAB a SIMULINK: úvod do používání*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2000. ISBN 80-7194-273-1.
- [3] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [4] PIVOŇKA, Josef. *Tekutinové mechanismy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. Typové číslo: L13-E1-V-31f/22656.
- [5] PROKEŠ, Josef a Jiří VOSTROVSKÝ. *Hydraulické a pneumatické mechanismy: vysokoškolská učebnice pro strojnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. Typové číslo: L13-C3-V-41/28842.
- [6] WATTON, John. *Fluid power systems: modeling, simulation, analog and microcomputer control*. New York ; Toronto: Prentice-Hall, 1989. ISBN 0-13-323213-1.
- Elektronické zdroje:
- [7] ARGO-HYTOS s.r.o. Proporcionální rozvaděč PRM 7-06: Katalog. In: *ARGO-HYTOS [online]*. 2/2014 [citováno: 28.12.2015]. Dostupné z: [http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user\\_upload/products/valves/downloads/Katalog\\_PRM7-06\\_hc5119\\_CZ\\_01.pdf](http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/products/valves/downloads/Katalog_PRM7-06_hc5119_CZ_01.pdf)
- [8] BD SENSORS. DMP 333: Katalogové listy. In: *BD SENSORS [online]*. © 2015, 1.11.2013 [citováno: 28.12.2015]. Dostupné z: [http://www.bdsensors.cz/fileadmin/user\\_upload/Download/Datenblaetter\\_datasheets/DMP333\\_CS.pdf](http://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Download/Datenblaetter_datasheets/DMP333_CS.pdf)
- [9] BD SENSORS. DMP 331: Katalogové listy. In: *BD SENSORS [online]*. ©2015, 31.7.2013 [citováno: 28.12.2015]. Dostupné z: [http://www.bdsensors.cz/fileadmin/user\\_upload/Download/Datenblaetter\\_datasheets/DMP331\\_CS.pdf](http://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Download/Datenblaetter_datasheets/DMP331_CS.pdf)
- [10] KTR-Group. ROTEX®GS: Operating/Assembly instructions. In: *KTR [online]*. Drawn: 7.10.2015, verified: 8.10.2015 [citováno: 28.12.2015]. Dostupné z: <https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Manuals/45510en000000.pdf>

- [11] Yaskawa Electric Corporation. Sigma II Series Servo System: User's Manual. *In: Yaskawa [online]*. September, 2009 [citováno: 28.12.2015]. Dostupné z: <https://www.yaskawa.com/pycprd/products/sigma5-servo-products/rotary-servo-motors/sgmgh/tab3/link30>
- [12] MATHWORKS: 4-Way Directional Valve. *In: MathWorks [online]*. © 1994 – 2016 [citováno: 26. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/4waydirectionalvalve.html>
- [13] ARGO-HYTOS s.r.o. Proporcionální rozvaděč PRM 7-06. *In: AGRO-HYTOS [online]*. [citováno: 26. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com/cz/vyrobky/ridici-a-regulacni-technika/proporcionalni-technika/prm7-06.html>
- [14] PELIKÁN VRCHLABÍ: Katalog hydromotoru MRAK 5. Katalogové číslo 336 331 50. Prosinec 1981 [citováno: 28. 12. 2015].
- [15] WEBER-HYDRAULIK: Proportional Directional Valve PVD3 and PVS3. *In: WEBER-HYDRAULIK [online]*. [citováno: 20. 1. 2016]. Dostupné z: [https://www.weber-hydraulik.com/en/produkte/ventile/?tx\\_anwendungen\\_products%5Bproduct%5D=4&tx\\_anwendungen\\_products%5Baction%5D=show&tx\\_anwendungen\\_products%5Bcontroller%5D=Product&cHash=043a534710e45ace5b76fb15b965b7bc](https://www.weber-hydraulik.com/en/produkte/ventile/?tx_anwendungen_products%5Bproduct%5D=4&tx_anwendungen_products%5Baction%5D=show&tx_anwendungen_products%5Bcontroller%5D=Product&cHash=043a534710e45ace5b76fb15b965b7bc)
- [16] MATHWORKS: Simscape. *In: MathWorks<sup>®</sup>[online]*. © 1994 – 2016 [citováno: 26. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/>

