

# AUTOMATICKÁ IDENTIFIKACE PARAMETRŮ VENTILŮ

P. Škrabánek, F. Dušek

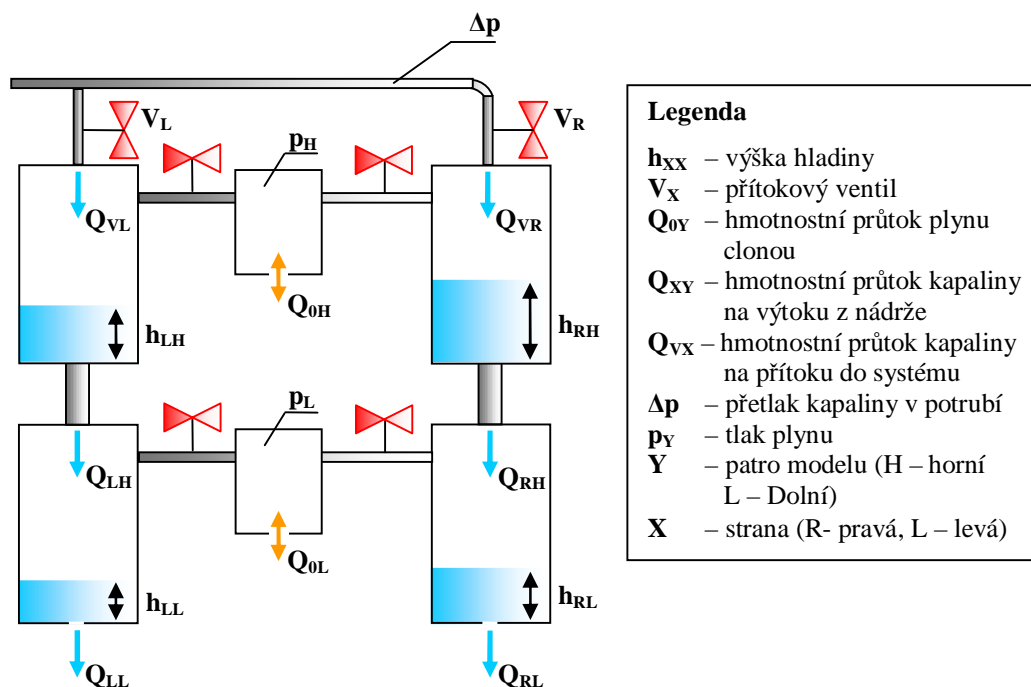
Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko technologická  
Katedra řízení procesů a výpočetní techniky

## Abstrakt

Příspěvek se zabývá identifikací parametrů přítokových ventilů použitých v laboratorním modelu hydraulicko-pneumatické soustavy. Dohledávány jsou konstanty charakterizující ventil, které nelze získat jinak než-li experimentálně. Identifikace těchto parametrů byla automatizována, jelikož se některé z určovaných parametrů v průběhu času mohou měnit.

## 1 Úvod

V rámci projektu GAČR 102/03/0625 – Konsorciální přístup k vývoji experimentálních modelů – bylo na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky FCHT Univerzity Pardubice navrženo a realizováno zařízení „Hydraulicko - pneumatická soustava“ (dále jen HPS) představující dvourozměrnou soustavu určenou pro praktické ověřování vícerozměrového řízení [Macháček, 2004]. Jeho podrobný popis byl publikován v [Honc, 2004]. Schématické znázornění je provedeno na obrázku 1.



