

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Emulace dynamického chování laboratorní soustavy  
René Mrkva

Bakalářská práce  
2011

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **René MRKVA**  
Osobní číslo: **I07727**  
Studijní program: **B2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Název tématu: **Emulace dynamického chování laboratorní soustavy**  
Zadávací katedra: **Katedra informačních technologií**

### Zásady pro vypracování:

Cíl: Cílem je v prostředí MATLAB vytvořit dynamický model emulující chování laboratorní soustavy.

Obsah teoretické části: Model dynamického systému, matematicko-fyzikální analýza a experimentální identifikace.

Obsah implementační části: Pomocí Graphical User Interface vytvořit v prostředí MATLAB program, který bude emulovat chování hydraulicko-pneumatické laboratorní úlohy.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

\*MACHÁČEK, J., HONC, D., DUŠEK, F. Výukový laboratorní model hydraulickopneumatické soustavy. AUTOMA, 2005, . 8 ? 9, pp. 108 ? 109. ISSN 1210-9592

\*HONC, D., DUŠEK, F. Laboratory Plant for Control Experiments. In 7th International Scientific-Technical Conference Process Control 2006, Kouty nad Desnou, Czech Republic, June 13 - 16 2006. University of Pardubice, Pardubice, 2006, pp. 219 + CD ROM. ISBN 80-7194-860-8

\*DRÁBEK, O., MACHÁČEK, J. Experimentální identifikace. Skriptum, Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, vydání první, Pardubice, 1987.

\*DUŠEK, F., HONC, D. Matlab a Simulink, Úvod do používání. skriptum, Univerzita Pardubice, vydání první, Pardubice, 2005. ISBN 80-7194-776-8

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Daniel Honc, Ph.D.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce:

**17. prosince 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce:


**13. května 2011**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Lukáš Čegán, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 8. 8.2011

René Mrkva

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Danielu Honcovi, Ph.D za cenné rady a připomínky, za jeho čas, trpělivost a ochotu při řešení problémů vzniklých při zpracovávání této práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je věnována emulaci hydraulicko–pneumatické laboratorní úlohy. Model byl navržen a vytvořen na Katedře řízení a výpočetní techniky Univerzity Pardubice. Skládá se ze dvou dvojic hydraulických nádrží stejných výšek, ale různých průměrů.

Hlavním úkolem bylo vytvořit program emulující reálné chování laboratorní soustavy v prostředí MATLAB

## **Klíčová slova**

Experimentální identifikace, matematicko-fyzikální analýza, emulace, MATLAB

## **Title**

Emulation of laboratory plant dynamic behavior.

## **Annotation**

This thesis deals with dynamic behavior emulation of hydraulic-pneumatic laboratory plant. Model was designed and created at the Department of Process Control at University of Pardubice. The model consists of two pairs of hydraulic reservoir tanks with same height but different diameters.

The main task was to create a program that emulates the behavior of real laboratory systems in MATLAB.

## **Keywords**

Experimental identification, mathematical and physical analysis, emulation, MATLAB

## Obsah

<b>Seznam zkratek</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Úvodní informace</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Teoretická část</b> .....	<b>11</b>
2.1 Experimentální identifikace a matematicko-fyzikální analýza .....	11
2.2 Model hydraulicko-pneumatické soustavy .....	12
2.3 Numerické řešení diferenciálních rovnic.....	14
2.4 MATLAB (matrix laboratory).....	15
2.4.1 Úvod do MATLABu .....	15
2.4.2 Proměnné.....	16
2.4.3 2D grafika.....	17
2.4.4 M-file.....	17
2.4.5 Graphical User Interface.....	18
<b>3 Praktická část</b> .....	<b>18</b>
3.1 Konstrukční uspořádání hydraulicko-pneumatické soustavy.....	18
3.2 Propojení soustavy s počítačem.....	20
3.3 Dohledání neznámých parametrů .....	23
3.3.1 Statické charakteristiky čerpadel .....	24
3.3.2 Statické charakteristiky nádrží.....	26
3.3.3 Statické charakteristiky čidel tlaku.....	27
3.3.4 Specifikace konstrukčních parametrů a fyzikálních konstant .....	28
3.4 Emulační model HPS v MATLABu.....	28
3.4.1 Rozložení prvků aplikace .....	28
3.4.2 Funkce aplikace .....	31
3.5 Verifikace modelu .....	35
<b>4 Závěr</b> .....	<b>38</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>40</b>

## Seznam zkratk

HPS	Hydraulicko-pneumatická soustava
MATLAB	Matrix laboratory
PC	Personal komputer
GUI	Graphical User Interface
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení dynamických systémů .....	12
Obrázek 2 - Prostředí matlab .....	16
Obrázek 3 - Graf vytvořený příkazem plot.....	17
Obrázek 4 -Základní komponenty GUIDE.....	18
Obrázek 5 - Hydraulicko-pneumatická soustava.....	19
Obrázek 6 - Schéma hydraulicko-pneumatické soustavy.....	20
Obrázek 7 - Signály soustavy .....	21
Obrázek 8 - Aktivizační karta MF 614.....	22
Obrázek 9 - Připojení signálů pomocí standardní akviziční karty.....	23
Obrázek 10 - Charakteristika levého čerpadla.....	25
Obrázek 11 -Charakteristika pravého čerpadla .....	25
Obrázek 12 -charakteristika levé nádrže .....	26
Obrázek 13 - Charakteristika pravé nádrže .....	26
Obrázek 14 - Charakteristika levého čidla tlaku .....	27
Obrázek 15 - Charakteristika pravého čidla tlaku .....	27
Obrázek 16 - GUI HPS .....	30
Obrázek 17 - Ovládání konfigurace vzdušníku .....	31
Obrázek 18 - Ovládací panel běhu emulace .....	32
Obrázek 19 - Nastavení změn napětí čerpadel v čase .....	32
Obrázek 20 - Skoková změna napětí levého čerpadla.....	33
Obrázek 21 - Skoková změna pravého čerpadla .....	34
Obrázek 22 - Skokové změny napětí čerpadel .....	35
Obrázek 23- Ověření levé části modelu .....	36
Obrázek 24 - Ověření pravé části modelu .....	37

## Seznam tabulek

Tabulka 1- Naměřené hodnoty levé části soustavy .....	23
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pravé části soustavy .....	24
Tabulka 3 - Parametry čerpadel.....	24
Tabulka 4 - Parametry výtokových clon.....	26
Tabulka 5 - Parametry čidel tlaku.....	27
Tabulka 6 - Konstrukční rozměry soustavy.....	28
Tabulka 7 - Fyzikální konstanty .....	28

# 1 Úvodní informace

Cílem této bakalářské práce je získat matematicko – fyzikální popis laboratorní úlohy a na jeho základě sestavit dynamický model v prostředí MATLAB emulující chování reálné soustavy.

Teoretická část se zabývá možnostmi zkoumáním vlastností dynamických systémů, získáním popisu vlastností modelu pomocí matematicko – fyzikálních zákonitostí popisem prostředí MATLAB

V praktické části se budeme zabývat konstrukčním uspořádáním soustavy, propojením s počítačem, vypočítáme neznámé parametry, pro které provedeme praktický experiment pro získání potřebných údajů. Když budeme znát všechny potřebné parametry a závislosti můžeme přistoupit k samotné tvorbě programu pomocí Graphical User Interface v prostředí MATLAB. Na vytvořeném modelu provedeme simulaci shodnou s experimentem na reálné soustavě. Výsledky měření a simulace porovnáme a zdůvodníme případné rozdíly.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Experimentální identifikace a matematicko-fyzikální analýza

Cílem matematicko-fyzikální modelování je popsat chování procesu. Matematicko-fyzikální proces je souhrn matematických a fyzikálních procesů a prostředků na jejich realizaci (příslušných zařízení). V základním rozdělení metod se rozlišují metody analytické a experimentálně-statistické.

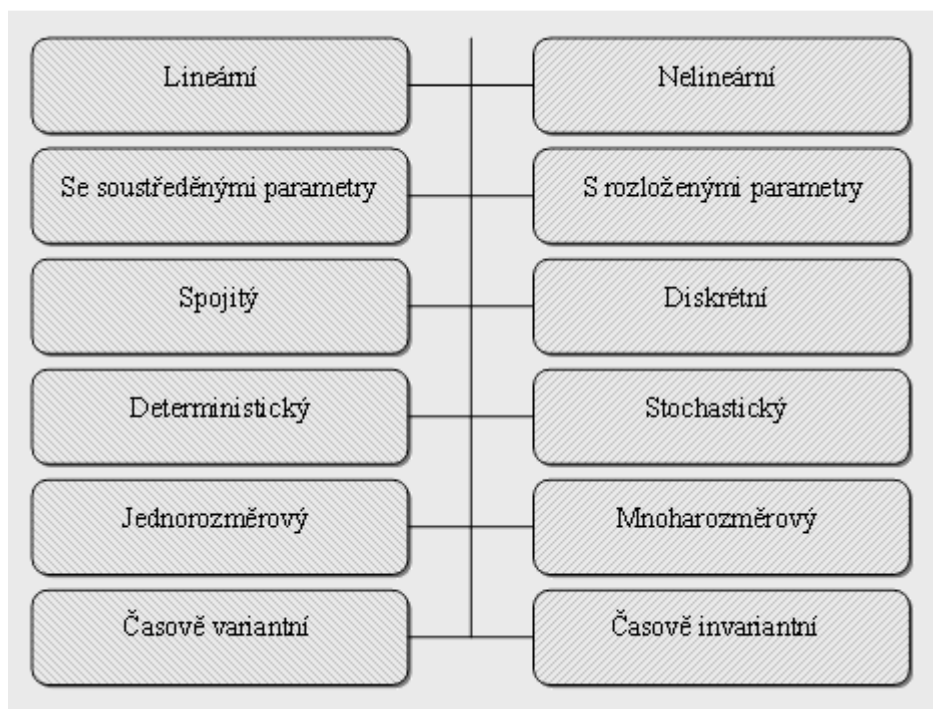
Analytické matematicko-fyzikální modely jsou odvozené na základě znalosti vnitřní struktury systémů, neboli přírodních zákonitostí probíhajících procesů a konstrukce zařízení. Je zřejmé, že ne všechny dílčí procesy probíhající v modelovaném objektu jsou známé. Ale i procesy známé jsou popsány pouze přibližně - matematické reprezentace přírodních zákonů jsou pouze aproximací reality. To znamená, že nikdy nejsme schopni dosáhnout úplné shody mezi chováním modelovaného objektu a jeho modelu. Navíc, v procesu modelování některé dílčí procesy i funkční závislosti zanedbáváme a zavádíme tzv. zjednodušující předpoklady za účelem získání jednoduššího modelu. Platí, že čím má být model přesnější a věrněji vystihovat realitu, tím je složitější. Modelování je tedy vždy kompromisem mezi složitostí a přesností. Modely sestavované za účelem návrhu nebo ověřování algoritmů řízení nemusí být zpravidla vysoce přesné z hlediska absolutních hodnot veličin. Musí však v každém případě vystihovat trendy statických i dynamických charakteristik procesu. Jejich výhodami je především respektování skutečných zákonitostí, fyzikální smysl parametrů systému a vystihnutí vlastností systému v širší oblasti. Analytické modely lze použít při návrhu řízení už v stádiu projekce. Jejich nevýhodou je složitost, nelineárnost získaných vztahů. Oborem použití analytických modelů jsou malé systémy, ve kterých je možné popsat jednotlivé procesy.

Experimentálně-statistické modely jsou odvozené z měření na reálných zařízeních. Při vytváření těchto modelů nemusí být vždy známá vnitřní struktura systému. Jestliže jsou předmětem zkoumání pouze vstupně-výstupní vztahy jde o tzv. princip černé skříňky. Předností experimentálně-statistických modelů je jejich jednoduchý tvar, lehké určení parametrů, možnost plánování experimentů, lehká statistická analýza chyb a jednoduchá optimalizace. Hlavními nevýhodami je možnost získat je až na reálném objektu, užší oblast použití, nemožnost nezávislého získání parametrů a skutečnost, že parametry nemají fyzikální smysl. Oborem použití experimentálně-statistických metod jsou nejčastěji složité a dostatečně neprobádané systémy.