## **Seznam příloh**

Příloha 1 - Typy proporcionálních rozvaděčů [7]

Příloha 2 - Nasimulované výsledky proporcionálního rozvaděče

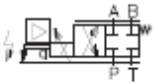
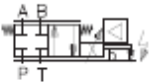
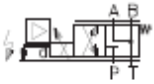
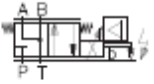
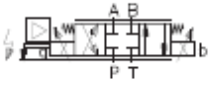

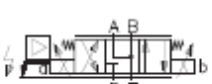

Příloha 3 - Prodloužení křivek

Příloha 4 - Proporcionální rozvaděč PRM7-063Z11/30-24E04S01 (Argo- Hytos) [7]

Příloha 5 - Tuhost pružiny [10]

# Přílohy

## Příloha 1 - Typy proporcionálních rozvaděčů [7]

Typový klíč	
PRM7-06 <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> - <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Proporcionální rozvaděč	Těsnění bez označení V
Jmenovitá světlost	NBR FPM (Viton)
Symboły	Provedení
 2Z51	S01 se snímačem polohy s napěťovým výstupem
 2Z11	S02 se snímačem polohy s proudovým výstupem
 3Y51	E01 proporcionální rozvaděč bez zpětné vazby
 2Y11	E02S01 prop. rozvaděč s polohovou zpětnou vazbou
 3Z11	E03 prop. rozvaděč s externí zpětnou vazbou
 $\frac{q_A}{q_B} = \frac{1}{2}^*$ 3Z12	E04S01 prop. rozvaděč s polohovou a externí zpětnou vazbou
 3Y11	
 $\frac{q_A}{q_B} = \frac{1}{2}^*$ 3Y12	
	Jmenovité napájecí napětí magnetů
	12 **napájecí napětí 12 V DC
	24 napájecí napětí 24 V DC
	**nelze dodat v provedení S02
	Jmenovitý průtok při $\Delta p = 10$ bar
05	5 dm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>
08	8 dm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>
15	15 dm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>
30	30 dm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>