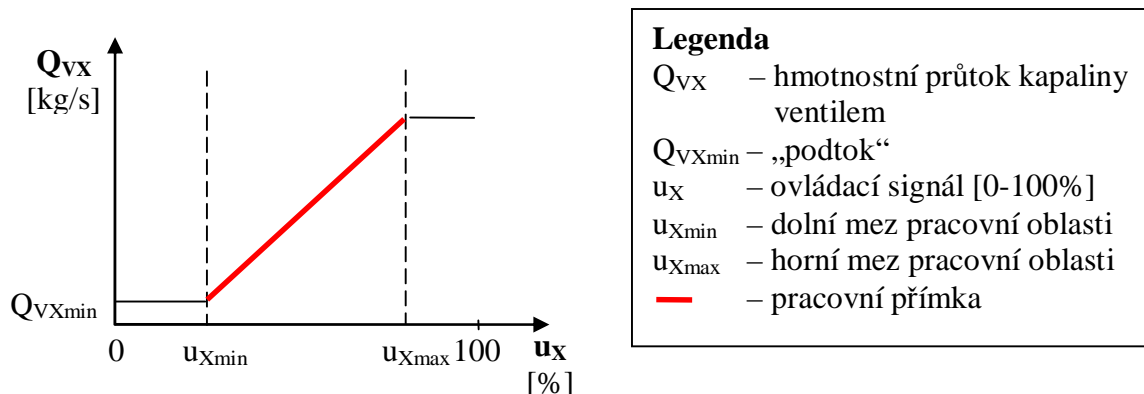
Obrázek 1: Schéma soustavy HPS

Pro návrh kvalitního řízení je nutná informace o řízeném systému – v případě řízení procesů počítačem obvykle ve formě matematického modelu. Tento model by měl popisovat dynamické chování (časový průběh) vybraných veličin odpovídající co nejvěrněji průběhu veličin reálného zařízení. V tomto případě byl pro laboratorní zařízení odvozen matematický model na základě matematicko-fyzikální analýzy. Aby výstupy matematického modelu odpovídaly výstupům reálného zařízení, je nutné znát co nejpřesněji hodnoty konstant, které se v matematickém modelu vyskytují.

## 2 Teorie

### 2.1 Charakteristika ventilů

Tento článek je zaměřen na identifikaci parametrů části HPS, konkrétně parametrů přítokových ventilů  $V_L$  a  $V_R$  (viz. obrázek 1). Statická charakteristika ventilů použitých v HPS byla publikována v [Dušek, 2005]. Závislost hmotnostního průtoku kapaliny ventilem  $Q_{VX}$  na ovládacím signálu  $u_X$  je zobrazena v grafu na obrázku 2.



Obrázek 2: Závislost hmotnostního průtoku kapaliny ventilem na ovládacím signálu

Závislost hmotnostního průtoku kapaliny ventilem na ovládacím signálu, která je zachycena na obrázku 2, je způsobena konstrukcí ventilu. Z obrázku je patrné, že změnou ovládacího signálu nelze v celém jeho rozsahu měnit hmotnostní průtok kapaliny ventilem. Interval, ve kterém je možno změnou ovládacího signálu vyvolat změnu hmotnostního průtoku, je vymezen body  $u_{Xmin}$  a  $u_{Xmax}$ . Tento interval je v textu označován jako pracovní oblast. Každý ventil má pracovní oblast různě velkou a různě umístěnou. Konstrukce ventilu rovněž způsobuje, že i při jeho úplném uzavření jím protéká kapalina. Tento jev je dále označován jako „podtok“ a je rovněž potřeba identifikovat parametr, který jej určuje. Jelikož je hmotnostní průtok kapaliny v pracovní oblasti lineárně závislý na ovládacím signálu [Dušek, 2005], je matematickým popisem této závislosti přímka. Ta je nazývána přímkou pracovní. Posledním parametrem, který je určován, je směrnice pracovní přímky.

### 2.2 Identifikace parametrů

K matematickému popisu chování přítokových ventilů je v matematickém modulu HPS využíváno rovnice (1) [Dušek, 2005].

$$Q_{VX} = (a_{VX} \cdot s_{OVX} \cdot o_X + s_{UX}) \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot \Delta p} \quad (1)$$

Kde

- $Q_{VX}$  – hmotnostní průtok kapaliny ventilem
- $a_{VX}$  – směrnice pracovní přímky
- $o_X$  – otevření ventilu
- $s_{OVX}$  – plocha štěrbiny
- $s_{UX}$  – neuzavřená plocha při nulovém ovládacím signálu
- $\rho$  – hustota kapaliny
- $\Delta p$  – přetlak kapaliny v přívodním potrubí
- $X$  – označení strany (L - levá, R - pravá)

