

Simulinkový model soustavy spojených nádrží

Simulink model of interconnected tanks

Vojtěch Brhel

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch BRHEL**
Osobní číslo: **A06241**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Simulinkový model soustavy spojených nádrží**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je změřit charakteristické vlastnosti reálného laboratorního modelu tří spojených válcových nádrží (Amira DTS200) a na základě těchto měření pak vytvořit model chování v prostředí Matlab/Simulink

1. Stručně popište postupy používané pro identifikaci a modelování reálných technologických systémů.
2. Odvoďte matematický model ideální soustavy tří spojených válcových nádrží ve stejné konfiguraci, jako je systém Amira DTS200. Model realizujte v prostředí MATLAB/Simulink.
3. Změřte potřebné statické a dynamické vlastnosti jednotlivých součástí systému Amira DTS200 a na základě těchto měření aktualizujte simulinkový model systému.
4. Na základě vstupně-výstupních dat porovnejte vytvořený model a jeho reálný předobraz.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Bobál, V. Identifikace systémů. Vysoké učení technické v Brně. 1990.
2. DTS200 Laboratory Setup Three - Tank - System. Duisburg: Amira GmbH. 2002. 270s.
3. PIŠAN, Radim. Knihovna modelů technologických procesů . [s.l.], 2008. 74 s. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí diplomové práce Ing. František Gazdoš, Ph.D.
4. MÍKA, V., et al. Chemické inženýrství 1A, 1B. Praha : VŠCHT, 1996. 2 sv. (293, 180 s.). ISBN 8070801646.
5. PERŮTKA, K. MATLAB : základy pro studenty automatizace a informačních technologií / . Vyd. 1. Zlín : Ústav řízení procesů, Institut řízení procesů a aplikované informatiky, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. 303 s. : ISBN 8073183552.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Chalupa, Ph.D.

Ústav řízení procesů

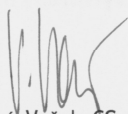
Datum zadání bakalářské práce:

5. března 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

1. června 2010

Ve Zlíně dne 5. března 2010


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu modelu soustavy spojených nádrží v prostředí simulink s použitím s-function. Veškerá data v něm použitá vycházela s několika vyhodnocených měření a technických parametrů laboratorní soustavy Amira DTS 200. Vytvořený simulinkový model simuluje při předvoleném zadání výchozích parametrů chování reálné laboratorní soustavy.

Klíčová slova: Simulink, s-function, simulace, model

ABSTRACT

This Bachelor thesis is focused on development of a Simulink model of interconnected tanks using s-function. All the data used to create the model are based on measurements and technical parameters of the laboratory system Amira DTS 200.

The default settings of the created Simulink model are used to simulate behaviour of real laboratory system Amira DTS 200.

Keywords: Simulink, s-function, simulation, model

V první řadě bych chtěl velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Chalupovi, Ph. D. za jeho odborné rady a připomínky během mé práce na simulinkovém modelu soustavy spojených nádrží. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Ondrovi Machalskému za jeho cenné rady při programování.

Moje poděkování patří také všem, kteří mě podporovali během mého studia.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

podpis diplomanta

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1 IDENTIFIKACE | 13 |
| 1.1 ÚČEL MODELOVÁNÍ..... | 13 |
| 1.1.1 Systém | 13 |
| 1.1.2 Model | 14 |
| 1.1.3 Fikce pravdivého modelu | 15 |
| 1.2 POSTUP IDENTIFIKACE | 15 |
| 1.2.1 Data, modely, kritéria..... | 15 |
| 1.2.2 Ověření platnosti modelu | 16 |
| 1.2.3 Identifikační cyklus | 17 |
| 1.3 STRUKTURY MODELŮ | 18 |
| 1.4 „WHITE BOX“ | 20 |
| 1.5 „BLACK BOX“ | 20 |
| 1.6 „GREY BOX“ | 21 |
| 1.7 LINEÁRNÍ VERSUS NELINEÁRNÍ MODEL Y | 21 |
| 1.8 MODEL Y VE SPOJITÉ VERSUS V DISKRÉTNÍ OBLASTI..... | 22 |
| 2 MODELOVÁNÍ | 25 |
| 2.1 OBECNÉ PRINCIPY MODELOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ BILANCÍ..... | 25 |
| 2.2 KLASIFIKACE MATEMATICKÝCH MODELŮ | 26 |
| 3 MATLAB | 28 |
| 3.1 VYTVOŘENÍ S-FUNKCE..... | 28 |
| 3.2 UKÁZKA M-FILU PRO KONCENTRAČNÍ SMĚŠOVAČ KAPALIN | 29 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 31 |
| 4 AMIRA DTS200 | 32 |
| 4.1 POPIS | 32 |
| 4.1.1 Technická data..... | 34 |
| 4.2 OVLÁDÁNÍ..... | 34 |
| 5 ZÁKLADNÍ MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ POPIS SOUSTAVY | 37 |
| 6 MODELOVÁNÍ SYSTÉMU AMIRA DTS200 | 39 |
| 6.1 VERZE 0 – ZÁKLADNÍ MODEL..... | 39 |
| 6.1.1 Kalibrace výšky hladiny | 39 |
| 6.1.2 Přepočet signálu čerpadel | 41 |
| 6.1.3 Signály z ventilů..... | 41 |
| 6.2 VERZE 1 – PŘIDÁNÍ OMEZENÍ A CHARAKTERISTIKY VYPOUŠTĚCÍCH POTRUBÍ..... | 41 |
| 6.2.1 Omezení vstupů a výstupů | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2.2 | Modelování vypouštěcích potrubí..... | 43 |
| 6.3 | VERZE 2 – MODELOVÁNÍ VENTILŮ | 45 |
| 6.3.1 | Popis experimentu pro zjištění hystereze | 45 |
| 6.3.2 | Konstanta ventilu | 53 |
| 7 | MODEL SOUSTAVY V PROSTŘEDÍ SIMULINK | 55 |
| 7.1 | UŽIVATELSKÉ NASTAVENÍ S- FUNKCE | 55 |
| 7.2 | VSTUPY, VÝSTUPY, PARAMETRY A KONSTANTY S-FUNKCE | 58 |
| 7.3 | ZÁKLADNÍ STRUKTURA S-FUNKCE | 59 |
| 7.4 | VERZE 0 | 60 |
| 7.5 | VERZE 1 | 61 |
| 7.6 | VERZE 2 | 61 |
| 8 | POROVNÁNÍ | 62 |
| | ZÁVĚR | 66 |
| | ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ | 67 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 68 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 69 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 71 |
| | SEZNAM TABULEK | 73 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 74 |

ÚVOD

Předpokladem efektivního řízení daného objektu je znalost jeho vlastností. Je zřejmé, že má-li být řízení optimální, musíme dokonale a přesně znát vlastnosti řízeného objektu. Proto je velký zájem věnován tvorbě matematických modelů objektů řízení, neboť tyto modely jsou základem pro tvorbu řídicích systémů, při výběru algoritmů řízení apod.

Poznamenejme, že matematické modely, tak jako modelování vůbec, nemají základní význam jen v oblasti řízení, kybernetiky, systémového inženýrství nebo v jiných technických vědách, ale dnes již ve většině vědních disciplín, protože představují nejen vhodnou formu na vyjádření poznatků o zkoumaných objektech a jevech, ale spolu s prostředky výpočetní techniky představují velmi efektivní nástroj k jejich dalšímu a hlubšímu zkoumání. Metody ztotožnění modelu s vyšetřovaným objektem jsou předmětem (cílem) identifikace jako vědní disciplíny. Identifikace a modelování jsou tedy procesy, které se navzájem prolínají.