Rozdělení dynamických systémů do tříd je na obr. 1. Lineární systémy jsou takové, u kterých jsou vzájemné vazby mezi veličinami lineární. U nelineárních systémů jsou tyto vazby (postačuje jejich část) nelineární. U systémů se soustředěnými parametry jsou jejich veličiny nezávislé na poloze v prostoru a jsou proměnné pouze v čase. Veličiny (nebo jejich část) systémů s rozloženými parametry jsou proměnné nejen v čase, ale i v prostoru a jsou tedy funkcemi času a minimálně jedné prostorové proměnné. Veličiny spojitých systémů jsou definovány na spojitém časovém intervalu a jsou funkcemi v čase spojitými. Veličiny diskretních systémů (nebo jejich část) jsou definovány na množině diskretních hodnot času a jsou tedy funkcemi v čase diskretními. Deterministické systémy jsou takové,

jejichž momentální stav (výstup) je jednoznačně určen předcházejícím stavem a působícím vstupem. Veličiny deterministických systémů patří do třídy tzv. deterministických funkcí. U stochastických systémů lze momentální stav (výstup) určit pouze s určitou pravděpodobností. Příslušnost systému do této třídy je většinou následkem působení náhodných veličin na vstupu. Systémy jednorozměrné mají jediný vstup a jediný výstup. Mnohorozměrné systémy jsou takové, které mají více než jeden vstup a minimálně jeden výstup (systém se dvěma vstupy a jedním výstupem už patří k mnohorozměrným systémům). Systémy časově variantní (t-variantní, nestacionární) mají parametry proměnné v čase. V důsledku toho se jejich vlastnosti v čase mění. Parametry systémů časově invariantních (t-invariantních, stacionárních) jsou v čase neměnné, vlastnosti systému se tedy v čase nemění.

Každý systém může na jedné horizontální linii patřit pouze do jedné třídy - nemůže být např. současně lineární i nelineární. Na vertikální linii ovšem patří do více tříd, a to i v horizontálním smyslu (systém např. může být současně nelineární, s rozloženými parametry, spojitý, deterministický, mnohorozměrný a časově invariantní).[4]



Obrázek 1 - Rozdělení dynamických systémů

## 2.2 Model hydraulicko-pneumatické soustavy

Na modelu lze měřit a regresními vztahy vyhodnocovat např. následující statické charakteristiky: vstupní napětí pro ovládnání čerpadla – vs. výška hladiny (měřená nepřímo snímačem tlaku nebo přímo měřítkem); vstupní napětí pro ovládnání čerpadla – vs. průtok vody (měřený objemem proteklým za určitou dobu), výška hladiny – vs. výstupní napětí čidla tlaku.

Nelineární model hydraulicko-pneumatické soustavy je sestaven na základě matematicko-fyzikální analýzy (aplikací fyzikálních zákonů při respektování konstrukčního uspořádání zařízení)[10]. Horní vzdušník je při všech experimentech otevřen do atmosféry (clonka je umístěna pouze v dolním vzdušníku). Výhodou tohoto zapojení je, že lze statické charakteristiky čerpadel uvažovat pouze jako funkce napájecího napětí. Kdyby byl horní vzdušník uzavřen clonkou, bylo by nutné u charakteristiky čerpadla uvažovat jako parametr také tlak v horním vzdušníku.

Při tvorbě modelu se vychází z těchto vztahů:

bilance hmoty založená na zákonu zachování hmoty:

$$Q_1 = Q_2 + \rho S \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

kde  $Q_1$  – je vstupní hmotnostní průtok kapaliny [ $\text{kg s}^{-1}$ ],  
 $Q_2$  – výstupní hmotnostní průtok kapaliny [ $\text{kg s}^{-1}$ ],  
 $\rho$  – hustota kapaliny [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  
 $S$  – průřez nádrže [ $\text{m}^2$ ],  
 $h$  – výška kapaliny [m].

Torriceliho rovnice (vycházející z Bernoulliho rovnice - zákon zachování energie)

$$Q = k_s \sqrt{2\rho} \sqrt{h\rho g + p_1 - p_2} \quad (2)$$

kde  $Q$  – je výstupní hmotnostní průtok kapaliny [ $\text{kg s}^{-1}$ ],  
 $k$  – výtokový součinitel [-],  
 $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ],  
 $p_1$  – tlak nad hladinou [pa].  
 $p_2$  – tlak pod hladinou [pa].

Dolní pneumatický objem je modelován na základě:

a) hmotnostní bilance vycházející ze zákona zachování hmoty

$$0 = Q_{cl} + \frac{d}{dt} (V_1 \rho_1) \quad (3)$$

kde  $Q_{cl}$  – je výstupní hmotnostní průtok vzduchu [ $\text{kg s}^{-1}$ ],  
 $V_1$  – objem vzdušníku plus objem vzduchu nad hladinami [ $\text{m}^3$ ],  
 $\rho_1$  – hustota vzduchu [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

b) aproximační rovnice pro výtok plynu otvorem (jedná se o zjednodušený tvar – lineární aproximaci poměrně komplikovaného vztahu)

$$Q_{cl} = k_{cl} s_{cl} (p_1 - p_a) \quad (4)$$

kde  $k_{cl}$  – je výtokový součinitel [ $\text{m s}^{-1}$ ],  
 $s_{cl}$  – průřez clonky [ $\text{m}^2$ ],

$p_1$  – tlak vzduchu v dolních pneumatických nádobách [pa],  
 $p_a$  – atmosférický tlak vzduchu.

c) stavové rovnice plynu

$$p_1 = \rho_1 r T \quad (5)$$

kde  $r$  – je měrná plynová konstanta [ $J K kg^{-1}$ ],  
 $T$  – teplota [K].

Z rovnic (3), (4) a (5) lze vyjádřit výslednou bilanční rovnicí ve tvaru:

$$\frac{d(V_1 p_1)}{dt} = k_{cl} S_{cl} r T (p_1 - p_a) \quad (6)$$

Pro dolní pneumatický objem platí vztah

$$V_1 = S_1 (H - h_{dl}) + V_{cl} + S_r (H - h_{dr}) \quad (7)$$

kde  $H$  – výška nádrží [m],  
 $V_{cl}$  – objem dolního vzdušníku [ $m^3$ ].

Statická charakteristika čerpadel je uvažována ve tvaru:

$$Q = a(u - \tilde{u})^b \quad (8)$$

kde  $\tilde{u}$  – napětí čerpadla odpovídající nulovému průtoku [V],  
 $u$  – vstupní napěťový signál pro čerpadlo [V],  
 $a, b$  – konstanty čerpadla.

Statická charakteristika čidel tlaku má tvar

$$y = c h + d \quad (9)$$

kde  $y$  – výstupní napětí čidla tlaku [V],  
 $h$  – výška hladiny v nádrži [m],  
 $c, d$  – konstanty čidla tlaku.

### 2.3 Numerické řešení diferenciálních rovnic

Řešení diferenciálních rovnic numerickými metodami se hojně uplatňuje ve všech možných technických disciplínách, poněvadž na diferenciální rovnice vede velké množství praktických problémů. Řadu z těchto rovnic nelze řešit exaktně, poněvadž jsou buď nelineární, nebo příliš složité. I v případě, že analytické řešení existuje, může být tak složité, že numerické řešení představuje dobrou alternativu.

Diferenciální rovnici prvního řádu můžeme vždy zapsat obecně v implicitním tvaru:

$$F(x, y, y') = 0 \quad (10)$$

a v mnoha případech i ve tvaru explicitním, tedy:

$$y' = f(x, y). \quad (11)$$

Hovoříme-li o počáteční úloze, musíme ještě doplnit počáteční podmínku, kterou řešení musí splňovat. Tu uvádíme nejčastěji ve tvaru

$$y(x_0) = y_0 \quad (12)$$

Přirozeně budeme předpokládat, že problém má na nějakém intervalu obsahujícím bod  $x_0$  jednoznačné řešení. Numerické metody, které pro řešení uvedených rovnic používáme, patří k metodám „krok za krokem“. S řešením se začíná vždy v bodě  $x_0$  a pokračuje se po krocích, při čemž se přibližně určují hodnoty funkce  $y$  v bodech  $x_1 = x_0 + h_1$ ,  $x_2 = x_1 + h_2$ ,  $x_3 = x_2 + h_3$  atd. Samozřejmě, že kroky  $h_1, h_2, h_3$  mohou nabývat jak kladných, tak i záporných hodnot. Velmi často používáme konstantní krok  $h$ , takže jednotlivé body „sítě“ můžeme určovat pomocí jednoduchého předpisu:

$$x_i = x_0 + i \cdot h, i = 1, \dots, n \quad (13)$$

Zvolíme-li konkrétní metodu řešení, výpočet funkční hodnoty  $y_i$  v každém bodě  $x_i$  probíhá pomocí stejného algoritmu. Tento algoritmus se odvozuje z Taylorova rozvoje dané funkce v bodě, jenž má známý tvar

$$y(x + h) = y(x) + h * \frac{y'(x)}{1!} + h^2 * \frac{y''(x)}{2!} + \dots \quad (14)$$

Druhy chyb se rozlišují mezi diskretizační a chyby zaokrouhlovací. Diskretizační chyby souvisejí s řádem metody a mohou být globální nebo lokální. Diskretizační chyby se zmenšují se zmenšujícím krokem. Chyby zaokrouhlovací (problém počítání s příliš malými čísly) se naopak zvětšují se zmenšujícím krokem. Optimální krok metody je proto kompromis už jenom z praktického důvodu, že nechceme na výsledky čekat příliš dlouho.[9] [1]

## 2.4 MATLAB (matrix laboratory)

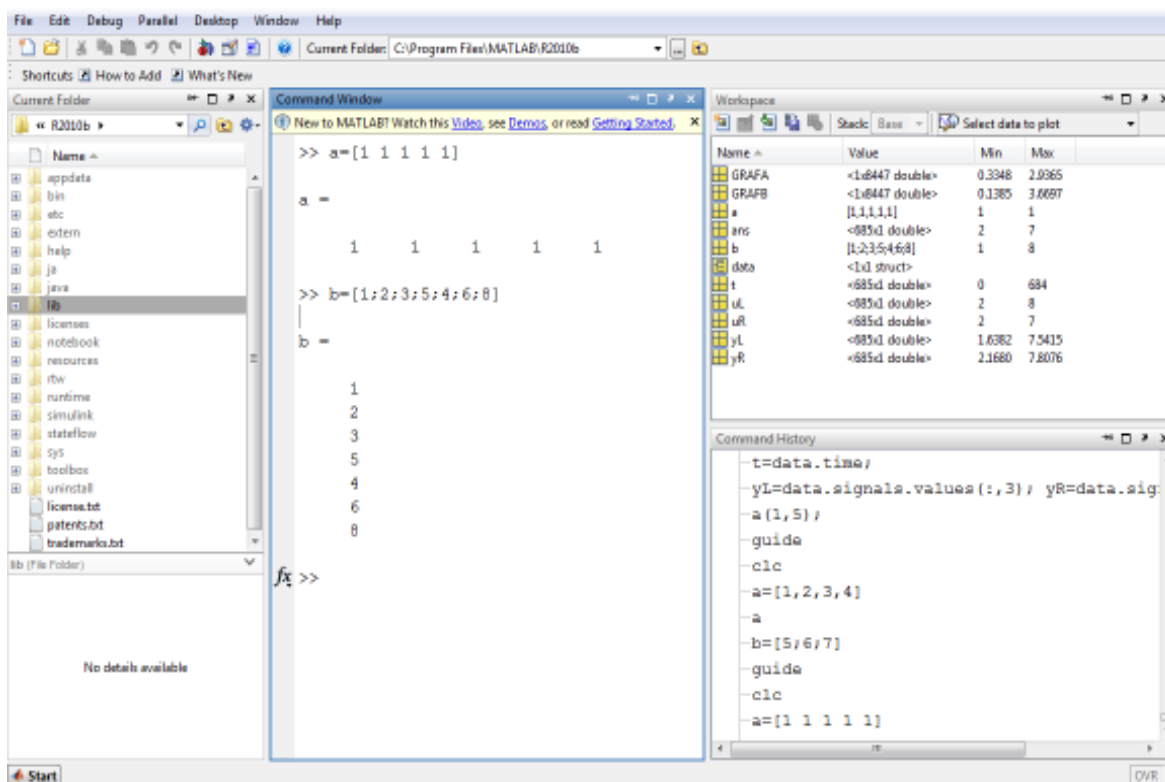
### 2.4.1 Úvod do MATLABu

MATLAB je interaktivní programové prostředí a skriptovací jazyk. Původně byl jazyk určen pro matematické účely, ale časem se rozrostl a dnes je využitelný v široké škále aplikací. Umožňuje práce s maticemi, vykreslování 2D a 3D grafů, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat a vytváření aplikací včetně uživatelského rozhraní.

Standardní části programu:

- Command window - hlavní a nejdůležitější částí pracovní plochy (desktopu). V tomto okně uživatel zapisuje jednotlivé příkazy a je v něm zobrazena odezva a různá systémová hlášení MATLABu.