V rovnici (1) se vyskytuje nová proměnná – otevření ventilu  $o_X$ . Jedná se o vstupní proměnnou, kterou lze vypočítat z hledaných parametrů  $u_{Xmin}$ ,  $u_{Xmax}$  a vstupní proměnné  $u_X$  dle rovnice (2).

$$o_X = \frac{u_X - u_{Xmin}}{u_{Xmax} - u_{Xmin}} \quad (2)$$

V rovnici (1) se vyskytují celkem čtyři parametry ( $s_{OVX}$ ,  $s_{UX}$ ,  $a_{VX}$  a  $\rho$ ) a dvě vstupní proměnné ( $\Delta p$  a  $o_X$ ). Hustotu  $\rho$  lze pro dané podmínky dohledat v tabulkách a plochu štěrbiny  $s_{OVX}$  lze změřit. Směrnici přímky  $a_{VX}$  a neuzavřená plocha při nulovém ovládacím signálu  $s_{UX}$  jsou neznámé parametry, které nelze změřit a proto jsou dohledávány.

## 2.3 Určení pracovní oblasti ventilu

Aby bylo možno určit pracovní oblast ventilu (body  $u_{xmin}$  a  $u_{xmax}$ ), je třeba znát hmotnostní průtoky kapaliny ventilem pro různé úrovně ovládacího signálu v celém jeho rozsahu (0-100%). Hmotnostní průtok kapaliny ventilem nelze na laboratorním modelu HPS přímo měřit, a proto je nutno jej dopočítávat na základě měřitelných veličin. Laboratorní model umožňuje měřit výšky hladin ve všech nádržích, tlak plynu na horním a dolním patře laboratorního zařízení, přetlak kapaliny v přívodním potrubí a atmosférický tlak. Data potřebná k identifikaci jsou získávána odděleně pro levý a pravý ventil. Nádrže na straně, kde se neprovádí identifikace ventilu, zůstávají prázdné. To umožňuje udržovat v soustavě v průběhu měření atmosférický tlak. Stejným způsobem se udržuje atmosférický tlak i při určování zbylých parametrů. Přetlak kapaliny v přívodním potrubí je považován v průběhu měření za konstantní.

Pro potřeby identifikace je nutno odvodit vztah, ze kterého bude možno na základě měřitelných veličin vypočítat hmotnostní průtok kapaliny ventilem  $Q_{vX}$ . Při odvozování se vyjde z hmotové bilance kapaliny v nádrži. Ta je popsána rovnicí (3).

$$Q_{vX} = Q_{XH} + \frac{dm_{XH}}{dt} \quad (3)$$

Kde

- $Q_{XH}$  - hmotnostní průtok kapaliny na výtoku z nádrže
- $dm_{XH}/dt$  - hmotová zadrž systému
- $H$  - označení patra (H – horní)

Jelikož je v průběhu experimentu v systému zachován ve všech jeho částech stejný tlak, stačí použít k výpočtu hmotnostního průtok kapaliny na výtoku z nádrže rovnici (4) [Škrabánek, 2004].

$$Q_{XH} = a_{XH} \cdot r \cdot s_{XH} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{XH}} \quad (4)$$