Člověk určuje hledisko identifikace, určuje její cíl (k jakému účelu bude modelu použito zda k simulaci nebo k řízení daného objektu), rozlišuje podstatné od nepodstatného a vytváří tak první zjednodušenou reprezentaci objektu. Těžko pro tyto úvahy nalézt nějaký předpis, jak je provádět.[1]

V této bakalářské práci se zaměřím na vytvoření modelu tří spojených válcových nádrží (nazývaných též Amira DTS200) v prostředí MATLAB/Simulink. Tento model umožňuje urychlit práci na této laboratorní soustavě a také ji zjednodušit, což přispěje k zefektivnění práce. Cílem je navrhnout matematický model, který zohledňuje všechny důležité vlastnosti této reálné soustavy s ohledem na jeho budoucí použití, tyto vlastnosti poté patřičným způsobem použít při tvoření programu v prostředí MATLAB M-File za pomoci jedné z jeho funkcí (S-Function). Po vytvoření tohoto základního modelu je také zapotřebí naměřit na laboratorní soustavě charakteristiky vypouštěcích a přepouštěcích ventilů a z nich vyhodnotit potřebná data pro zpřesnění modelu v prostředí MATLAB/Simulink. Tento hotový model je třeba dále porovnat s naměřenými skutečnostmi.

První oddíl tj. Teoretické základy, je rozdělen do několika kapitol. První kapitola obsahuje obecné seznámí s identifikací, která byla v této práci využita k návrhu modelu a určení jeho parametrů. V pořadí druhá kapitola se zaměřuje na modelování s použitím bilancí, které bylo také patřičně využito a také se zaměřuje na klasifikace matematických modelů. Další kapitola se zabývá vývojovým a výpočetním prostředím Matlab, ve kterém byl celý model soustavy tří spojených nádrží

zkonstruován a naprogramován. Tato kapitola se zabývá s-funkcemi, je zde také k nahlédnutí příklad programu s M-filou.

V druhém oddílu nazvaném praktická část je v první kapitole popsána soustava spojených nádrží Amira DTS200. V další kapitole se zaměřujeme na stručný popis matematicko fyzikální soustavy a jejích diferenciálních rovnic. V pořadí třetí kapitola v tomto oddílu popisuje modelování soustavy Amira DTS200. Je rozčleněna na verze 0, 1, 2. V předposlední kapitole je rozepsáno samotné modelování v prostředí Simulink a programové rozlišení jednotlivých verzí. Poslední kapitola pojednává o závěrečném srovnání výsledků z modelu s naměřenými daty na soustavě při stejných počátečních podmínkách.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 IDENTIFIKACE

1.1 Účel modelování

Termíny model a modelování můžeme interpretovat mnoha různými způsoby, které se liší v závislosti od použití takového modelu. V tomto textu budeme pod pojmem „*model*“ rozumět matematický popis reálného procesu, který je vytvářený pro určité účely. Tyto účely mohou mimo jiné být:

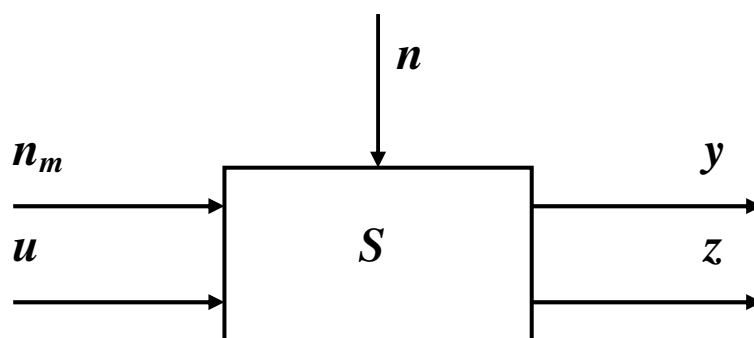
- hluboké porozumění modelovanému systému ,
- odhadnutí signálů, které nemůžeme měřit,
- testování hypotéz (diagnózy v medicíně),
- předpovídání krátkodobého (adaptivní řízení) a dlouhodobého (ekonomické modely) dynamického chování,
- řízení procesů (regulace okolo nominálního bodu).

Ať je již tento účel jakýkoliv, vždy by měl být znám před začátkem modelování, protože značně ovlivňuje proceduru hledání modelu [2]

1.1.1 Systém

Systém (proces resp. soustava) je součástí našeho okolí, kterou jsme z něho vybrali a kterou považujeme za celek, se kterým jsme ve vzájemné interakci (obr.1):

- pozorujeme jeho vnější charakteristiky (chování) a výsledek tohoto pozorování označme jako výstup ze systému, vektor \mathbf{y} (viz obrázek č.1)
- ze systému mohou vystupovat další charakteristiky (označme je \mathbf{z}), které v sobě mohou zahrnovat neměřitelné signály a tím se lišit od \mathbf{y} ,
- působíme na systém veličinami, jejichž průběh v čase známe a můžeme ho více či méně ovlivňovat. Tyto veličiny jsou vstupy a označme je jako \mathbf{u} ,
- na systém působí dva druhy poruch: ty, které můžeme měřit přímo na vstupu, nazveme jako měřené poruchy a označíme jako \mathbf{n}_m ; ty, jejichž působení můžeme pozorovat pouze na výstupu ze systému, nazveme šumem a označíme jako \mathbf{n} .

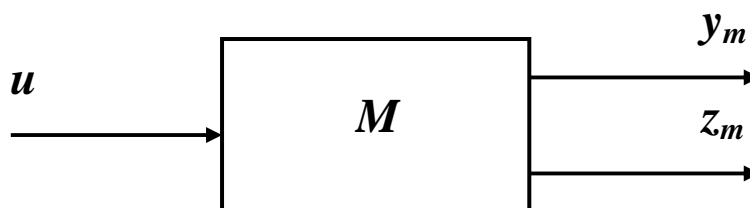


Obr. 1. Systém

Pro účely modelování je rozdíl mezi vstupním signálem u a n_m nepodstatný, takže se měřenou poruchou již dále nebudeme zabývat a bude pro nás jen dalším vstupem do systému.

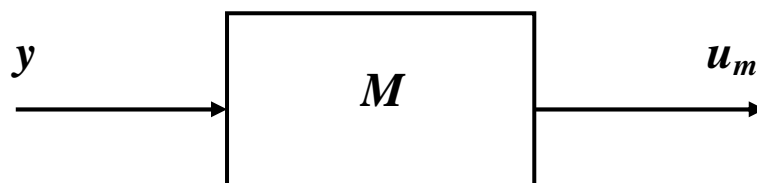
1.1.2 Model

Modelem dynamického systému rozumíme pravidlo, podle kterého můžeme z předem známých, nebo změřených veličin na systému vypočítat další veličiny, které nás zajímají a které, jak doufáme, se budou dostatečně blížit skutečným hodnotám uvažovaného systému. Model nejčastěji vypočítává ze známého vstupu u , výstup y_m (výstup modelu) a je navržen tak, aby se výstup modelu co nejvíce blížil skutečnému výstupu ze systému y . Zkráceně lze říci, že úkolem modelu je co nejvěrohodněji predikovat či reprodukovat chování systému. Jestliže se z liší od y , může z modelu také vystupovat i vektor z_m (viz. obrázek č.2).



Obr. 2. Model

Méně tradičním přístupem, který je ale vhodné také zmínit, je model, který ze známého výstupu ze systému spočítá vektor u_m , který se co nejvíce blíží vstupu skutečnému u . Tato skupina modelů se nazývá „Inverzní modely“ (viz. obrázek č.3).