- Workspace - Okno Workspace je při prvním spuštění MATLABu prázdné. Veškeré proměnné, které v průběhu práce uživatel nadefinuje, se zobrazují v tomto okně. Okno obsahuje vždy úplný seznam všech typů proměnných. Poklepaním myši na některé z nich je možné zobrazit detailní informace (rozměr, struktura apod.).
- Command History – zde se zobrazují všechny příkazy, zapsané uživatelem v hlavním okně Command Window. Chce-li uživatel použít již jednou zapsaný příkaz (nebo i celou sekvenci příkazů), stačí jej v tomto okně jednoduše nalistovat a poklepaním znovu aktivovat. Je také možné jej myši přetáhnout do hlavního okna. Přímo v hlavním okně.
- Current Folder - zobrazení seznamu souborů v aktuální složce. Poklepaním myši na některém ze souborů je možné jej otevřít. Způsob otevření souboru je závislý na jeho typu, např. soubory s příponou MAT jsou otevírány ve vestavěném editoru. Aktuální složka (Current Directory) je zobrazena nad oknem Command Window. Aktuální složku je samozřejmě možné také změnit, implicitně je nastavena do složky C:\Documents and Settings\User\Dokumenty\MATLAB, přičemž složka User v uváděné cestě odpovídá označení uživatelského účtu v konkrétní instalaci systému Windows.[5]



Obrázek 2 - Prostředí MATLAB

## 2.4.2 Proměnné

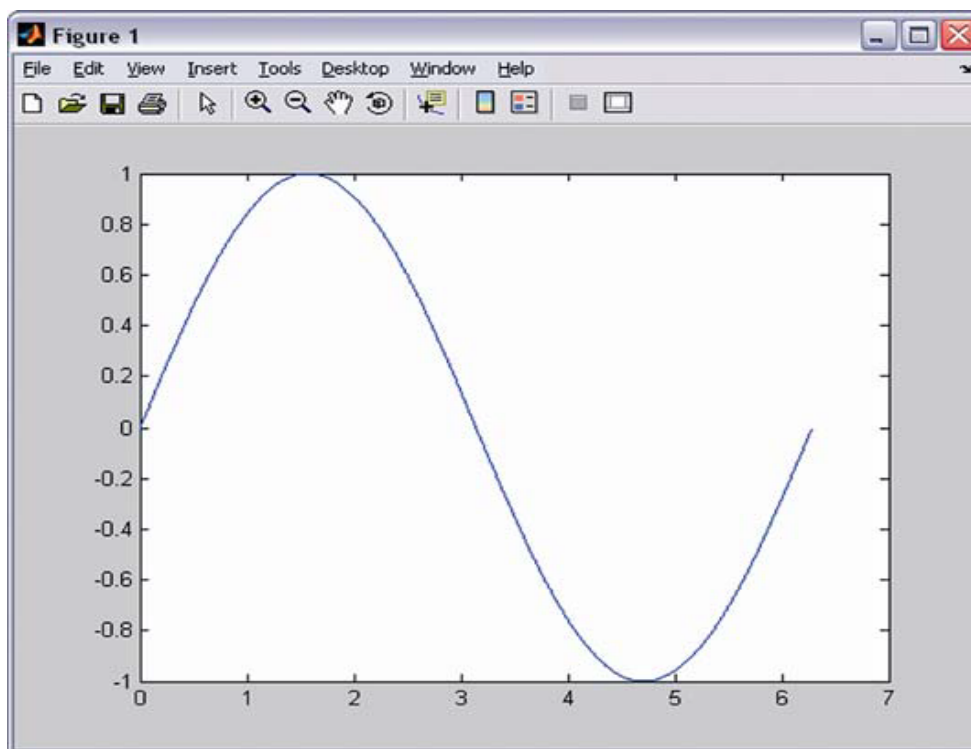
Proměnná v prostředí MATLAB se může skládat až z 63 znaků, další jsou ignorovány. V názvu proměnné se rozlišují malá a velká písmena (je case sensitive), jména proměnných musí začínat písmenem a nesmí obsahovat tečku. MATLAB má slabou



dynamickou typovou kontrolu. Což znamená, že proměnné v MATLABu po deklaraci nemají určený datový typ. Můžou měnit svůj typ během existence. Je možné do jedné proměnné uložit řetězec a následně ji přepsat číslem typu integer. Dynamické typování je pohodlnější ale více náchylné na tvorbu chyb.[2]

### 2.4.3 2D grafika

Grafický subsystém prostředí MATLAB umožňuje přehlednou prezentaci výsledků získaných výpočtem nebo na základě měření. Je možné vykreslit různé druhy grafů: dvourozměrné pro funkce jedné proměnné, třírozměrné pro funkce dvou proměnných, histogramy, koláčové grafy a mnoho dalších. Všem grafickým objektům je možné téměř libovolně měnit vzhled, a to jak již při jejich vytváření, tak i po jejich vykreslení. Vzhled grafických objektů je možno měnit interaktivně, pomocí lišty nástrojů umístěné pod záhlavím obrázku. Základním příkazem pro vykreslování 2D grafů v prostředí MATLABu je plot. Obecná syntaxe příkazu plot má tento tvar: plot(x, y, <barva><značky><typ čáry>).



Obrázek 3 - Graf vytvořený příkazem plot

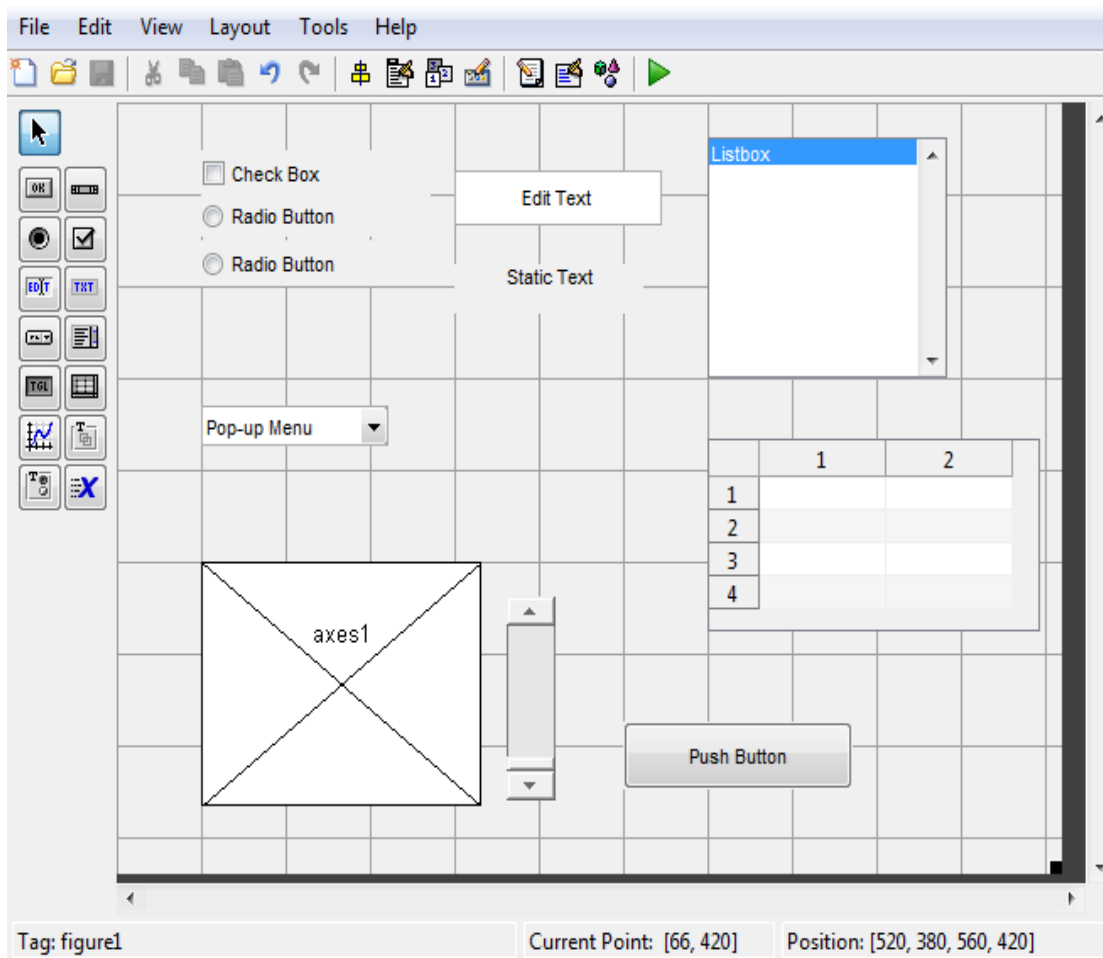
### 2.4.4 M-file

Soubory s koncovkou \*.m obsahují definice funkcí, skriptů nebo tříd. Sami si můžete m-files vytvářet a tak přidávat do MATLABu nové funkce a rozšiřovat tak jeho využití. Název funkce v m-filu musí být stejný jako název souboru. U funkce si nastavíte vstupní parametry a návratové hodnoty, následný komentář, slouží jako nápověda, popisující k čemu daná funkce slouží.[2]

## 2.4.5 Graphical User Interface

Prostředí, které umožňuje vytvářet aplikace s grafickým rozhraním, se nazývá GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Vzhled vytvořené GUI aplikace je ukládán do souboru s příponou \*.fig a jeho zdrojový kód s příponou \*.m

Spuštění průvodce pro tvorbu GUI aplikací je možné více způsoby. Jedním z nich je využít základní menu File/New/GUI nebo zápisem a potvrzením příkazu guide v hlavním prostředí MATLABu. GUIDE umožňuje vytvářet a editovat uživatelské rozhraní pomocí základních komponent, které vidíte na obrázku.[2]

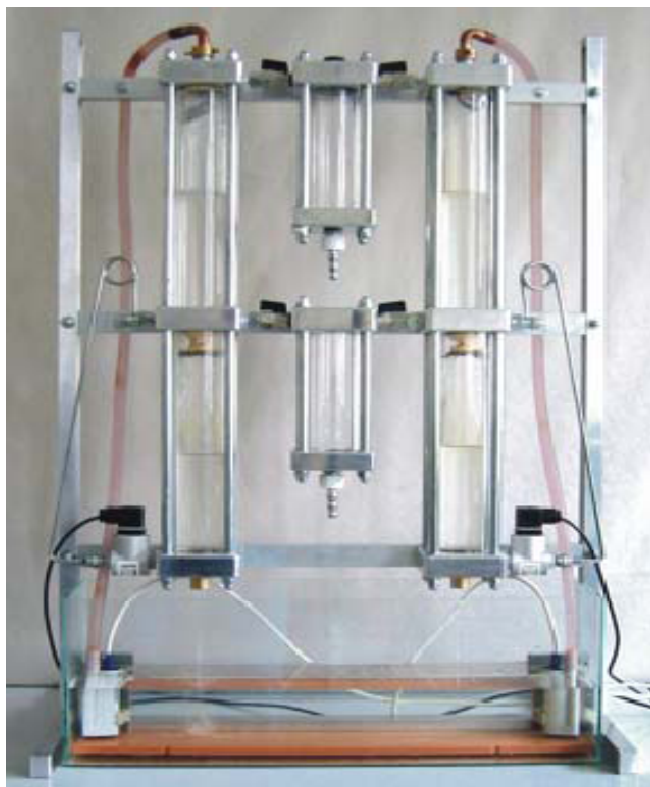


Obrázek 4 -Základní komponenty GUIDE

## 3 Praktická část

### 3.1 Konstrukční uspořádání hydraulicko-pneumatické soustavy

Laboratorní zařízení hydraulicko-pneumatická soustava (HPS) bylo navrženo a vyrobeno na Katedře řízení a výpočetní techniky Univerzity Pardubice (obrázek 5)