Příloha 2 - Nasimulované výsledky proporcionálního rozvaděče

Pro tlakový spád:							
1 MPa		5 MPa		16 MPa		32 MPa	
x	Q	x	Q	x	Q	x	Q
1	28,5	1	52,5	1	29	1	22
0,95	28,25	0,95	52,25	0,95	29	0,95	22
0,9	28	0,9	52	0,9	29	0,9	22
0,85	27,5	0,85	50,75	0,85	29	0,85	22
0,8	27	0,8	49,5	0,8	29	0,8	22
0,75	26	0,75	47,25	0,75	29	1	22
0,7	25	0,7	45	0,7	29	0,7	22
0,65	23,5	0,65	43	0,65	29	0,65	22
0,6	22	0,6	41	0,6	29	0,6	22
0,55	19,5	0,55	38	0,55	29	0,55	22
0,5	17	0,5	35	0,5	29	0,5	22
0,45	15	0,45	32	0,45	29	0,45	22
0,4	13	0,4	29	0,4	29	0,4	22
0,35	11	0,35	23,5	0,35	29	0,35	22
0,3	9	0,3	18	0,3	29	0,3	22
0,25	7	0,25	13,5	0,25	23	0,25	22
0,2	5	0,2	9	0,2	17	0,2	22
0,15	4	0,15	6,5	0,15	10,75	0,15	14,5
0,1	3	0,1	4	0,1	4,5	0,1	7
0,05	1,5	0,05	2	0,05	2,25	0,05	3,5
0	0	0	0	0	0	0	0
-0,05	-1,5	-0,05	-2	-0,05	-2,25	-0,05	-3,5
-0,1	-3	-0,1	-4	-0,1	-4,5	-0,1	-7
-0,15	-4	-0,15	-6,5	-0,15	-10,75	-0,15	-14,5
-0,2	-5	-0,2	-9	-0,2	-17	-0,2	-22
-0,25	-7	-0,25	-13,5	-0,25	-23	-0,25	-22
-0,3	-9	-0,3	-18	-0,3	-29	-0,3	-22
-0,35	-11	-0,35	-23,5	-0,35	-29	-0,35	-22
-0,4	-13	-0,4	-29	-0,4	-29	-0,4	-22
-0,45	-15	-0,45	-32	-0,45	-29	-0,45	-22
-0,5	-17	-0,5	-35	-0,5	-29	-0,5	-22
-0,55	-19,5	-0,55	-38	-0,55	-29	-0,55	-22
-0,6	-22	-0,6	-41	-0,6	-29	-0,6	-22
-0,65	-23,5	-0,65	-43	-0,65	-29	-0,65	-22
-0,7	-25	-0,7	-45	-0,7	-29	-0,7	-22
-0,75	-26	-0,75	-47,25	-0,75	-29	-0,75	-22
-0,8	-27	-0,8	-49,5	-0,8	-29	-0,8	-22
-0,85	-27,5	-0,85	-50,75	-0,85	-29	-0,85	-22
-0,9	-28	-0,9	-52	-0,9	-29	-0,9	-22

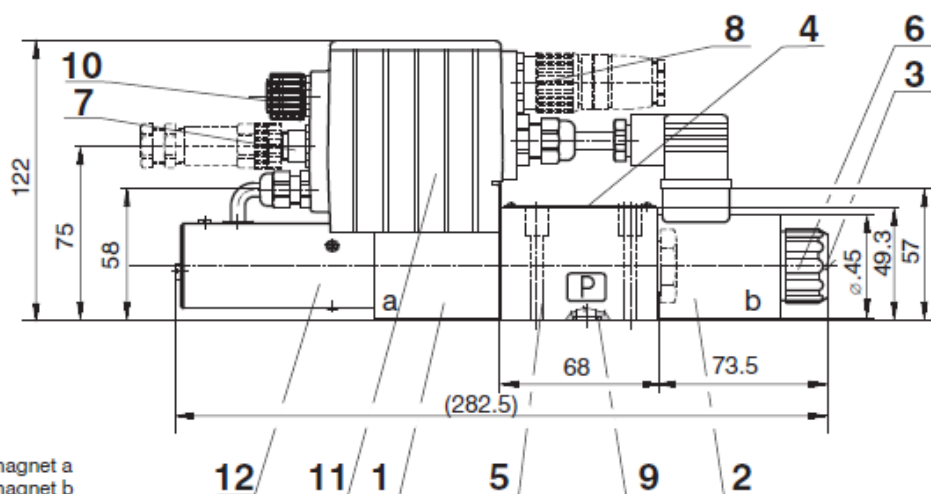
-0,95	-28,25	-0,95	-52,25	-0,95	-29	-0,95	-22
-1	-28,5	-1	-52,5	-1	-29	-1	-22