Obr. 3. Inverzní model

1.1.3 Fikce pravdivého modelu

Skutečný systém je jiným objektem než námi vytvořený matematický model. V určitém slova smyslu zde existuje neproniknutelná ale průhledná přepážka mezi našim světem matematických popisů a světem skutečným. Můžeme se přes toto okno dívat a porovnávat určité vlastnosti fyzických systémů s naším matematickým popisem, nikdy ale nemůžeme tyto dva systémy zcela propojit, tak jako nemůžeme sestavit „pravdivý model“ nějakého procesu. Přijatelnost našich modelů se tak raději má řídit jejich „účelností“ než jejich „pravdivostí“ [2].

1.2 Postup identifikace

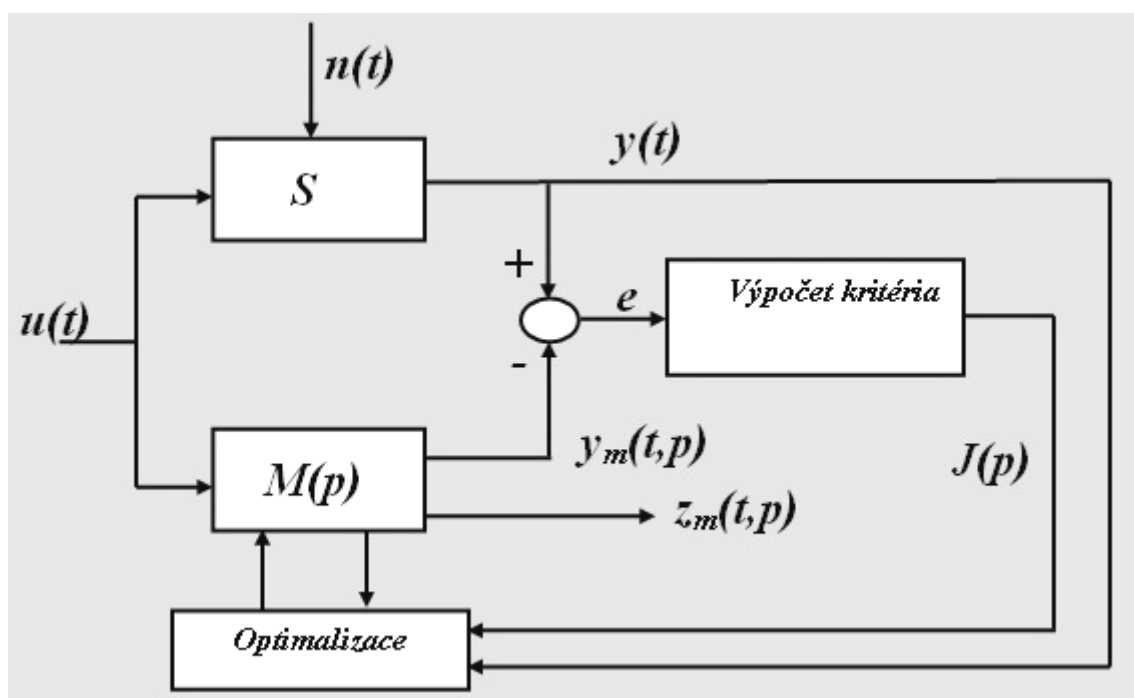
1.2.1 Data, modely, kritéria

Konstrukce modelu z dat pracuje s třemi základními objekty:

- 1. Data** – Vstupně-výstupní data jsou často nasnímána v průběhu identifikačního experimentu, při kterém má uživatel možnost rozhodnout o tom, jaký signál bude měřit a popř. také může generovat vstupní signál do systému. Úkolem uživatele je, s ohledem na technicko-ekonomické aspekty, vybrat optimální variantu z množiny možných řešení tak, aby data poskytovala co nejvíce informací o identifikovaném (modelovaném) systému. V mnoha případech ale můžeme být omezeni fyzikálními, či technologickými možnostmi systému, popř. nemáme vůbec možnost ovlivnit chování systému a musíme se spokojit jen s měřením na systému v průběhu jeho normální činnosti. To pak samozřejmě ovlivňuje naši schopnost přiblížit se ke skutečnému chování takového systému a to zejména v případě, kdy se značně liší provozní podmínky systému od podmínek, za kterých bylo prováděno měření pro účely identifikace.
- 2. Množina kandidátů na model** – Výběr kandidátů na model je nejdůležitější a zároveň nejsložitější volbou v celém procesu identifikace. Zkušenosti, pochopení podstaty

identifikovaného systému a v neposlední řadě i inženýrská intuice se zde musí zkombinovat pro dosažení co nejlepšího a nejjednoduššího modelu. Někdy je množina modelů vybrána až po matematicko-fyzikální analýze, kde je model s neznámými parametry sestaven ze základních fyzikálních zákonů a dalších známých závislostí (tzv. „gray box“). V jiných případech, kdy nechceme popř. ani z časových či jiných důvodů nemůžeme brát v úvahu fyzikální podstatu modelovaného systému, mohou být použity standardní lineární modely. Tento přístup k modelování se pak nazývá „black box“.

3. **Výběr „nejlepšího“ modelu** – je vlastní identifikací. Ohodnocení kvality modelu a výběr toho „nejlepšího“ se nejčastěji provádí na základě toho jak je model schopen reprodukovat měřená data a to nejlépe data z jiného měření než data, na kterých byl model identifikován. Jak se provádí výběr nejlepšího modelu je schématicky znázorněno na následujícím obrázku:



Obr. 4. Tok informací při optimalizaci

Optimalizační algoritmus vypočítává ze známých informací (struktura modelu, rozdíl chování skutečného systému a modelu, trend kritéria $\mathbf{J}(\mathbf{p})$,...) „nejlepší“ hodnoty optimalizovaných koeficientů \mathbf{p} a to tak, aby bylo minimalizováno (popř. maximalizováno) kritérium $\mathbf{J}(\mathbf{p})$. Tok informací při optimalizaci je zobrazen na schématu (viz. obrázek č.4).

1.2.2 Ověření platnosti modelu

Po provedení měření, volby kandidátů na model a výběru toho „nejlepšího“ dostáváme model, který nejlépe reprodukuje data pro dané kritérium a strukturu modelu a o kterém musíme rozhodnout, jestli je „dostatečně dobrý“ pro naše účely. Takový test zjišťuje jak model odpovídá měřeným