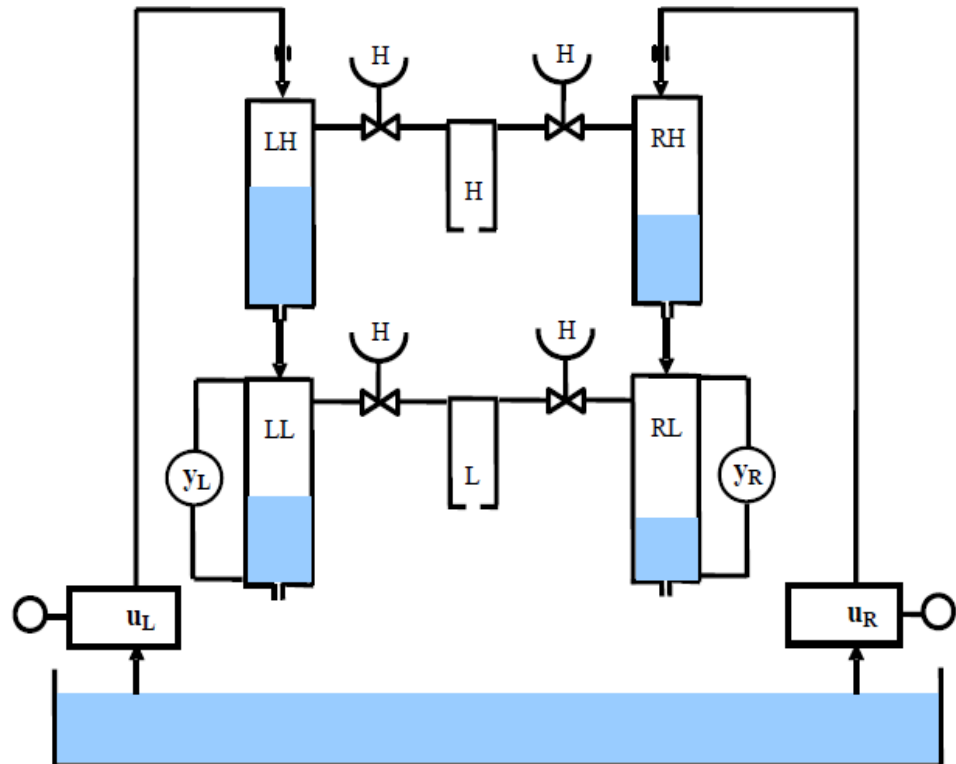


**Obrázek 5 - Hydraulicko-pneumatická soustava**

Model tvoří dvě dvojice hydraulických nádrží, které jsou umístěny nad sebou (obrázek 6). Výška je u všech nádob stejná, průměry pravých nádrží jsou menší, průměry výtokových clonek jsou stejné. Ze zásobovací nádrže je voda pomocí čerpadel čerpána do horních nádrží. Voda zde protéká přes clonky ve dnech nádrží nejprve do spodních a poté do zpět do zásobovací nádrže. Horní i spodní dvojice atmosférických objemů nádrží jsou propojeny a jsou zde umístěny vzdušníky. Ve dnech vzdušníků může být umístěna clonka, jako omezené propojení s atmosférou. Při skokové změně průtoku jednoho čerpadla dojde k zvýšení hladiny v nádržích. Protože jsou pneumaticky uzavřeny a propojeny dojde k změně tlaku a k ovlivnění výšky hladiny sousední nádrže. Protože jsou ve vzdušnicích umístěny clonky, dochází k postupnému úbytku tlaku a po čase se vyrovná s atmosférickým.

Ručně ovládanými kohouty lze volit různé konfigurace soustavy. Clonkou ve vzdušniku lze měnit dynamické vlastnosti soustavy (s menší clonkou trvá déle, než se vyrovná tlak ve vzdušniku s atmosférickým tlakem). Pokud nepoužijeme clonku, vazba mezi nádržemi zaniká a v nádržích bude stále atmosférický tlak. Můžeme také místo clonky použít záslepku. Kombinací nastavení ventilů a clonek můžeme dosáhnout různého chování soustavy

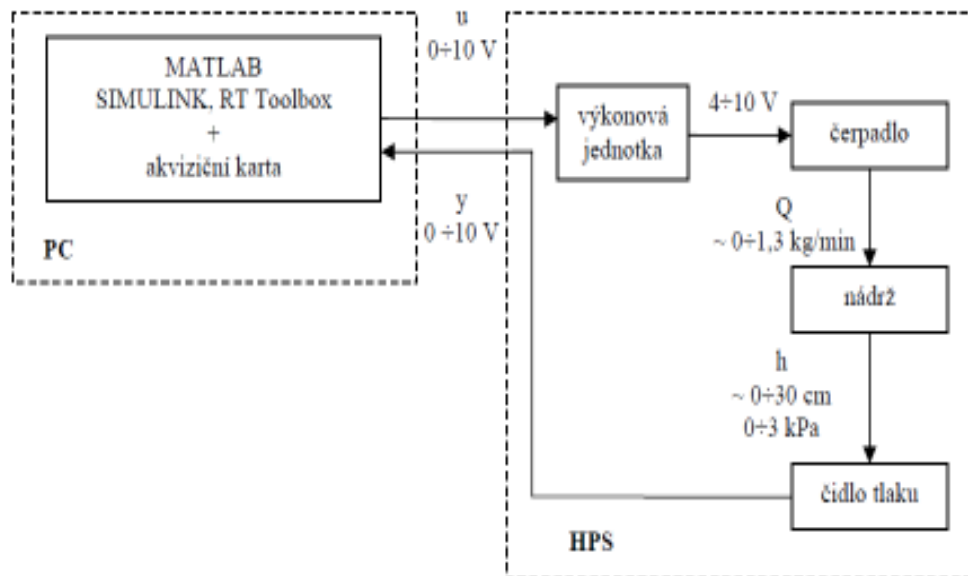
Hladiny v dolních nádobách se měří snímači rozdílu tlaku s rozsahem 0 až 3 kPa a výstupním signálem 0 až 10 V. Ovládací signál obou čerpadel je 0 až 10 V.[3]



Obrázek 6 - Schéma hydraulicko-pneumatické soustavy

### 3.2 Propojení soustavy s počítačem

Výstupními hodnotami výšky hladin jsou napěťové signály v rozmezí 0, až 10 V. Průtoky v obou částech soustavy se ovládají pomocí napětí čerpadel. Vstupní napětí v rozsahu 0 až 10 V je ve výkonových akčních členech převedeno na rozsah 4 až 10 V. Signály lze připojit buď pomocí standardní akviziční karty, nebo pomocí přístroje CTRL. V obou případech je nezbytná programová podpora technického připojení, dovolující číst a nastavovat příslušné signály z prostředí MATLAB. [3]



Obrázek 7 - Signály soustavy

U přístroje CTRL V3 je programové řešení postaveno na standardních funkcích MATLABu (od verze 6.0) pro práci se sériovou linkou. S přístrojem jsou dodávány uživatelské m-funkce, dovolující otevřít a zavřít použitý sériový port, změřit napětí na všech vstupech, nastavit napětí na výstupech a zvolit periodu reálného času. Připojení tímto způsobem je levné a lehce přenositelné na jiný počítač, ale je poněkud náročnější na uživatele z hlediska používání prostředí MATLAB/Simulink. [3][7]

K měření jsme použili akvizice kartu MF 614, kterou poskytuje společnost Humusoft.

Karta MF614 nabízí:

- 12 - bitový převodník s dobou převodu 10ms
- 8 - mi kanálový multiplexor s ochranou vstupů
- Programově volitelné rozsahy vstupních napětí:  $\pm 10\text{ V}$ ,  $\pm 5\text{ V}$ ,  $0 - 10\text{ V}$ ,  $0 - 5\text{ V}$
- Čtyři 12 - ti bitové D/A převodníky s výstupním rozsahem  $\pm 10\text{ V}$
- Vzorkovací frekvence: do 100kHz 12 bit A/D převodník.
- 8 digitálních vstupů a 8 digitálních výstupů.
- Vnitřní časovače.

Analogové vstupy:

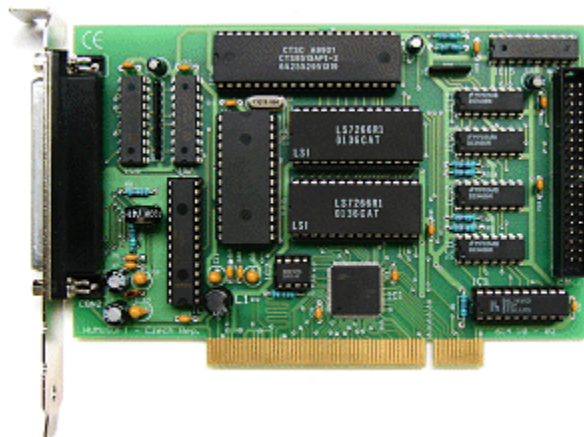
- Kanály: 8 se společnou zemí (AD0 - AD7),
- A/D převodník: 12 - bitový, doba převodu 10 ms,
- Vstupní rozsahy (programově volitelné)  $\pm 10\text{ V}$ ,  $\pm 5\text{ V}$ ,  $0 - 10\text{ V}$ ,  $0 - 5\text{ V}$
- Spouštění: programově.

Analogové výstupy:

- Kanály: 4, 12-bitů (DA0 – DA3),
- Výstupní rozsahy: (programově volitelné)  $\pm 10\text{ V}$ ,  $\pm 5\text{ V}$ ,  $0 - 10\text{ V}$ ,  $0 - 5\text{ V}$
- Výstupní proud:  $10\text{ mA max.}$

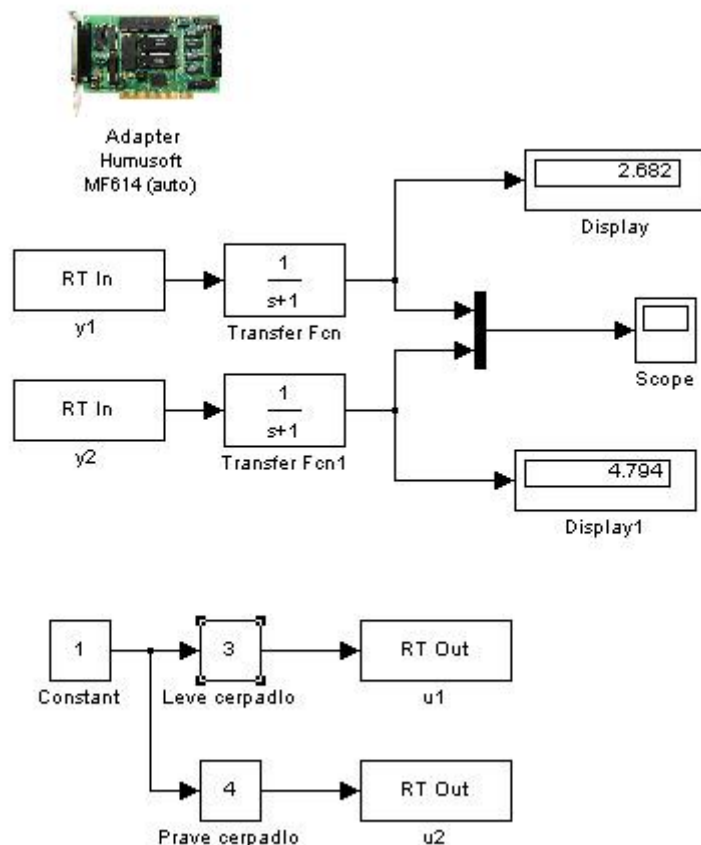
Digitální vstupy/výstupy:

- Počet vstupních kanálů: 8 TTL
- Počet výstupních kanálů: 8 TTL [8]



**Obrázek 8 - Aktivizační karta MF 614**

Programová obsluha karty v MATLABu je řešena pomocí Real Time Toolboxu fy Humusoft.



Obrázek 9 - Připojení signálů pomocí standardní akviziční karty

### 3.3 Dohledání neznámých parametrů

Jednoduchým experimentem jsou změřeny statické charakteristiky čidel tlaku, nádrží a čerpadel. Při konfiguraci soustavy, kdy oba vzdušníky jsou otevřené do atmosféry, postupně zvyšujeme napětí čerpadel. Vždy necháme hladiny nádrží ustálit a změříme průtok, výšku hladiny a napětí čidel tlaku.