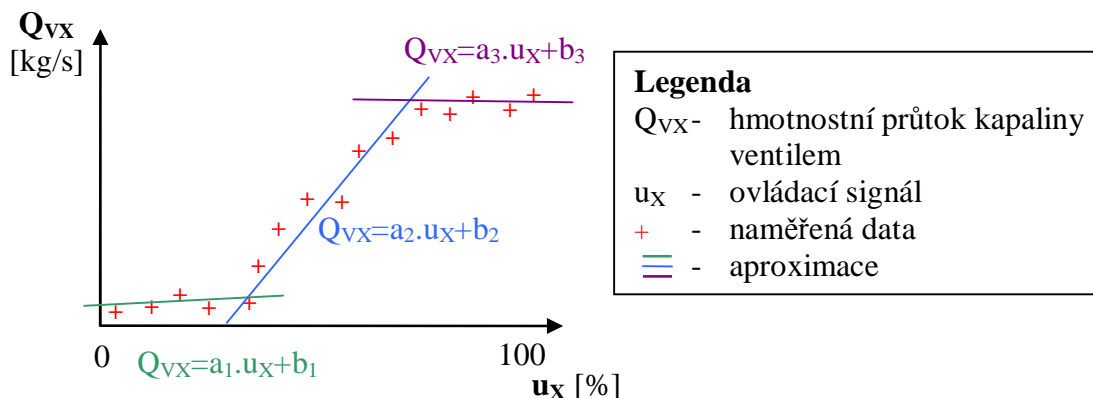
Kde

- $a_{XH}$  - výtokový koeficient
- $s_{XH}$  - plocha průřezu výtokového otvoru
- $g$  - tíhové zrychlení

Dosazením této rovnice do hmotové bilance (3) a úpravou derivace hmotnosti pomocí vztahu pro výpočet hustoty, se získá rovnice (5) popisující hmotnostní průtok kapaliny ventilem.

$$Q_{vX} = a_{XH} \cdot r \cdot s_{XH} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{XH}} + r \cdot S_x \cdot \frac{dh_{XH}}{dt} \quad (5)$$

Pro potřeby identifikace postačí tedy pouze měřit časový průběh výšky hladiny  $h_{XH}$  v odpovídající nádrži. Tímto postupem je získána závislost hmotnostního průtok kapaliny ventilem  $Q_{vX}$  na ovládacím signálu  $u_x$ . Analýzou naměřených dat se pak dohledají oblasti zlomu (hledají se dva po sobě jdoucí body, které překročí stanovenou mez odchylky od předchozího stavu). Tímto jsou naměřená data rozdělena na tři množiny. Každá z těchto množin je proložena pomocí metody nejmenších čtverců přímkou. Průsečíky těchto přímk určují krajní meze pracovní oblasti. Toto je názorně ilustrováno na obrázku 3.



Obrázek 3: Určování pracovní oblasti ventilu z naměřených dat

Minimální ovládací signál  $u_{Xmin}$  se vypočítá z rovnice (6) a maximální  $u_{Xmax}$  pak z rovnice (7).

$$u_{X \min} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (6)$$

$$u_{X \max} = \frac{b_3 - b_2}{a_2 - a_3} \quad (7)$$

Kde

$a_i, b_i$  - konstanty aprox. přímek

### 3 Popis experimentu

V kapitole 2.1 Charakteristika ventilů bylo řečeno, že hledanými parametry ventilu jsou body  $u_{Xmin}$  a  $u_{Xmax}$ , směrnice pracovní přímky  $a_{VX}$  a neuzavřená plocha při nulovém ovládacím signálu  $s_{UX}$ . V následujících kapitolách je popsáno, jakým způsobem jsou tyto parametry získávány.

#### 3.1 Identifikace pracovní oblasti ventilu

Aby bylo možno určit pracovní oblast ventilu, je třeba určit hmotnostní průtoky kapaliny ventilem  $Q_{VX}$  pro různé hodnoty ovládacího signálu  $u_X$  v celém jeho rozsahu. Pro tento účel byl vypracován jednoduchý algoritmus, který dokáže provést poměrně rychle a efektivně měření v celém požadovaném rozsahu ovládacího signálu. Ovládací signál se v průběhu měření v pravidelných intervalech střídavě mění. Počáteční ovládací signál je 100%, poté se ventil zcela uzavře – ovládací signál je 0%. Následuje pak ovládací signál 95%, 5%, 90%.... Tato posloupnost pokračuje až do dosažení ovládacího signálu 50%. Popsaný algoritmus způsobuje, že se k určení hmotnostního průtoku využívá dat naměřených pro stoupající a klesající hladinu. Algoritmus pro výpočet otevření ventilu je popsán rovnicemi (8) až (10).