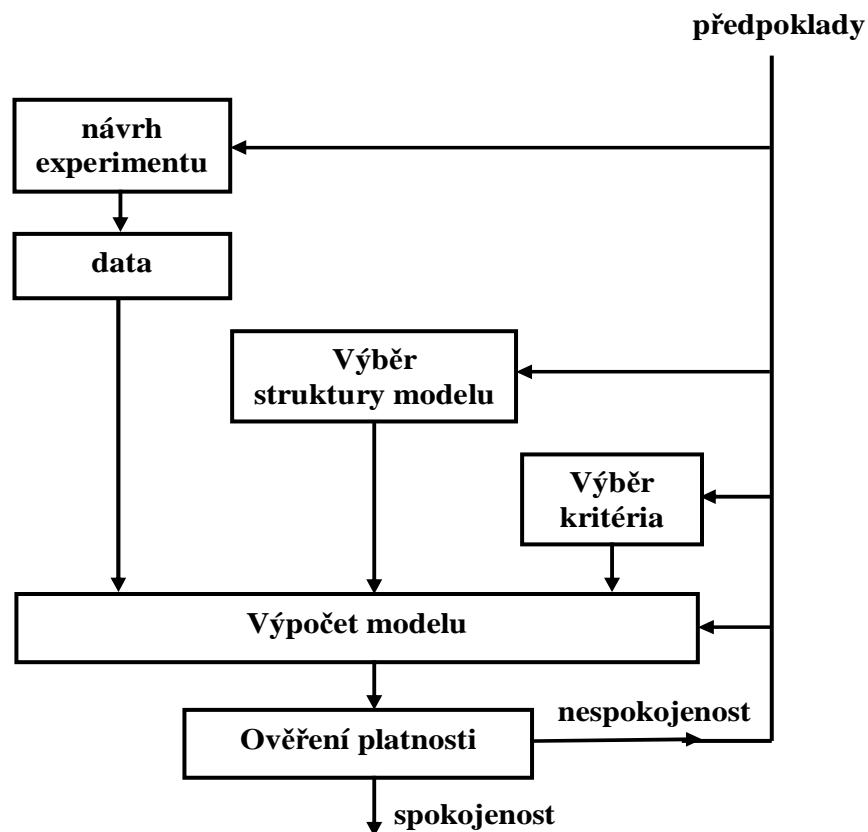
datům, známým fyzikálním závislostem a také jestli se hodí pro náš účel použití. Model, který nevyhoví tomuto testu bývá odmítnut a my se vracíme v identifikačním cyklu zpět a pokoušíme se nalézt model „lepší“, zatímco vyhovující model nám poskytne určitou důvěru v jeho použitelnost. Model nemůže být nikdy přijat jako konečný a pravdivý popis systému, vždy jeho chování reprodukuje jen s určitou přesností [2].

1.2.3 Identifikační cyklus

Proces hledání „uspokojivého“ modelu má své logické pořadí: nejprve je nutno získat informace o identifikovaném systému (měření a uchovávání dat), poté se vybírají vhodné kandidáti na model (struktury modelu) a nakonec z nich vybereme ten „nejlepší“. Každý si určitě dokáže lehce představit, že vybraný model neprojde testem ověření kvality, potom se musíme v identifikačním cyklu vrátit zpět a změnit některé jeho kroky (viz. obrázek č.4).

Model nemusí vyhovovat z různých důvodů, uveďme např.:

- ❑ selhal numerický algoritmus hledající nejlepší model dle daného kritéria,
- ❑ špatně zvolené kritérium,
- ❑ nevhodná struktura modelu,
- ❑ změřená data nebyla dostatečně informativní.



Obr. 4 Identifikační cyklus

1.3 Struktury modelů

Volba struktury modelu je jedním z nejsložitějších úkolů při identifikaci systémů a intuice zde hraje velmi podstatnou roli pro návrh jednoduchého a vyhovujícího modelu. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (1.1.3), nikdy nemůžeme vytvořit tzv. „pravdivý model“ a ve velké míře záleží na nás do jaké hloubky se budeme zabývat fyzikální podstatou modelovaného systému a co se rozhodneme zanedbat.

V této kapitole budeme rozebírat různé skupiny modelů a výběr mezi těmito skupinami by se měl řídit dle:

- účelů modelování,

- pracovních podmínek, při kterých bude model použit (rozsahy a vlastnosti vstupů, šumů, ...),
- přípustných nákladů na model,
- různých dalších užitečných informací (např. informace o řídicím systému, s kterým bude model spolupracovat).

Tab. 1. Vlastnosti analytické a experimentální identifikace [9]

| Vlastnos modelu | Analitická identifikace | Experimentální identifikace |
|--------------------------------------|--|--|
| Struktura modelu | Struktura vyplývá z přírodních zákonů. | Struktura musí být zvolena. |
| Popis systému | Systém je popsán pomocí vnitřních stavových proměnných a vstupně výstupního chování | Systém je popsán pouze pomocí relace vstup - výstup. |
| Parametry modelu | Parametry modelu jsou funkcemi systémových veličin, mají fyzikální význam. | Parametry modelu jsou analytické proměnné, které neumožňují většinou nalézt souvislost s fyzikálními systémovými proměnnými. |
| Platnost modelu | Model platí pro celou třídu typů procesu a pro různé provozní stavy. | Model platí pouze pro zkoumaný proces a konkrétní provozní stav. Proto lze chování popsat relativně přesně. |
| Existence originálního modelu | Model může být vytvořen i pro neexistující systém. | Model může být identifikován pouze pro existující systém |
| Znalost vnitřní struktury | Důležité vnitřní procesy systému musí být známy a matematicky popsatelné. | Vnitřní procesy nemusí být známy. |
| Opakované použití metody | Každá tvorba modelu představuje opakovanou aplikaci fyzikálních zákonů. Zvyšování know how řešitele. | Metody nezávislé na jednotlivých systémech, vytvořené programové vybavení může být opakovaně použito pro identifikaci různých systémů. |
| Časová náročnost | Tvorba modelu vyžaduje větší časové nároky. | Menší časové nároky. |

1.4 „White box“

Fyzikální modely („white box“) se získávají tzv. matematicko-fyzikální analýzou, při které je systém rozebrán na malé součásti, pro které jsou napsány známé základní rovnice popisující jejich chování na základě fyzikálních zákonů a pravidel. Metody vytvářející takové modely vycházejí z principů zachování energie a rovnováhy sil a momentů (např. metody „Bond’s“ grafů, Lagrangeovy rovnice, ...). Tento přístup k modelování sebou přináší specifické problémy. Pro složitější systémy se počet parametrů začíná neúnosně zvyšovat a i simulace potom může být pomalá, v reálném čase i nemožná. Např. pro použití modelů některých složitých systémů pro školení obsluhy (na simulátorech), je někdy třeba je zjednodušit tak, aby mohly na současných počítačích běžet v reálném čase. Dalším specifickým problémem je to, že asi nikdy nepostihneme složitost a transparentnost přírody zcela, ale musíme si zvolit úroveň, do které se chceme ponořit (např. když si vezmeme elektrický odpor jako součást elektrického obvodu, tak ho můžeme modelovat jednoduchým vztahem (Ohmovým zákonem), jestliže ale půjdeme o úroveň níže, zjistíme, že na skutečný odpor se můžeme dívat jako na odpor a cívku zapojené v sérii, ...) [2].

1.5 „Black box“

„*Black box*“ modely stojí na opačné straně spektra. Tyto modely aproximují chování systému bez jakýchkoliv nároků na informace o vlastním systému. Není ani důležité co jednotlivé vstupy a výstupy ve skutečnosti znamenají a v jakých jednotkách se udávají. Parametry těchto modelů nemají žádný fyzikální význam. Např. jakékoliv měření můžeme s určitou přesností aproximovat polynomem $y_m = p_1 + p_2t + p_3t^2 + \dots$, jestliže stupeň polynomu bude dostatečně vysoký. Takový model bude samozřejmě mít velice špatné schopnosti předvídat chování obecného dynamického systému, protože vůbec nerespektuje vstupy do něho. Samozřejmě ale existují i vyspělejší struktury „black box“ modelů které mohou uspokojivě pokrýt skupiny „lineárních“ dynamických systémů.

Vlastnosti těchto dvou skupin modelů jsou shrnuty v tabulce tab.2 [2].