Tabulka 1- Naměřené hodnoty levé části soustavy

$u_L$ (V)	$t$ (s)	$V$ (ml)	$Q_L$ (kg/s)	$h_L$ (m)	$y_L$ (V)
0,4	0	0	0	0	0,4
1	14	82	0,005857	0,002	0,6
2	9,1	85	0,009341	0,045	1,6
3	5,9	76	0,012881	0,078	2,6
4	5,6	86	0,015357	0,116	3,9
5	4,4	79	0,017955	0,154	5,2
6	4,6	90	0,019565	0,191	6,4
7	4	87	0,02175	0,229	7,6
8	Nelze změřit, hrozí přetečení				

**Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pravé části soustavy**

$u_R$ (V)	$t$ (s)	$V$ (ml)	$Q_R$ (kg/s)	$h_R$ (m)	$y_R$ (V)
0	0	0	0	0	0,3
1	10,8	77	0,00713	0,033	1,1
2	7,6	87	0,011447	0,077	2,6
3	6,5	88	0,013538	0,12	3,9
4	5,3	83	0,01566	0,16	5,3
5	4,8	90	0,01875	0,204	6,7
6	4,8	98	0,020417	0,257	8,5
7	Nelze měřit, hrozí přetečení				

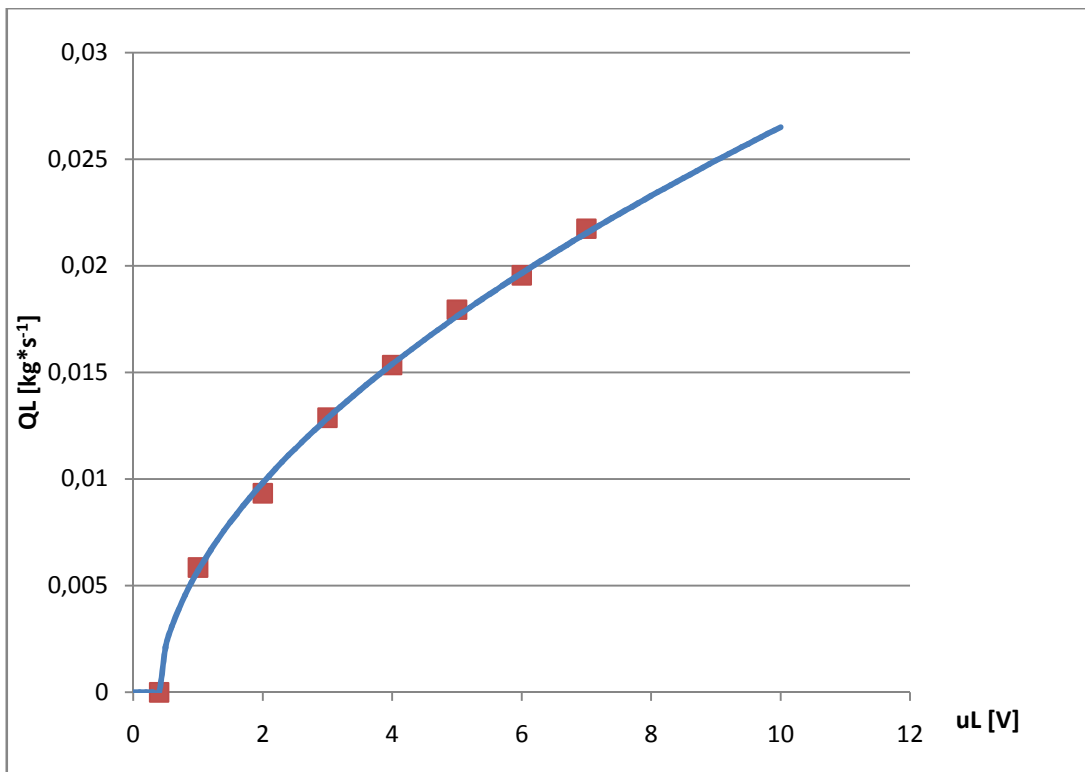
### 3.3.1 Statické charakteristiky čerpadel

Z naměřeného průtoku a vstupního napětí čerpadla jsou mocninou regresí vypočítány parametry  $a$ ,  $b$ .  $\hat{u}$  odpovídá vstupnímu napětí čerpadla, kdy kapalina začíná přitékat do nádrží.

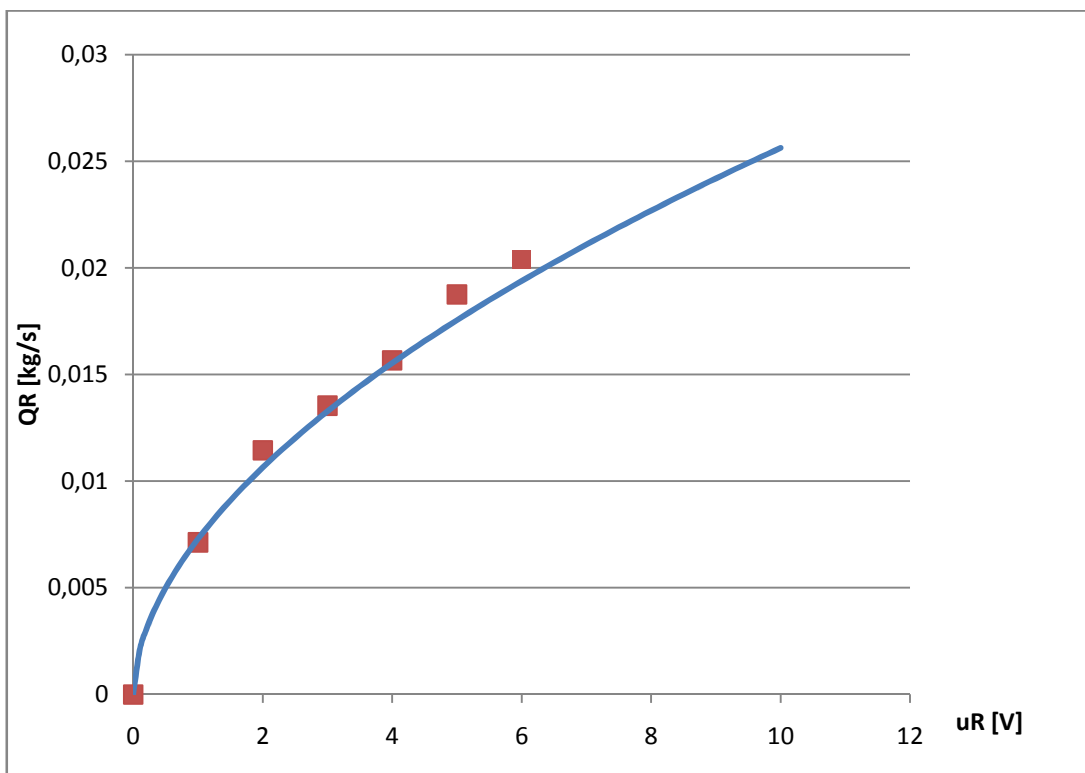
**Tabulka 3 - Parametry čerpadel**

Umístění	$a$	$B$	$\hat{u}$
Levé	$7,5679 \cdot 10^{-3}$	0,5542	0,4
Pravé	$7,2832 \cdot 10^{-3}$	0,5465	0





Obrázek 10 - Charakteristika levého čerpadla



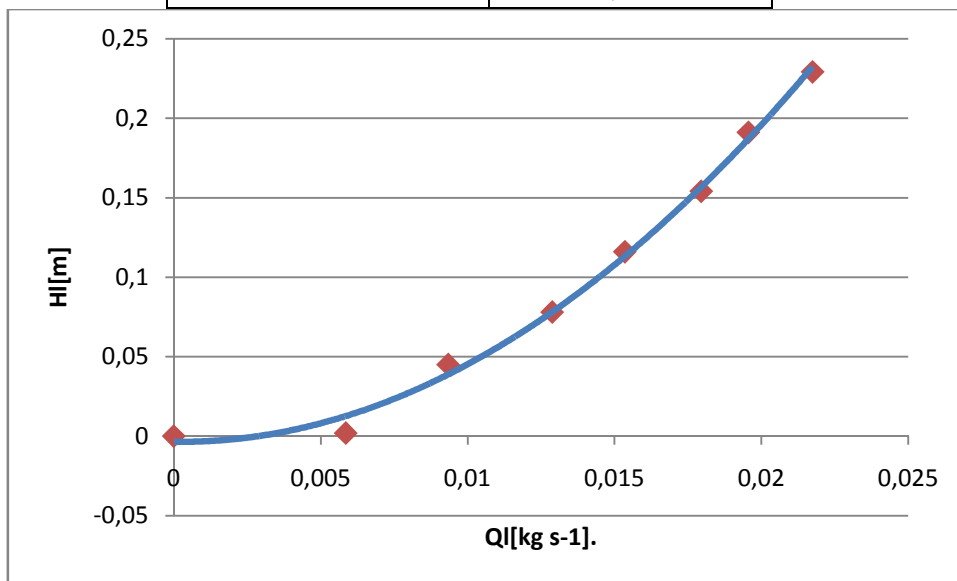
Obrázek 11 - Charakteristika pravého čerpadla

### 3.3.2 Statické charakteristiky nádrží

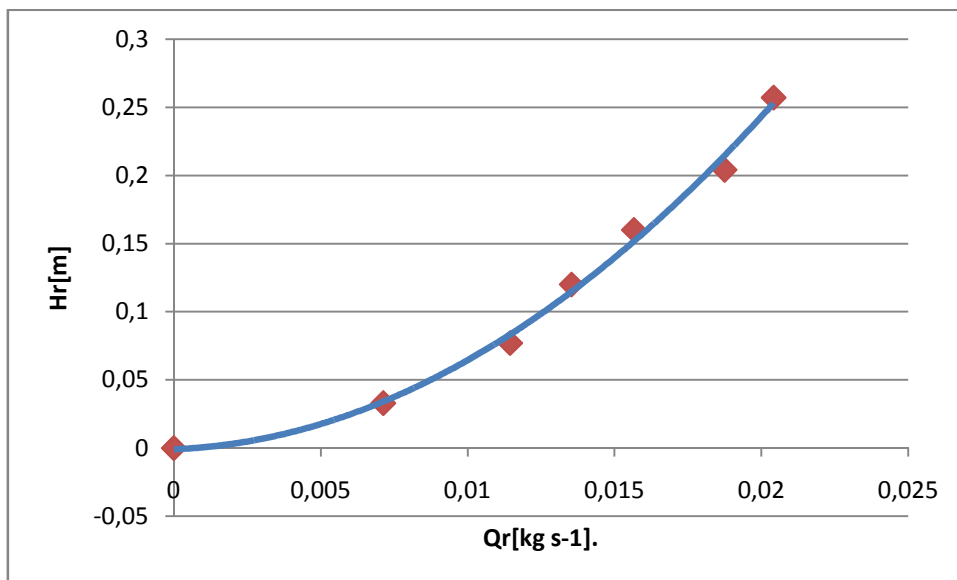
Z naměřených hodnot průtoků a výšek hladin jsou vypočítány parametry  $k$ . Tlaky  $p_1$  a  $p_2$  jsou rovny atmosférickému tlaku.

Tabulka 4 - Parametry výtokových clon

Umístění	$k$
Levé	0,802
Pravé	0,720



Obrázek 12 - charakteristika levé nádrže



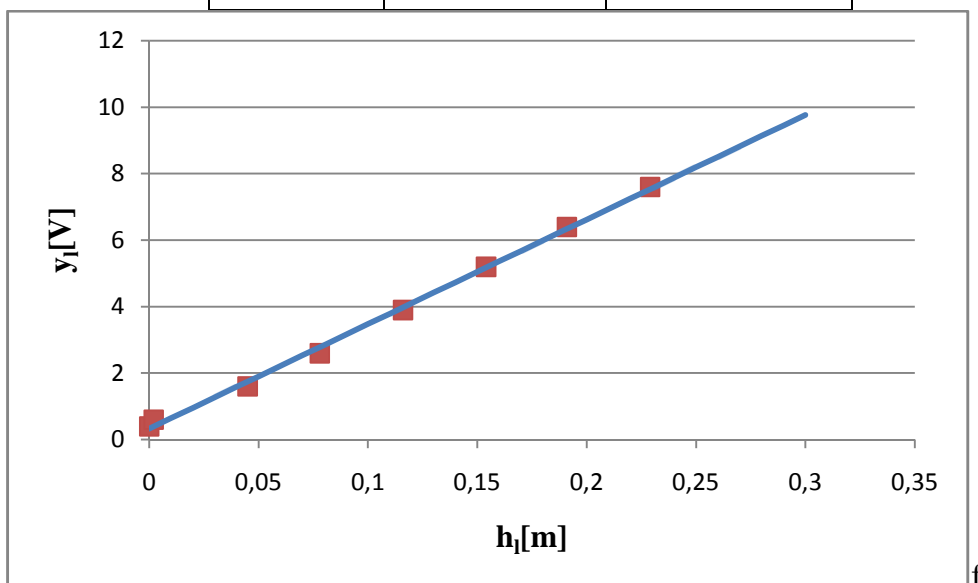
Obrázek 13 - Charakteristika pravé nádrže

### 3.3.3 Statické charakteristiky čidel tlaku

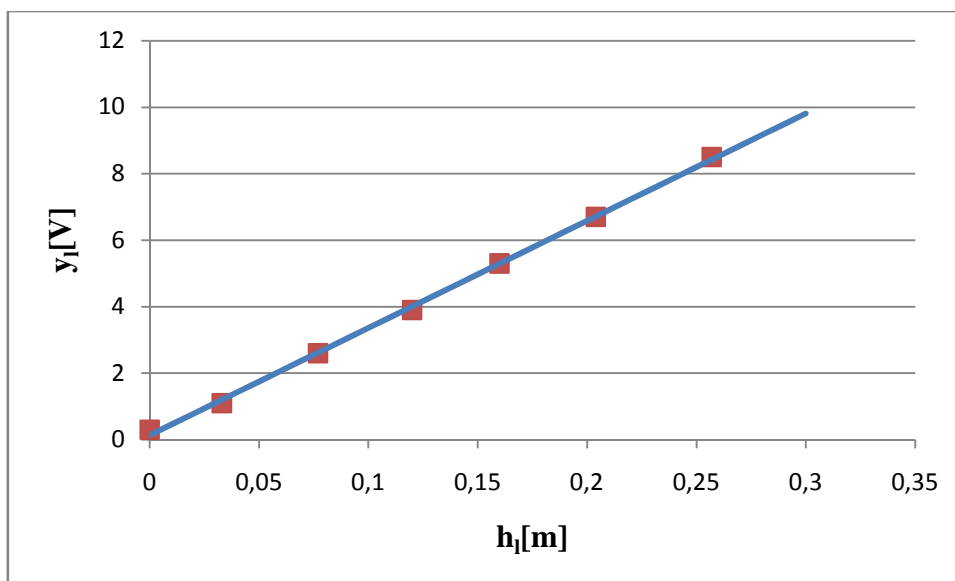
Z naměřených výšek hladin a hodnot napětí čidel tlaku jsou lineární regresí vypočteny hodnoty parametrů  $c$ ,  $d$ .