Na počátku je ovládací signál  $u_X(0)$  100%, což zachycuje rovnice (8).

$$u_X(0) = 1 \quad (8)$$

Následující ovládací signály se vypočítají z rovnice (9).

$$u_X(i) = u_X(i-1) + \Delta u_X(i) \quad (9)$$

Kde

$u_X(i)$  - aktuální ovládací signál  
 $u_X(i-1)$  - předchozí ovládací signál  
 $\Delta u_X(i)$  - změna ovládacího signálu  
 $i$  - pořadnice ovládacího signálu

Změna ovládacího signálu  $\Delta u_X(i)$  se vypočítá podle rovnice (10).

$$\Delta u_X(i) = (-1)^i \cdot (1 - d \cdot (i - 1)) \quad (10)$$

Kde

$\delta$  - velikost změny

Aby měření dat pro určení pracovní oblasti ventilu proběhlo co nejrychleji, měření se provádí v předpokládané pracovní oblasti s menší velikostí změny  $\delta$ , než mimo předpokládanou pracovní oblast.

Výpočet hmotnostního průtoku kapaliny ventilem  $Q_{VX}$  se provádí z rovnice (5). Data potřebná k jeho výpočtu jsou získávána z měření časového průběhu výšky hladiny  $h_{XH}$ . Změna velikosti řídicího signálu  $u_X$  se provádí ve stanoveném časovém intervalu (15 sekund).

#### 3.1.1 Určení derivace výšky hladiny

Laboratorní model HPS umožňuje měřit pouze výšku hladiny kapaliny v nádrži  $h_{XH}$ , ovšem při identifikaci pracovní oblasti ventilu je třeba znát nejen hodnotu výšky hladiny, ale i její derivaci (viz. rovnice 5). Jako nejjednodušší cesta k určení derivace výšky hladiny se může jevit rovnice (11).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h(k) - h(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \quad (11)$$

Kde

- $dh/dt$  - derivace výšky hladiny podle času
- $h$  - výška hladiny v nádrži
- $t$  - čas
- $k$  - pořadí vzorku

Tuto rovnici ale použít nelze, poněvadž jsou naměřená data zašuměna. Lepším způsobem určení derivace výšky hladiny je proložení naměřených dat vhodnou funkcí a následným odvozením vztahu pro výpočet derivace výšky hladiny. Naměřená data byla aproximována rovnicí (12).

$$h = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \quad (12)$$

Kde

- $h$  - výška hladiny
- $a, b, c$  - parametry aproximační funkce
- $t$  - čas

Derivace výšky hladiny odvozená z této rovnice je zapsána v rovnici (13).

$$\frac{dh}{dt} = a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t} \quad (13)$$

Parametry funkce popsané v rovnici (12)  $a$ ,  $b$  a  $c$  jsou dohledávány pomocí optimalizace z naměřeného časového průběhu výšky hladiny. Při optimalizaci je hledáno minimum účelové funkce  $\Phi$  zapsané v rovnici (14). Minimum se dohledává pomocí funkce `fminsearch`. Výška  $h_2$  se počítá pomocí rovnice (12).

$$\Phi = \sum_i (h_2(i) - h_1(i))^2 \quad (14)$$

Kde

- $h_2(i)$  - vypočítaná výška hladiny
- $h_1(i)$  - naměřená výška hladiny

### 3.2 Určení neuzavřené plochy ventilu

Hmotnostní průtok kapaliny ventilem  $Q_{vX}$  je popsán rovnicí (1). Tuto rovnici lze rozložit na dvě části. Jedna část odpovídá průtoku kapaliny ventilem při nulovém otevření ventilu  $o_X$ . Druhá část odpovídá průtoku kapaliny odpovídající nenulovému otevření ventilu. Cílem této části experimentu je určit neuzavřenou plochu ventilu  $s_{UX}$ , proto se provádí měření dat určených k identifikaci tohoto parametru při nulovém ovládacím signálu  $u_X$ . V systému je po celou dobu experimentu zachován atmosférický tlak. Naměřené hodnoty přetlaku kapaliny v přívodním potrubí  $\Delta p$  a výšky hladiny kapaliny  $h_{XH}$  jsou v průběhu experimentu ukládány do souboru. Výška hladiny v čase nula dosahuje horní meze rozsahu výšky hladiny v nádrži (cca. 30 cm).