Tab. 2 Porovnání "white" a "black box" modelů

| MODELY | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | "White box" | "Black box" |
| Parametry | mají konkrétní význam | nemají konkrétní význam |
| Simulace | dlouhá a složitá | rychlá a jednoduchá |
| Fyzikální informace o systému | mohou být zahrnuty viditelně | většinou nebrány v úvahu |
| Oblast platnosti modelu | velká (jestliže je správná struktura) | omezená |

1.6 „Grey box“

V praxi se neprokázala užitečnost použití jen jedné metody návrhu modelů. Měla by být použita kombinace různých metod, čímž odpadají omezení způsobovaná jednotlivými metodami. Grey box tedy není ani black box, protože známe některé vnitřní struktury, ale zároveň se nejedná ani o white box, protože znalosti vnitřních struktur nejdou do hloubky.

1.7 Lineární versus nelineární modely

Rozlišme dva typy linearit:

- modely lineární ve vstupech
- modely lineární v parametrech

Model je *lineární ve vstupech*, jestliže jeho výstupy splňují princip superpozice s ohledem na jeho vstupy, což znamená jestliže platí:

$$\mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}, \lambda \mathbf{u}_1 + \mu \mathbf{u}_2) = \lambda \mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}, \mathbf{u}_1) + \mu \mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}, \mathbf{u}_2) \quad (1)$$

kde $\mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}, \mathbf{u})$ je výstup modelu v čase t , s parametry \mathbf{p} , se vstupy \mathbf{u} a s nulovými počátečními podmínkami.

Když inženýři pracující v oblasti technické kybernetiky hovoří o lineárních modelech mají většinou na mysli tento typ linearity. Navíc ještě většinou předpokládají, že se jedná o model časově nezávislý, což znamená, že jeho parametry nejsou závislé na posunu časové osy.

Model je *lineární v parametrech*, jestliže jeho výstupy splňují princip superpozice s ohledem na jeho parametry, to znamená jestliže platí:

$$\mathbf{y}_m(t, \lambda \mathbf{p}_1 + \mu \mathbf{p}_2, \mathbf{u}) = \lambda \mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}_1, \mathbf{u}) + \mu \mathbf{y}_m(t, \mathbf{p}_2, \mathbf{u}) \quad (2)$$

Tam, kde to jde se při modelování preferují lineární struktury před nelineárními. Pro modely lineární ve vstupech existuje rozsáhlá matematická teorie (stabilita, optimální řízení, robustní řízení, adaptivní řízení, ...) a proto je tento popis zvláště výhodný pro oblast technické kybernetiky. Nalezení parametrů modelů lineárních v parametrech je většinou jednoduché a mnohdy je možné použít explicitního vztahu a tím se vyhnout iterování při hledání „nejlepšího“ modelu z množiny kandidátů.

Na druhou stranu se v praxi těžko setkáme se systémem, který by byl lineární v celém rozsahu vstupně-výstupních veličin a proto mají lineární struktury jen omezenou oblast použitelnosti. Proto nemůžeme nelineární struktury úplně vyloučit z okruhu našeho zájmu. Osvědčí se např. tam, kde řízení navrhujeme na linearizovaném modelu, ale simulaci chování provádíme na modelu nelineárním.

1.8 Modely ve spojitě versus v diskrétní oblasti

Modelované soustavy převážně existují ve spojitě časové oblasti. Proto také tradiční přístup k modelování je popis systémů diferenciálními rovnicemi, zvláště pak stavovými modely:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{p})\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0(\mathbf{p}) \\ \mathbf{y}_m(t) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{p})\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Z tohoto typu popisu pak můžeme snadno přejít na popis pomocí přenosových matic:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m(s, \mathbf{p}) &= \mathbf{H}_1(s, \mathbf{p})\mathbf{u}(s) + \mathbf{H}_2(s, \mathbf{p})\mathbf{x}_0(\mathbf{p}) \\ \mathbf{H}_1(s, \mathbf{p}) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})[s\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{p})]^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{p}) + \mathbf{D}(\mathbf{p}) \\ \mathbf{H}_2(s, \mathbf{p}) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})[s\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{p})]^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

kde s je Laplaceův operátor a I jednotková matice. A konečně se můžeme vrátit do časové oblasti a přejít na popis pomocí soustavy diferenciálních rovnic:

$$\sum_{i=0}^n a_i y_m^{(i)} = \sum_{i=0}^m b_i u^{(i)} \quad (5)$$

Masové používání číslicových počítačů znamenalo veliký rozmach teorie řízení v diskrétní časové oblasti. Simulace diskrétních modelů na číslicových počítačích je mnohem rychlejší a jednodušší než u spojitých modelů, což je předurčuje pro řízení v reálném čase. Avšak používání diskrétních modelů může způsobit ztrátu některých informací o chování modelovaného spojitého systému.

Podobně jak jsme to provedli ve spojitě oblasti, tak i v diskrétní oblasti zavedeme stavový popis:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{p})\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0(\mathbf{p}) \\ \mathbf{y}_m(t) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{p})\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

A analogicky můžeme přejít na popis pomocí přenosových matic:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m(z, \mathbf{p}) &= \mathbf{H}_1(z, \mathbf{p})\mathbf{u}(z) + \mathbf{H}_2(z, \mathbf{p})\mathbf{x}_0(\mathbf{p}) \\ \mathbf{H}_1(z, \mathbf{p}) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})[z\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{p})]^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{p}) + \mathbf{D}(\mathbf{p}) \\ \mathbf{H}_2(z, \mathbf{p}) &= \mathbf{C}(\mathbf{p})[z\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{p})]^{-1}z \end{aligned} \quad (7)$$

Tento popis můžeme jednoduše přepsat ve tvaru soustavy rekurentních diferenčních rovnic:

$$\sum_{i=-1}^{n-1} a_i y_m(t-i) = \sum_{k=0}^{m-1} b_k u(t-k) \quad (8)$$

Diferenční rovnice se často píšou ve zhuštěnější formě, kde se používá operátor zpoždění $q^{-1}x(t) = x(t-1)$:

$$A(q^{-1})y_m(t+1) = B(q^{-1})u(t+1) \quad (9)$$

Z důvodu snadnější simulace diskrétních systémů lze posunout hranice experimentálního studování jejich vlastností podstatně dále. Na druhou stranu jsme omezeni vzorkovací periodou, v jejíchž násobcích je počítán výstup modelu. Navíc v sobě mohou diskrétní systémy skrývat oscilace přidruženého spojitého systému. A konečně parametry diskrétních systémů nemívají konkrétní význam (závisí na vzorkovací periodě) a vlastnosti spojitých a diskrétních systémů nejsou vždy analogické.

Vlastnosti těchto dvou skupin modelů jsou shrnuty na následující tabulce (tabulka 3).

Tab. 3. Porovnání modelů ve spojitě a diskrétní oblasti

| MODELŮ | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| | Spojité oblasti | Diskrétní oblasti |
| Parametry | nezávisí na vzorkovací periodě | závisí na vzorkovací periodě |
| Simulace | vyžaduje diskretizaci | jednoduchá |
| Fyzikální informace o systému | mohou být zahrnuty viditelně | většinou nebrány v úvahu (zesílení výjimkou) |
| Časy vzorkování | nezávisle vybírány | dané vzorkovací periodou |

2 MODELOVÁNÍ

2.1 Obecné principy modelování na základě bilancí

Matematickým modelem procesu nebo zařízení rozumíme matematické vztahy popisující jeho chování, nejčastěji v závislosti na čase. Těmi vztahy jsou obvykle diferenciální rovnice (obyčejné i parciální) nebo jejich soustavy, ale také nelineární rovnice a jejich soustavy, soustavy lineárních rovnic a podobně. Při formulaci matematického vyjádření jednotlivých členů bilanční rovnice vycházíme ze základních vztahů z fyziky a fyzikální chemie, popřípadě z různých empirických vztahů.