Tabulka 5 - Parametry čidel tlaku

Umístění	$c$	$d$
Levé	31.437	0.3348
Pravé	32.233	0.1385



Obrázek 14 - Charakteristika levého čidla tlaku



Obrázek 15 - Charakteristika pravého čidla tlaku

### 3.3.4 Specifikace konstrukčních parametrů a fyzikálních konstant

Tabulka 6 - Konstrukční rozměry soustavy

Zkratka	Hodnota	Jednotky	Význam
$D_l$	0,05	m	Průměr levých nádrží
$D_R$	0,04	m	Průměr pravých nádrží
$H$	0,28	m	Výška nádrží
$V_{cl}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$m^3$	Objem dolního vzdušníku
$d_l$	0,004	m	Průměr levé clony
$d_r$	0,004	m	Průměr pravé clony
$d_{cl}$	$2 \cdot 10^{-4}$	m	Průměr clony vzdušníku

Tabulka 7 - Fyzikální konstanty

Zkratka	Hodnota	Jednotky	Význam
$\rho$	1000	$Kg \cdot m^{-3}$	Hustota vody
$r$	287	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	Měrná plynová konstanta vzduchu
$G$	9,81	$M \cdot s^{-2}$	Tíhové zrychlení
$T$	293	K	Teplota
$P_a$	101325	Pa	Atmosférický tlak

## 3.4 Emulační model HPS v MATLABu

Cílem této části bylo vytvořit pomocí Graphical User Interface v prostředí MATLAB model emulující dynamické chování soustavy. Program by měl poskytovat ovládání napětí obou čerpadel, buď manuálním nastavením hodnot v průběhu emulace, nebo nastavení hodnot předem a automatické změny příslušných hodnot napětí, ovládání plynutí času, nastavení počátečních hodnot hladin v nádržích, nastavení parametrů dolního vzdušníku, vykreslení dynamických průběhů, uložení průběhu. V průběhu emulace můžeme sledovat výšku a objem kapaliny v nádržích a tlak v dolních nádobách.

### 3.4.1 Rozložení prvků aplikace

Aplikace je koncipována tak, aby byla jednoduchá a přehledná. Rozložení prvků, které zastupují fyzické části soustavy, odpovídá rozložení komponent programu.

Umístění komponent je na obrázku 16.

1. Spuštění emulace,
2. Rychlost běhu plynutí času,
3. Zastavení simulace,
4. Uložení statistických dat průběhu napětí čerpadel a čidel tlaku,
5. Nastavení změny napětí čerpadel v čase,
6. Celkový čas běhu emulace,
7. Objem vody v levé horní nádrži,
8. Výška vody v levé horní nádrži,
9. Objem vody v levé dolní nádrži,
10. Výška vody v levé dolní nádrži,
11. Ovládání levého čerpadla pomocí:

- a) Text edit
  - b) Slider,
12. Nastavení ustálených hladin levých nádrží odpovídající napětí levého čerpadla,
  13. Tlak v dolních nádobách,
  14. Ovládání dolního vzdušníku pomocí radiobuttonů:
    - a) Otevření do atmosféry,
    - b) Umístění clonky,
    - c) Umístění záslepky,
  15. Objem vody v pravé horní nádrži,
  16. Výška vody v pravé horní nádrži,
  17. Objem vody v pravé dolní nádrži,
  18. Výška vody v pravé dolní nádrži,
  19. Ovládání pravého čerpadla pomocí:
    - a) Text edit,
    - b) Slider,
  20. Nastavení ustálených hladin pravých nádrží odpovídající napětí pravého čerpadla,
  21. Graf průběhu napětí čidla tlaku levé nádrže a napětí levého čerpadla,
  22. Graf průběhu napětí čidla tlaku levé nádrže a napětí levého čerpadla.

soubor

běh emulace 2

start emulace **1**

>

>>

>>>

stop emulace **3**

rychlost emulace

čas emulace (s)  **6**

uložení **4**

nastavení simulace **5**

horní levá nádrž

objem vody **7**  m<sup>3</sup>

výška vody **8**  m

tlak v dolních nádobách **13**  Pa

vzdušník

otevřeno

uzavřeno **14**

cibinka

horní levá nádrž

objem vody **15**  m<sup>3</sup>

výška vody **16**  m

dolní levá nádrž

objem vody **17**  m<sup>3</sup>

výška vody **18**  m

zásobovací nádrž

napětí **11**

nastav usazenou hladinu **12**

napětí **19**

nastav usazenou hladinu **20**

**21**

**22**

Obrázek 16 - GUI HPS

### 3.4.2 Funkce aplikace

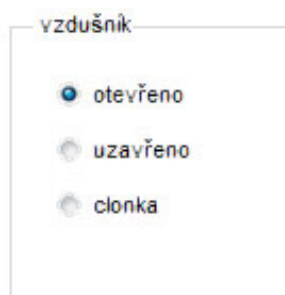
Koncepce programu odpovídá rozložení prvků skutečného modelu. Můžeme ho funkčně rozdělit do tří částí.

Horní část je zaměřena na celkové ovládání emulace a nastavení simulace. Můžeme zde nastavovat rychlost emulace a nastavit změny hodnoty napětí čerpadel v čase.

Pod ní je prostor určený schématu laboratorní úlohy. Jsou zde umístěny dvě dvojice panelů, reprezentující nádrže soustavy. V každém panelu jsou umístěny dva text edity z kterých se můžete vyčíst aktuální hodnoty v průběhu emulace. Horní poskytuje informaci o objemu kapaliny a spodní o výšce hladiny v nádržích, což odpovídá pravitkům umístěných na nádržích v reálné soustavě. Mezi těmito panely je ukazatel tlaku vzduchu v dolních pneumatických nádobách

Panel reprezentující zásobovací nádrž je umístěn pod nádržemi, který obsahuje dvě čerpadla. Jsou zde umístěny dva posuvníky, pomocí kterých můžeme libovolně nastavovat hodnotu napětí čerpadel z rozsahu 0 – 10 V, a tím nastavovat odpovídající hodnoty průtoků. Chceme-li nastavit konkrétní hodnotu, kterou bychom posuvníkem nedocílili, můžeme, můžeme ji zadat číselně do text editů, umístěných pod posuvníky. Pokud chceme nastavit počáteční výšky hladin odpovídajícím hodnotám napětí čerpadel, jsou zde umístěny tlačítka pod ovládním čerpadel sloužící k tomuto účelu.

Mezi dolními nádržemi je umístěno ovládání konfigurace dolního vzdušníku. Jsou zde tři radiobuttony, kterými lze vzdušník otevřít do atmosféry, čímž zabráníme nárůstu tlaku v spodních nádobách při zvyšování průtoku kapaliny, levá a pravá část se nebudou vzájemně ovlivňovat, umístit do vzdušníku clonku, čímž se bude simulovat postupné vypouštění nahromaděného tlaku v dolních pneumatických nádobách, způsobeného zvýšením napětí čerpadla a tím zvýšení průtoku kapaliny přes nádrže. Do vzdušníku zde můžeme umístit také záslepku, čímž ho oddělíme od vnější atmosféry a zabráníme vyrovnávání přetlaku nebo podtlaku dolního pneumatického objemu.

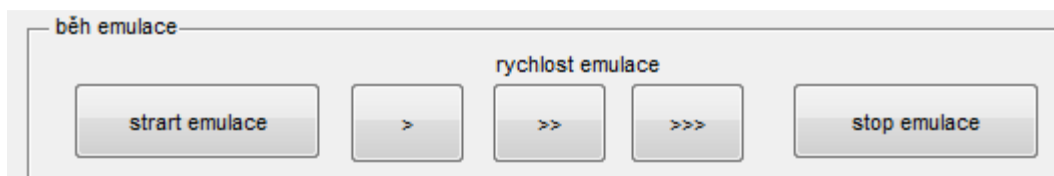


Obrázek 17 - Ovládání konfigurace vzdušníku

V pravé části programu se nalézají dva grafy pro levou a pravou část soustavy. V grafech jsou vyneseny hodnoty napětí čerpadel a diferenčních čidel tlaku v závislosti na simulovaném čase, což pomáhá k celkové orientaci chování soustavy.

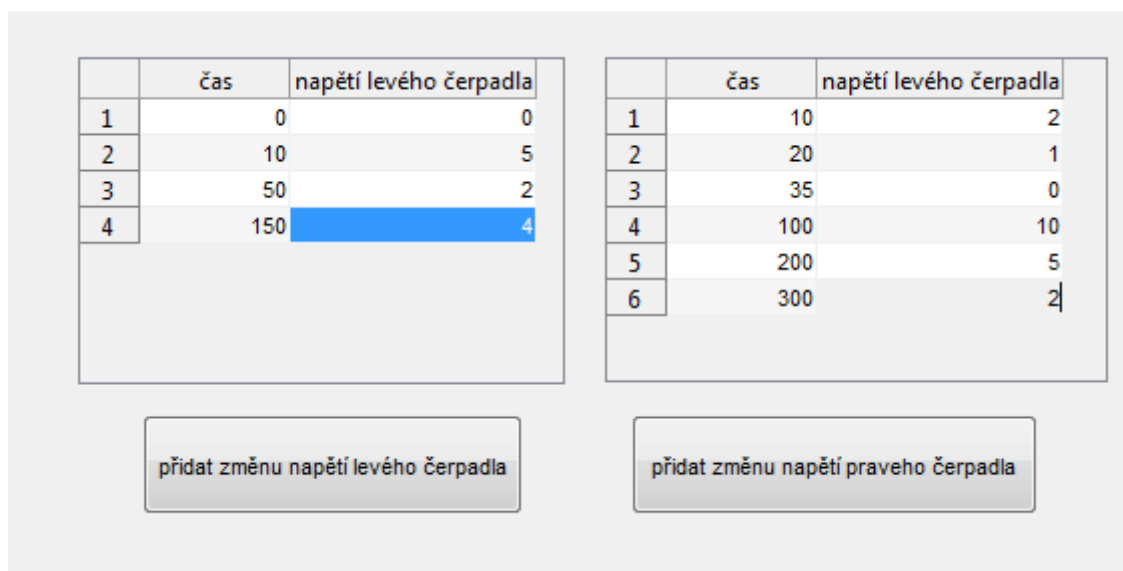
Ovládání běhu simulace je umístěno v horní části programu. Je zde umístěno nejen ovládání startování a zakončení emulace ale také ovládání rychlosti běhu simulačního času.

Je zde pět tlačítek, kde prvním zahájíte emulaci, druhé odpovídá reálnému běhu, třetí zrychlí emulaci 10krát, čtvrté tlačítko 100krát. Tím odpadá zdlouhavé čekání na ustalování hladin a zkrácení času, který musíme emulaci věnovat.