Parametr  $s_{UX}$  se dohledává pomocí optimalizace, při které je hledáno minimum účelové funkce popsané rovnicí (14). Proměnná  $h_2$  je získávána jako výstup ze simulace v programu Simulink. Chování výšky hladiny je popsáno rovnicí (15).

$$\frac{dh_{XH}(t)}{dt} = \frac{1}{r \cdot S_X} \cdot (Q_{vX} - Q_{XH}) \quad (15)$$

Kde

- $Q_{vX}$  - hmotnostní průtok kapaliny ventilem
- $Q_{XH}$  - hmotnostní průtok kapaliny na výstupu z nádrže
- $S_X$  - plocha průřezu nádrže

Hmotnostní průtok kapaliny na výstupu z nádrže se vypočítá pomocí rovnice (4). Hmotnostní průtok kapaliny ventilem je dán rovnicí (1) pro  $o_X=0$ .

Výchozí podmínky pro simulaci jsou určeny naměřenými daty. Vstupem pro simulace je měřený přetlak kapaliny v přívodním potrubí  $\Delta p$ , výstupem pak výška hladiny kapaliny  $h_{XH}$ , která je použita při optimalizaci jako proměnná  $h_2$ . Parametr je dohledáván minimalizací účelové funkce popsané rovnicí (14). Minimum je dohledáváno pomocí funkce `fminsearch`.

### 3.3 Určení směrnice pracovní přímk

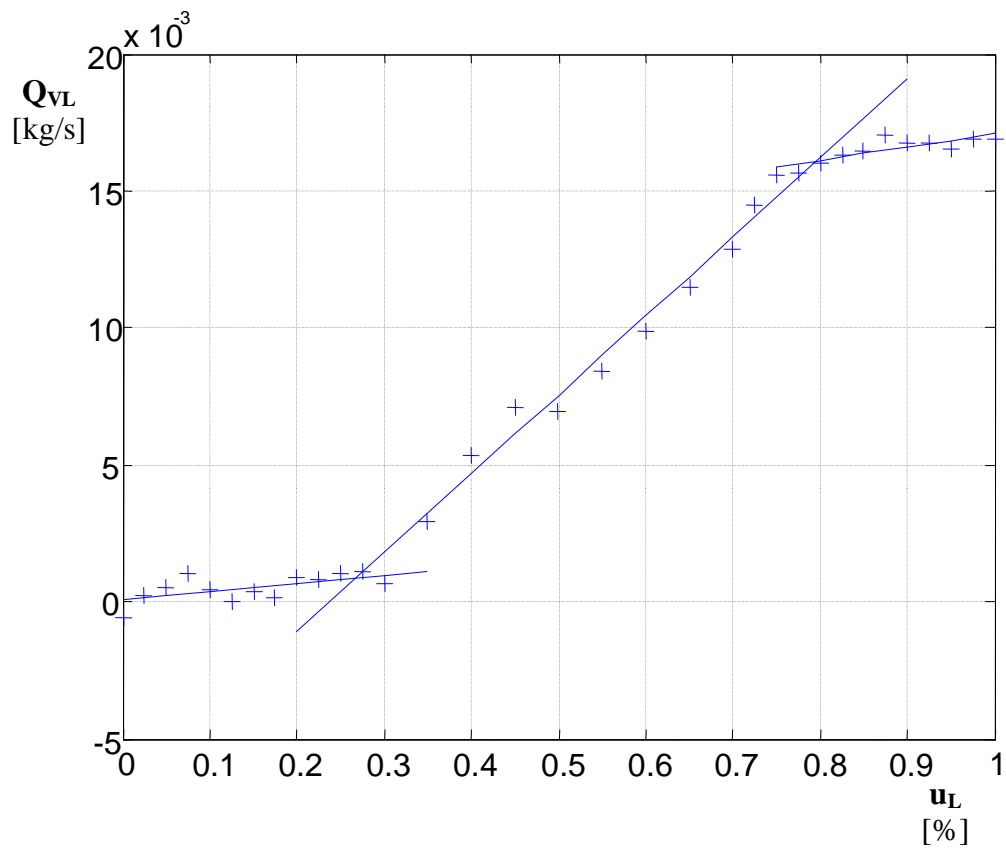
Směrnice pracovní přímk  $a_{vX}$  se určuje z dat naměřených pro skokovou změnu ovládacího signálu v čase nula. Výška hladiny v měřené nádrži byla před provedením skokové změny v ustáleném nenulovém stavu. Měření je prováděno až do dosažení nového ustáleného stavu. V průběhu celého měření je v systému zachován atmosférický tlak. Při experimentu se ukládá do souboru časový průběh výšky hladiny  $h_{XH}$ , přetlaku kapaliny v přírodním potrubí  $\Delta p$  a ovládacího signálu  $u_X$ . Směrnice pracovní přímk  $a_{vX}$  je dohledávána pomocí minimalizace účelové funkce zapsané v rovnici (14). Proměnná  $h_2$  je získávána na základě simulací v programu Simulink. Časový průběh výšky hladiny je popsána rovnicí (15), hmotnostní průtok kapaliny na výtoku z nádrže je pak popsán rovnicí (4). Hmotnostní průtok kapaliny ventilem popisuje rovnice (1). Ovládací signál je přepočítáván na otevření ventilu pomocí rovnice (2). Počáteční podmínky simulace jsou vypočítávány na základě uvedených rovnic a naměřených dat. K hledání minima je využito funkce `fminsearch`.