Bilancemi rozumíme aplikaci vět o zachování. Jejich využití v oblasti matematického modelování je velice časté přičemž bilancovat lze jen tzv. extenzivní veličiny. Především se jedná o zákony zachování hmoty a energie - hovoříme o látkových a energetických bilancích. Chceme-li se zabývat bilancováním, musíme nejprve vyjasnit některé základní pojmy:

Bilancovaný systém: Prostorová oblast, která má definované hranice s okolím. Důležitá je volba hranic systému. Vycházíme při ní jednak ze skutečného (konstrukčního) tvaru systému, jednak z toho, zda chceme vytvořit model systému se soustředěnými parametry (v matematickém popisu nefigurují souřadnice jako nezávisle proměnné), nebo s rozloženými parametry (alespoň jedna souřadnice je v matematickém popisu použita jako nezávisle proměnná).

S volbou rozhraní úzce souvisí volba vhodné souřadnicové soustavy. Tu se snažíme volit vždy tak, aby získaný matematický model byl co nejjednodušší. Základní souřadnicové soustavy jsou kartézská (pravoúhlá), cylindrická (válcová) a sférická (kulová)[7].

Bilanční časový interval: Časový úsek, během kterého bilancované veličiny sledujeme. Při bilancování musíme nejprve zvolit bilanční časový interval. Jeho volba je dána jednoduchým pravidlem: pokud se bilance týká ustáleného stavu systému (tj. hodnoty veličin se s časem nemění), pak můžeme volit časový interval zcela libovolný (nejčastěji jednotkový), pokud chceme modelovat systém jako proměnný v čase (tzv. dynamický model), pak musíme volit bilanční časový interval infinitesimálně malý, tj. dt . [7].

Základní bilanční rovnice má tvar:

$$VSTUP + ZDROJ = VÝSTUP + AKUMULACE$$

VSTUP je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval vstoupí z okolí přes rozhraní do systému.

VÝSTUP je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval vystoupí ze systému přes rozhraní do okolí.

ZDROJ je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval uvnitř systému vznikne nebo zanikne (rozumí se vznik z jiné, nebilancované veličiny, nebo změna na jinou, nebilancovanou veličinu - např. chemická přeměna, přeměna elektrického proudu na teplo, tepelné zbarvení chemických reakcí, růst či odumírání mikroorganismů atd.).

AKUMULACE je změna množství bilancované veličiny uvnitř systému za bilanční časový interval.

Velice důležitá je volba kladných směrů ve vybrané souřadnicové soustavě. Jestliže ji důsledně neprovádíme a nedodržíme, vznikají neřešitelné znaménkové problémy vedoucí k nesprávným výsledkům[7].

2.2 Klasifikace matematických modelů

Během identifikace a analýzy modelovaného systému je vhodné určit, do jaké kategorie matematický model spadá, což nám umožní snadněji rozpoznat základní vlastnosti a strukturu hledaného modelu.

Podle toho zda zahrnujeme do modelu náhodné veličiny lze modely rozdělit do dvou skupin: deterministických a stochastických modelů. Dále lze tyto skupiny rozdělit dle vztahu k průběhu času (dynamické, statické) nebo spojitosti (spojité, diskrétní). Matematické modely jsou obvykle složeny z proměnných, které jsou abstrakcí hledaných složek systému a operátorů nad těmito proměnnými, které mohou reprezentovat algebraické operace, funkce, funkcionály, diferenciální operátory, atd. Pokud operátory v matematickém modelu jsou lineární, hovoříme o lineárních modelech, v opačném případě o nelineárních modelech. Dále můžeme uvažovat modely se soustředěnými (u homogenních modelů) a distribuovanými parametry (u heterogenních modelů). Mezi těmito skupinami leží mnoho dalších typů modelů, dále tříděných podle mnoha dalších kritérií, které lze využít.

Matematické modely se používají prakticky ve všech vědách a rozvoj jednotlivých věd je na jejich využívání bezprostředně závislý. Stupeň matematizace vědního oboru je uznávaným měřítkem jeho kvality a zárukou rozvoje. V oblastech přírodních a fyzikálních věd, technice, ekonomii, managementu, marketingu, sociálních a společenských vědách se používá velké množství různých typů matematických modelů, které můžeme klasifikovat podle různých hledisek. Nejobecnější klasifikace dělí matematické modely do několika skupin:

Modely deskriptivní a normativní

Deskriptivní modely slouží k zobrazení prvků a vztahů v systému a k analýze základních vlastností systému. Nezajímá nás určité cílové chování systému, pouze systém sám o sobě. Pomocí těchto typů modelů se odvozují další vlastnosti systému, určuje se jeho rovnovážný stav, stabilní stav, vliv změn uvnitř i ve vnějším okolí systému na jeho chování. Příklady: Rovnice $E = mc^2$, soustava diferenciálních rovnic modelující procesy zrodu a úmrtí, simulační model modelující výskyt škůdců porostu, rovnice nabídky a poptávky v konkurenčním prostředí, ekonometrický meziodvětvový model „Input-Output, atd.

Normativní modely Slouží k analýze a řízení systému tak, aby byl splněn nějaký cíl nebo množina cílů. Zajímá nás cílové chování systému. Normativní model bývá často doplněn tzv. cílovou (účelovou) funkcí nebo soustavou takových funkcí. Nutnou součástí normativního modelu je extrémální (minimální/maximální) řešení, které dává návod, jak požadovaného cíle (resp. cílů) dosáhnout. Normativní modely, jejichž cílem je nalezení optimálního řešení, se nazývají optimalizační modely.

Modely deskriptivní i normativní jsou dále děleny podle typu systému, k jehož modelování slouží, nebo podle typu matematických složek (proměnné, struktury, řešení) jež obsahují[10].

Modely statické, dynamické a dynamizované

Model zobrazuje a analyzuje systém bez zřetele k jeho časovému vývoji.

Zobrazení se týká zpravidla určitého časového intervalu (týden, měsíc, rok, apod.).

Dynamické model zobrazuje a analyzuje systém v průběhu času. Zobrazení může být typu „ex post“ nebo „ex ante“ a respektovat krátký či delší časový horizont.

Dynamizované modely zpravidla vyjadřují časové prvky ve statickém modelu pomocí speciálních modelových technik. Dynamizované modely se používají v případě, kdy odpovídající dynamický model je velmi složitý nebo jej nedovedeme[10].

soudobými modelovými technikami spolehlivě konstruovat.

Modely deterministické a stochastické

Všechny proměnné, konstanty a funkce v modelu jsou deterministické (nenáhodné) veličiny nebo funkce. Stochastické modely vyjadřují že alespoň jedna proměnná, konstanta nebo funkce v modelu je náhodná veličina nebo náhodná funkce[10].

Fuzzy modely

Některé proměnné, konstanty nebo funkce jsou fuzzy veličiny, nebo fuzzy funkce. Podle povahy problému se modely používají individuálně nebo v kombinacích. Pro řešení známých problémů lze použít tzv. standardní modely. Pro řešení nových problémů je třeba konstruovat nové modely[10].

3 MATLAB

MATLAB sestává ze základního výpočetního jádra, v němž je implementována bohatá knihovna matematických operací a základních podpůrných rutin (textové vstupy a výstupy, práce se soubory, grafická reprezentace výsledků), a dále z celé řady specializovaných knihoven (tzv. toolboxů). Tyto toolboxy si uživatel podle své potřeby přikupuje k základnímu jádru MATLABu. Jedním s těchto toolboxů se jmenuje SIMULINK který je vhodný pro modelování dynamických systémů [6].