**Obrázek 18 - Ovládací panel běhu emulace**

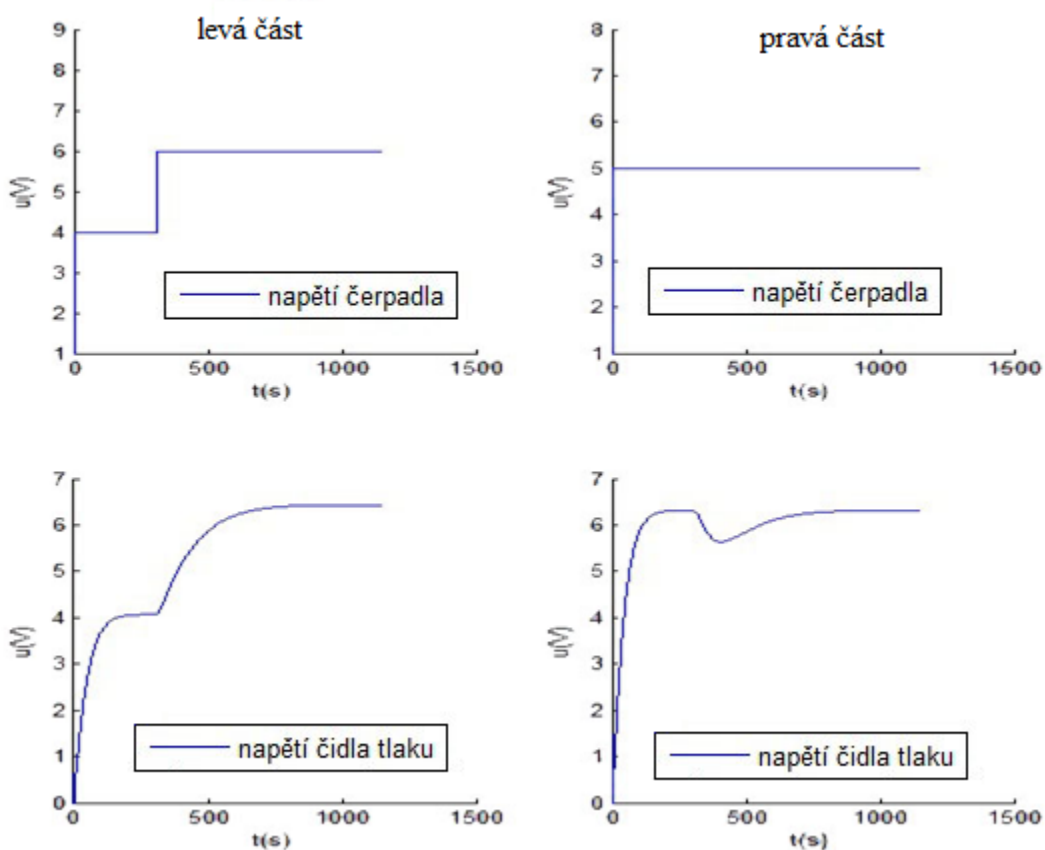
Pro automatickou obsluhu je zde umístěno tlačítko nastavení simulace. Pro případ, známe-li přesný čas, kdy chceme změnit nastavení napětí čerpadel ještě před začátkem emulace. Za běhu emulace by bylo obtížné trefovat se do přesného času, kdy chceme napětí čerpadel změnit a manuálně nastavovat hodnotu. Jednoduchým vyplněním tabulek lze nastavit změny tak, aby se napětím čerpadel nastavovala automaticky v daném čase. Můžeme tak pohodlně hodnoty nastavit a spustit emulaci třeba zrychleně.



**Obrázek 19 - Nastavení změn napětí čerpadel v čase**

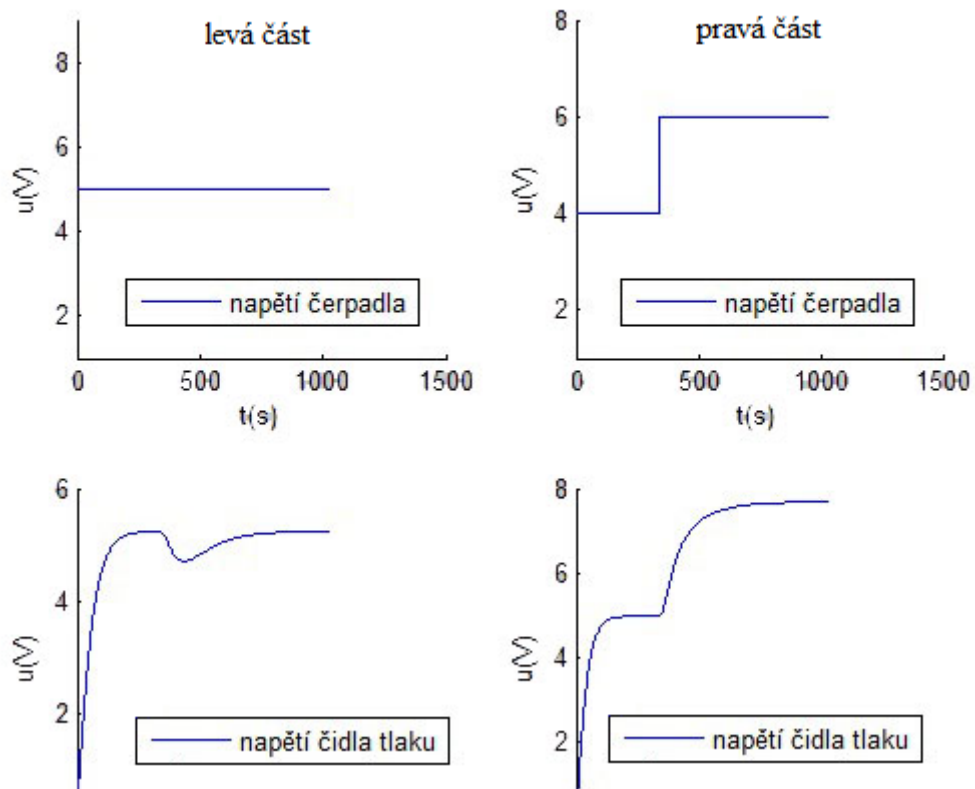
Také je zde možnost uložit nasimulovaná data na pevný disk pro pozdější vyhodnocování a zpracování. Pro tento účel je napsán skript s názvem vykresleni.m, který vykreslí nasimulovaná data ze souboru 'ulozeni.mat' do čtyř grafů umístěných přehledně, abychom mohli výsledky snadno porovnat a zhodnotit.





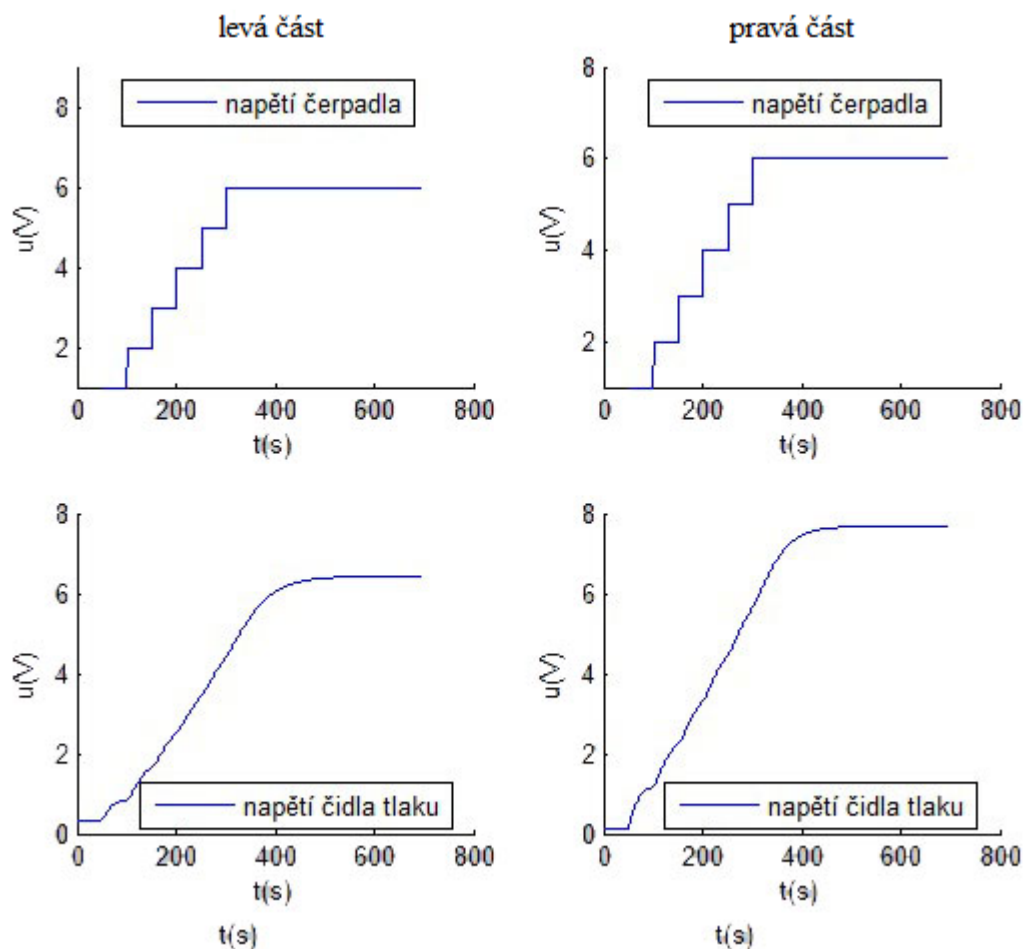
Obrázek 20 - Skoková změna napětí levého čerpadla

Při skokové změně napětí čerpadla, kdy je umístěná clona ve vzdušníku, dojde k zvýšení tlaku v dolních nádobách, který způsobí zpomalení zvyšování hladiny kapaliny na straně, kde ke změně došlo. V druhé sekci způsobí dočasné snížení hladiny, než se ustálí tlak. Pak se hladina vrátí na původní hodnotu.



**Obrázek 21 - Skoková změna pravého čerpadla**

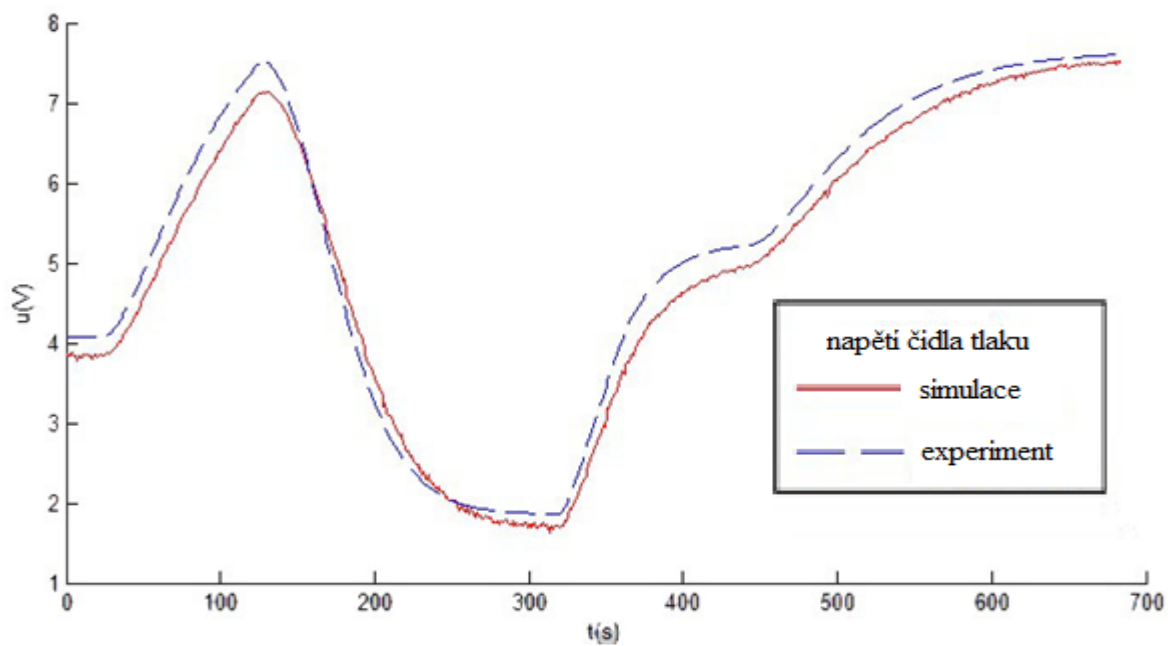
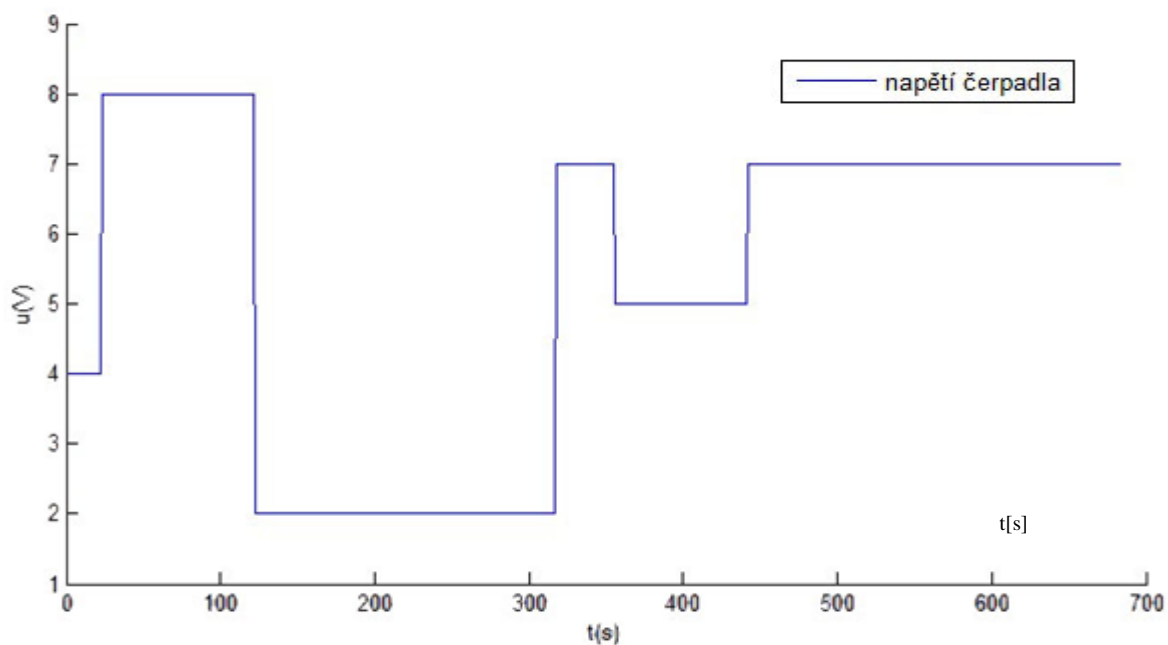
Není-li ve vzdušníku umístěna clonka nebo záslepka nedojde k vzájemnému ovlivňování obou částí soustavy.