## 4 Závěr

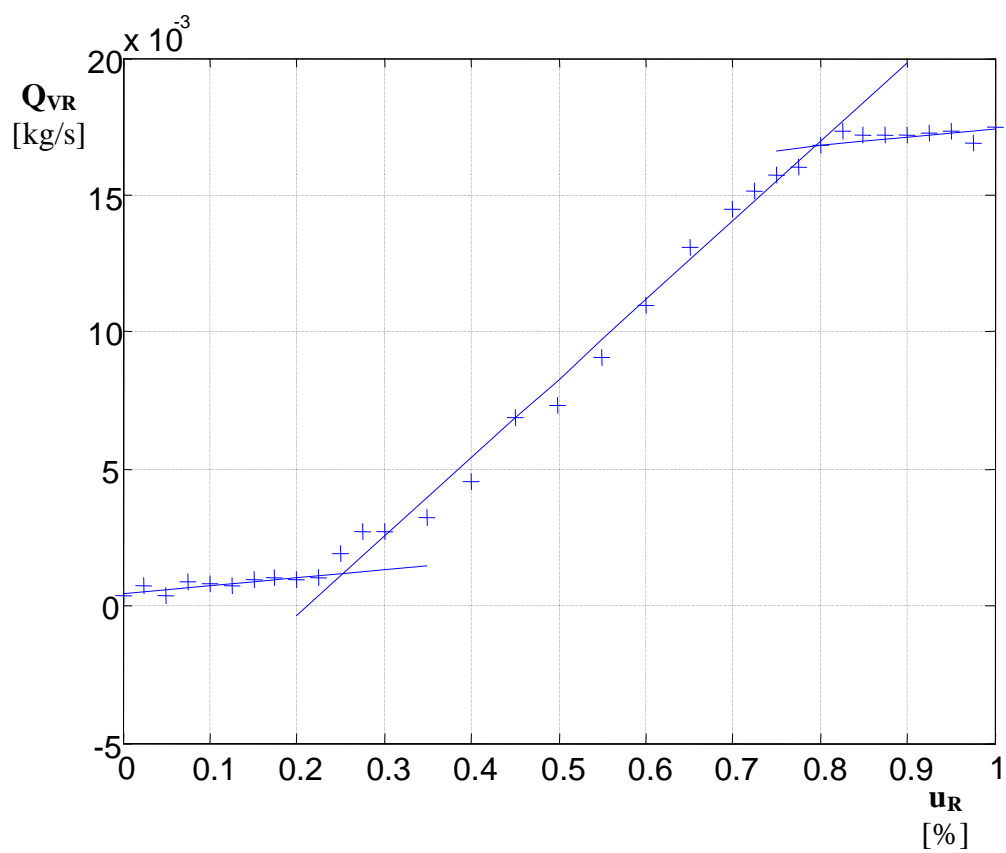
Cílem práce bylo vytvoření programu pro automatickou identifikaci parametrů ventilů použitých v HPS. Obrázky 4 a 5 zachycují statické charakteristiky ventilů, které byly získány pomocí identifikace. Pracovní oblast levého ventilu byla pomocí experimentu stanovena na:  $u_{Lmin}$  0,28,  $u_{Lmax}$  0,81, pracovní oblast pravého ventilu se nachází intervalu  $u_{Rmin}$  0,2,  $u_{Rmax}$  0,76. Výsledků lišících se maximálně v rozmezích  $\pm 0,03$  od zde uvedených hodnot, bylo dosaženo i při dalších experimentech. Ručním měřením byla pro levý ventil stanovena pracovní oblast od  $u_{Lmin}$  0,27 do  $u_{Lmax}$  0,83. Pro pravý ventil pak byla tato oblast stanovena v rozmezí od  $u_{Rmin}$  0,21 do  $u_{Rmax}$  0,76. Z porovnání výsledků získaných automatickou identifikací a manuálním měřením plyne, že způsob identifikace pracovní oblasti ventilů lze považovat za spolehlivý.