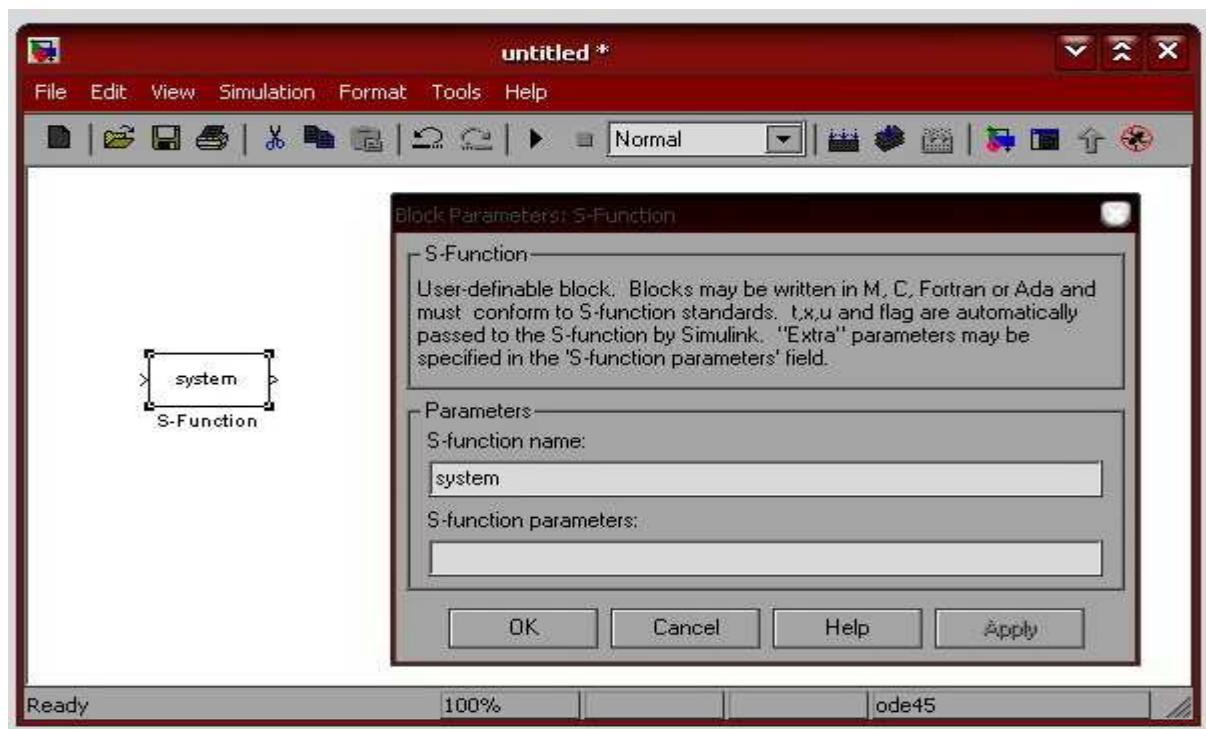
3.1 Vytvoření S-Funkce

Pro implementaci vzniklých rovnic za účelem simulace chování daných systémů byl zvolen program MATLAB a jeho nástavba SIMULINK, což je jednoduchý a intuitivně stavěný nástroj pro simulaci.

S-funkce je speciální blok v SIMULINKu, který umožňuje propojení daného bloku s m-filem, ve kterém se nachází diferenciální rovnice popisující požadovanou dynamiku a poč. podmínky procesu; je zde také definován počet vstupů a výstupů.

V této práci je naznačeno jak se postupovalo při vytváření modelů. Jako model budeme uvažovat průtočný výměník tepla s promícháváním.

S-funkce se nachází v SIMULINKU v části *simulink* a *user-defined function*. Po založení nového simulačního schématu, ji tam přesuneme. Poklepáním levým tlačítkem myši se dostaneme do položky s názvem s-funkce. Název je důležitý, protože tím se propojí sfunkce s příslušným m-filem, který bude mít stejné jméno jako s-funkce. Na Obr.5 je vidět blok s-funkce a její vlastnosti. Do pole *S-function parameters* se píše názvy proměnných, které lze předávat z s-funkce do m-filu[4].



Obr. 5 Schéma a-funkce a parametry

3.2 Ukázka M-filu pro koncentrační směšovač kapalin

```

function [sys,x0,str,ts] = km(t,x,u,flag,c0,D,H,k,h0)

    %Tento blok simuluje chování koncentračního mísiče. Vstupními parametry
    %jsou objemy,hustoty, koncentrace, průměr mísiče, výška mísiče
    %počáteční výška hladiny
    % s-funkce pro vypočet dynamiky systému
    % KONCENTRACNI MISIC
    %=====
    % ro ... hustoty [vstupních kapalin a výstupní kapaliny, předpokládáme stejnou
    %hustotu]
    % D ... průměr nádoby mísiče
    % H ... výška nádoby mísiče
    % k ... konstanta ventilu
    %h0... počáteční výška hladiny

switch flag,
case 0
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(h0,c0);                % Inicializace
case 1
sys = mdlDerivatives(t,x,u, D,k,H);                    % vypočet derivaci
case 3
sys = mdlOutputs(t,x,u,H);                            % vypočet vstupu
case { 2, 4, 9 }
sys = [];                                              % nepoužité flagy
otherwise
error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);            % Chyba obsluhy
end

%=====
% mdlInitializeSizes
% Vráti rozměry, počáteční. podmínky a periody vzorkování pro
% S-funkci.
%=====

function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(h0,c0)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2;                               % počet spojitého stavu - h(t),c(t)
sizes.NumDiscStates = 0;                              % počet diskretních stavu
sizes.NumOutputs = 2;                                 % počet výstupu - h(t), c(t)
sizes.NumInputs = 4;                                  % počet vstupu - q1(t), q2(t), c1(t), c2(t)
sizes.DirFeedthrough = 0;                             % '0' jestliže se ve výstupu nepoužívá
vstoupni                                              % signál, '1' když ano
sizes.NumSampleTimes = 1;                             % počet period vzorkování (min. 1)
sys = simsizes(sizes);

x0 = [h0 c0];                                         % Inicializace počátečních podmínek

str = [];                                             % řetězec razení stavu - obecně specifikovaný jako

ts = [0 0];                                          % perioda vzorkování a offset, pro spojité systémy

%=====
% mdlDerivatives

```

```

% Vrátí derivace spojitých stavu
%=====

function sys = mdlDerivatives(t,x,u, D,k,H)
%Ošetření minimální výšky hladiny
if x(1)<0.01*H
x(1)=0.01*H;
end

%Ošetření maximální výšky hladiny
if x(1)>0.95H
x(1)=0.95*H;
end
sys(1) = 4*(u(1)+u(2)-k*sqrt(x(1)))/(pi*D*D); % ('u' - vstupy, 'x' - stavy), pro
% výšky hladiny
sys(2) = 4*(u(1)*(u(3)-x(2)) + . . . %pro koncentraci
u(2)*(u(4)-x(2)))/(pi*D*D*x(1));
%=====
% mdlOutputs
% Vrátí vystup bloku
%=====

function sys = mdlOutputs(t,x,u,H)
%Ošetření minimální výšky hladiny
if x(1)<0.01*H
x(1)=0.01*H;
end

%Ošetření maximální výšky hladiny
if x(1)>0.95*H
x(1)=0.95*H;
end
sys(1)=x(1);
sys(2)=x(2);