Obrázek 22 - Skokové změny napětí čerpadel

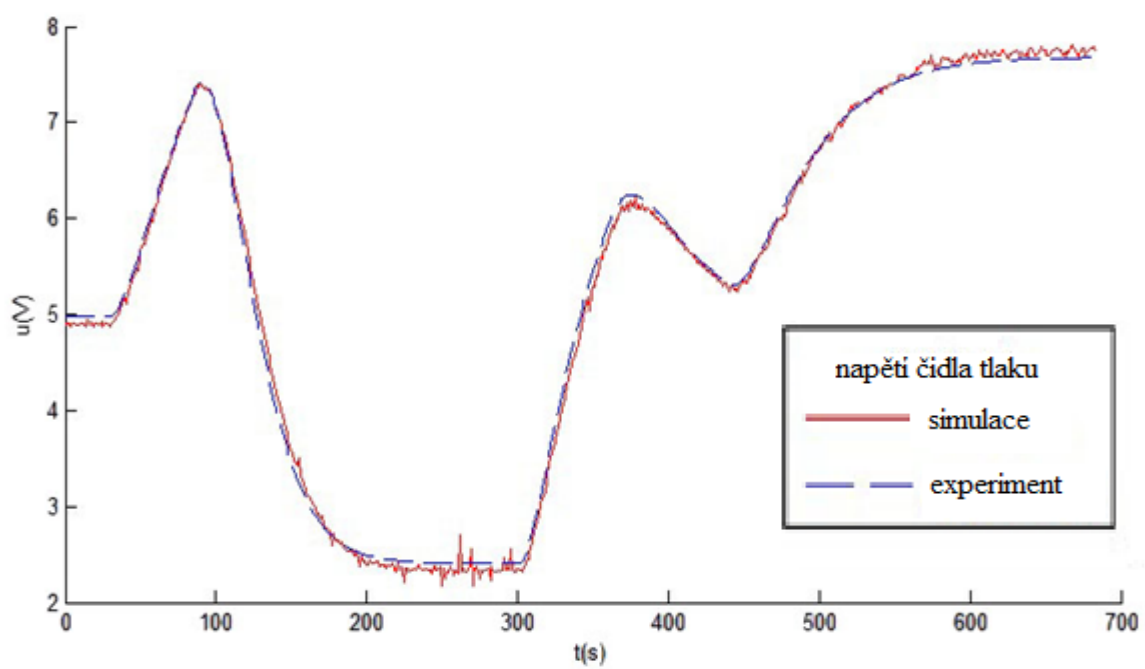
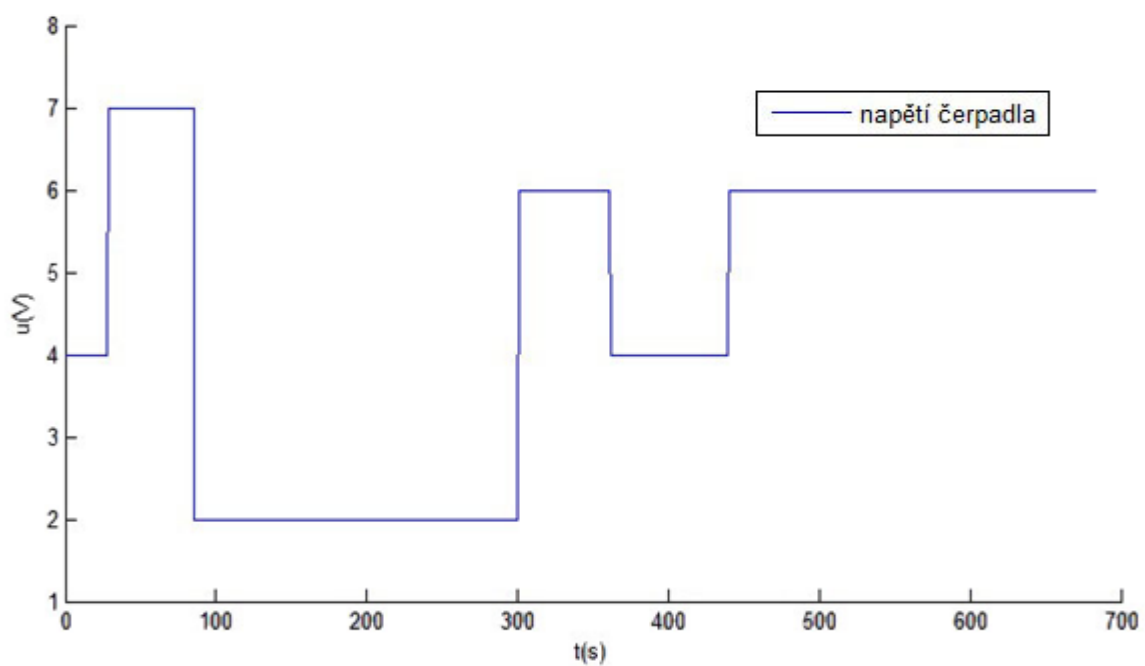
### 3.5 Verifikace modelu

Jsou změřeny dynamické odezvy soustavy - odezvy obou hladin na skokové změny v příkonu čerpadel (v napětí pro vstupní jednotku). Do grafů jsou vyneseny změřené hodnoty spolu s vypočítanými výškami hladin – simulace pro stejné průběhy vstupních veličin.



**Obrázek 23- Ověření levé části modelu**

Při porovnání těchto dvou průběhů lze vidět drobné neshody způsobené nepřesným určením parametrů levé části soustavy. Nedostatky modelu můžeme odstranit přezkoumáním parametrů levé části modelu.



Obrázek 24 - Ověření pravé části modelu

Zde je patrné, že průběh simulace je téměř totožný s daty naměřených na reálné soustavě. Pravá sekce vystihuje reálné chování lépe.

## 4 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření programu v prostředí MATLAB, který by byl schopný emulovat chování hydraulicko-pneumatické laboratorní úlohy.

Nejdříve bylo nutné matematicko-fyzikální analýzou určit vztahy mezi jednotlivými prvky. Ne všechny parametry byly známy a k jejich určení se musel provést praktický experiment, ze kterého jsme získali neznámé parametry modelu. Poté jsme mohli přistoupit k samotné tvorbě aplikace.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou uvedeny principy modelování a experimentální identifikace, popis numerického řešení diferenciálních rovnic. Také je zde uvedeno seznámení se základními částmi MATLABu, popis proměnných, 2D grafika, M-soubory a Graphical User Interface Development Environment.

V praktické části se zabýváme konstrukčním uspořádáním soustavy, propojení modelu s počítačem, dohledání neznámých parametrů, které jsou z naměřených hodnot statickými metodami vypočítány. Parametry nádrží aritmetickým průměrem, čidla tlaku lineární regresí a čerpadel mocninou regresí. Dále jsou zde určeny konstrukční rozměry soustavy a specifikace fyzikálních konstant.

Kapitola s názvem Emulační model HPS v MATLABu je určena k seznámení s vytvořeným programem. S jeho částmi a jeho funkcemi.

Poslední kapitola se zabývá ověřením správnosti vytvořeného programu a srovnání s reálnými daty. Nejdříve jsou odezvy soustavy nasimulovány a poté jsou prakticky změřeny na reálném modelu.

V praktické části byla vytvořena softwarová aplikace pro emulování dynamického chování laboratorní soustavy v prostředí MATLAB. Program umožňuje emulovat chování HPS včetně nastavení konfigurace vzdušníku, umístěním clonky, otevřením do atmosféry nebo umístěním záslepky. Zobrazuje výstupní napětí diferenčních čidel tlaku a poskytuje časové přednastavení chování čerpadel nebo manuální ovládání za běhu. Lze ukládat výsledky emulace na pevný disk do souboru pro pozdější zpracování. Pomocí skriptu, vytvořeném taktéž v prostředí MATLAB, lze tyto data zpracovat a dále vykreslit do grafu.

Porovnáním simulačního modelu a naměřených výsledků reálného systému byly zjištěny nepřesnosti v levé části soustavy, způsobené nepřesným určením parametrů modelu. V pravé části se model téměř shodoval s naměřenými daty. Pro potřeby emulace chování je přesnost modelu dostatečná a program může být využit pro experimentování se soustavou na počítači – získání představy o statických a také dynamických vlastnostech soustavy a může urychlit fázi plánování experimentu a snížit její časovou náročnost.

Tato práce mi dala hodně pozitivních zkušeností. A to nejen při práci na teoretické rovině, kdy sem se zabýval chováním modelu a jeho vlastnostmi, programováním

samotného programu, ale taky při praktickém měření kterým sem si ověřil teoretické poznatky v praxi.

Věřím, že tato bakalářská práce bude inspirací pro uživatele, kteří budou řešit stejné nebo podobné problémy a přispěje k jejich řešení.

## Literatura

- [1] NAVARA, M; NĚMEČEK, A. *Numerické metody*. Praha: ČVUT, ISBN 80-01-20689-2.
- [2] MATLAB. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : WikipediaFoundation, 7. 12. 2005, last modified on 10. 7. 2011 [cit. 2011-08-08]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>>.
- [3] MACHÁČEK, Jiří; HONC, Daniel; DUŠEK, František. Výukový laboratorní model hydrauliko-pneumatické soustavy *AUTOMA* [online]. 2005, 08, [cit. 2011-08-08]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=30630](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30630)>.
- [4] *Řízení technologických procesů* [online]. 2006 [cit. 2011-08-08]. Modelování a identifikace řízeného systému. Dostupné z WWW: <<http://rtp.webzdarma.cz/model1.php>>.
- [5] *XuvWiki* [online]. 9. 2. 2007 [cit. 2011-08-08]. Úvod do Matlabu. Dostupné z WWW: <[http://xuv.kfe.fjfi.cvut.cz/mediawiki/index.php/%C3%9Avod\\_do\\_Matlabu](http://xuv.kfe.fjfi.cvut.cz/mediawiki/index.php/%C3%9Avod_do_Matlabu)>.
- [6] KLEČKA, Radim; MAHDAL, Miroslav. Identifikace a návrh regulátoru pro hydraulicko-pneumatickou soustavu. In *XXXII. Seminar ASR* [online]. Ostrava: VŠB - technická Univerzita Ostrava Fakulta strojní Katedra automatizační techniky a řízení, 27. 4. 2007 [cit. 2011-08-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.fs.vsb.cz/akce/2007/asr2007/Proceedings/papers/093.pdf>>.
- [7] KLÁN, Petr. Přístroj pro měření a řízení pomocí PC. *AUTOMA* [online]. 2004, 11, [cit. 2011-08-08]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32619](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32619)>.
- [8] Humusoft. *Humusoft* [online]. 1997 [cit. 2011-08-10]. MF614. Dostupné z WWW: <<http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/old/mf614>>.
- [9] KARBAN, Pavel. *Karban* [online]. 2005 [cit. 2011-08-10]. Numerické metody I. Dostupné z WWW: <[http://home.zcu.cz/~karban/teaching/mmem/dolezel/course\\_2/lect3.pdf](http://home.zcu.cz/~karban/teaching/mmem/dolezel/course_2/lect3.pdf)>.
- [10] HONC, D., DUŠEK, F. Laboratory Plant for Control Experiments. In *7th International Scientific-Technical Conference Process Control 2006*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, June 13 - 16 2006. University of Pardubice, Pardubice, 2006, pp. 219 + CD ROM. ISBN 80-7194-860.