Příloha 3 - Prodloužení křivek

Pro tlakový spád:			
16 MPa		32 MPa	
x	Q	x	Q
1	79	1	86
0,95	78,5	0,95	85,5
0,9	78	0,9	85
0,85	75	0,85	82,5
0,8	72	0,8	80
0,75	69	0,75	77,5
0,7	66	0,7	75
0,65	63,5	0,65	72,5
0,6	61	0,6	70
0,55	58	0,55	66
0,5	55	0,5	62
0,45	50	0,45	56,5
0,4	45	0,4	51
0,35	39	0,35	45,5
0,3	33	0,3	40
0,25	25	0,25	31,5
0,2	17	0,2	23
0,15	10,75	0,15	15
0,1	4,5	0,1	7
0,05	2,25	0,05	3,5
0	0	0	0
-0,05	-2,25	-0,05	-3,5
-0,1	-4,5	-0,1	-7
-0,15	-10,75	-0,15	-14,5
-0,2	-17	-0,2	-23
-0,25	-25	-0,25	-31,5
-0,3	-33	-0,3	-40
-0,35	-39	-0,35	-45,5
-0,4	-45	-0,4	-51
-0,45	-50	-0,45	-56,5
-0,5	-55	-0,5	-62
-0,55	-58	-0,55	-66
-0,6	-61	-0,6	-70
-0,65	-63,5	-0,65	-72,5
-0,7	-66	-0,7	-75

-0,75	-69	-0,75	-77,5
-0,8	-72	-0,8	-80
-0,85	-75	-0,85	-82,5
-0,9	-78	-0,9	-85
-0,95	-78,5	-0,95	-85,5
-1	-79	-1	-86

Příloha 4 - Proporcionální rozvaděč PRM7-063Z11/30-24E04S01 (Argo- Hytos) [7]  
063 ... E02S01 - bez konektoru M12x1 externí zpětné vazby 063 ...  
E04S01



- 1 Elektromagnet a
- 2 Elektromagnet b
- 3 Nouzové ruční ovládání
- 4 Typový štítek
- 5 4 průchozí otvory pro upevnění rozvaděče
- 6 Upevňovací matice elektromagnetu
- 7 Konektor M12x1 pro připojení externí zpětné vazby
- 8 Hlavní napájecí konektor M23
- 9 Těsnicí kroužky 9.25 x 1.68 (4 ks), jsou součástí dodávky
- 10 Krytka konektoru M12x1 pro programování
- 11 Plastová krabička s integrovanou elektronikou
- 12 Snímač polohy

Příloha 5 – Tuhost pružiny [10]

Table 2: Torques and finish bores

Size	Spider <sup>1)</sup> (component 2) Rated torque [Nm]					Unbore d	Finish bore [mm] - hub design			
	80 ShA-GS	92 ShA-GS	98 ShA-GS	64 ShD-GS	72 ShD-GS		d <sub>min.</sub>	1.0 d <sub>max.</sub>	1.1, 1.2 d <sub>max.</sub>	2.0, 2.1 d <sub>max.</sub>
5	0.3	0.5	0.9	0.2 <sup>2)</sup>	-	-	2	-	6	5
7	0.7	1.2	2.0	2.4	-	-	3	7	7	7
8	0.5	-	2.0	2.4	-	-	-	-	-	-
9	1.8	3.0	5.0	6.0	-	-	4	10	11	11
12	3.0	5.0	9.0	12.0	-	-	4	12	12	12
13	3.6	-	11.0	14.5	-	-	-	-	-	-
14	4.0	7.5	12.5	16.0	-	-	5	16	16	16
16	5.0	-	15.0	19.0	-	-	-	-	-	-
								1.0, 1.1 d <sub>max.</sub>	2.5 d <sub>max.</sub>	2.6 d <sub>max.</sub>
19	6	12	21	26	-	x	6	24	24	24
24	-	35	60	75	97 <sup>3)</sup>	x	8	28	28	28
28	-	95	160	200	260 <sup>3)</sup>	x	10	38	38	38
38	-	190	325	405	525 <sup>3)</sup>	x	12	45	45	45
42	-	265	450	560	728 <sup>3)</sup>	x	14	55	50	45
48	-	310	525	655	852 <sup>3)</sup>	x	15	62	55	55
55	-	410	685	825	1072 <sup>3)</sup>	x	20	74	68	68
65	-	-	940	1175	1527 <sup>3)</sup>	x	22	80	70	70
75	-	-	1920	2400	3120 <sup>3)</sup>	x	30	95	80	80
90	-	-	3600	4500	5850 <sup>3)</sup>	-	40	110	90	90