Dalším úkolem automatické identifikace bylo stanovit neuzavřenou plochu při úplném uzavření ventilu  $s_{vX}$  a směrnici pracovní přímk  $a_{vX}$ . Neuzavřená plocha levého ventilu  $s_{vL}$  má velikost  $7,14 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ , pravého pak  $1,18 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ . Směrnice pracovní přímk levého ventilu  $a_{vL}$  je 0,505, pro pravý ventil  $a_{vR}$  činí 0,4073.

Hlavním problémem při výše popsaném způsobu vyhodnocení je nutnost znát hodnotu derivace měřeného (zašuměného) signálu. Tento problém byl při určování pracovní oblasti řešen aproximací změřeného průběhu signálu funkcí blízkou teoretickému průběhu signálu a určení parametrů této funkce na základě minimalizace sumy kvadrátů odchylek. Hodnota derivace potřebná pro výpočty pak byla určena na základě derivace aproximační funkce.



Obrázek 4: Charakteristika levého ventilu



Obrázek 5: Charakteristika pravého ventilu

## Literatura

- DUŠEK, F., HONC, D. 2005. Two-dimensional valve static characteristic. In: *International Carpathian Control Conference 2005*, 24.-27.5.2005, 2005, Miskolc-Lillafüred, Maďarsko
- HONC, D.; DUŠEK, F. 2004. Hydraulicko-pneumatická soustava – technický popis. In. *Processing the 6th International Scientific – Technical Conference Process Control 2004*, Kouty nad Desnou, 8.-11.6.2004. [CD-ROM]. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004, s. 265. ISBN 80-7194-622-1.
- MACHÁČEK, J.; DUŠEK, F.; HONC, D. 2004: Laboratory multivariable hydraulic-pneumatic process. In.: *International Carpathian Control Conference*, 25.-28.5.2004, Zakopane 25-27, May 2004, Poland, Vol. I., p.133-138, ISBN 83-89772-00-0
- ŠKRABÁNEK, P. 2004. *Matematický model hydraulicko-pneumatické soustavy* [Diplomová práce]. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. 51 s.

---

Ing. Pavel Škrabánek  
Katedra řízení procesů a výpočetní techniky  
Univerzita Pardubice

e-mail: [pavel.skrabanek@upce.cz](mailto:pavel.skrabanek@upce.cz)  
tel.: 466 037 124

doc. Ing. František Dušek, CSc.  
Katedra řízení procesů a výpočetní techniky  
Univerzita Pardubice

e-mail: [frantisek.dusek@upce.cz](mailto:frantisek.dusek@upce.cz)  
tel.: 466 037 125