```

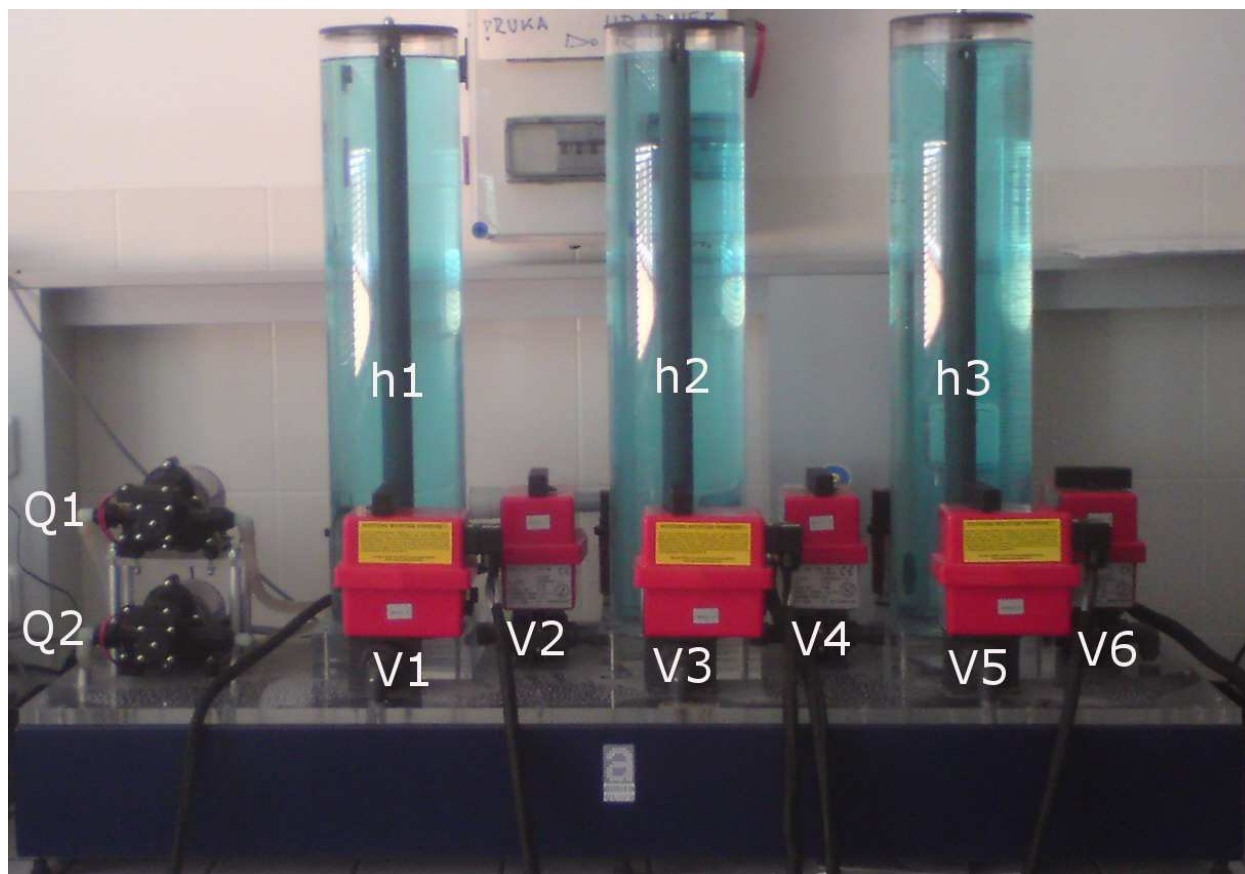
Pozn.:

Při vytváření bloků je důležité dodržet pořadí předávání jednotlivých proměnných v s-funkci, viz Obrázek 3 a pořadí v uvedeném m-filu: c0, D, H, k, h0 [5].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 AMIRA DTS200

Na obrázku 6 můžeme vidět soustavu tří nádrží (dále tanky) Amira DTS200 na které probíhalo měření vypouštěcích charakteristik všech šesti ventilů. Model je vhodný pro použití v badatelských úkolech v nelineární kontrole a diagnostice poruch. Amiru DTS200 použili například výzkumníci v oddělení měření a řízení na University of Duisburg, úspěšně testovali metody nelineárního zrušení vazeb a modelově založené diagnostiky poruch.

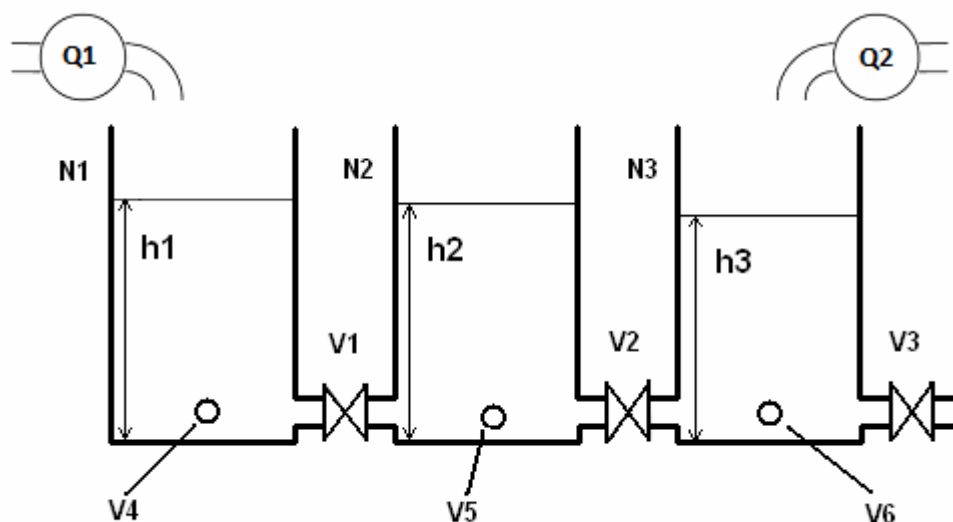


Obr. 6. Laboratorní model AMIRA DTS200

4.1 Popis

Základem je nádrž s kapalinou (destilovaná voda), na které jsou připevněny tři plexisklové tanky osazené stupnicí 0-600mm a vzájemně sériově propojené potrubím. Také jsou na této nádrži připevněny dvě čerpadla značky SHURflo, dále šest ventilů z nich pak čtyři výtokové (V3, V4, V5, V6) a dva přepouštěcí (V1, V2). Další součástí celého modelu jsou ovládací panely (viz. Obrázek 8) a ovládání na PC v prostředí SIMULINK(viz. Obrázek 9). Všechny tři tanky jsou vybavené piezo-odporovým snímačem tlaku pro měření úrovně kapaliny. Číslicový regulátor ovládá rychlost toku

čerpadel tak, že úrovně v tankách N1 a N3 může být nezávislá. Tento model je možno ovládat jak manuálně na ovládacím panelu tak programově na PC v prostředí Matlab SIMULINK.



Obr. 7. Blokové schéma modelu

Popis ovládacích prvků:

| | |
|----|----------------------------|
| Q1 | - čerpadlo č.1 |
| Q2 | - čerpadlo č.2 |
| V1 | - přepouštěcí ventil 1 |
| V2 | - přepouštěcí ventil 2 |
| V3 | - výtokový ventil 3 |
| V5 | - výtokový ventil 5 |
| V6 | - výtokový ventil 6 |
| N1 | - nádrž č.1 |
| N2 | - nádrž č.2 |
| N3 | - nádrž č.3 |
| h1 | - výška hladiny v nádrži 1 |
| h2 | - výška hladiny v nádrži 2 |

h3

- výška hladiny v nádrži 3

4.1.1 Technická data

Zde jsou uvedeny některá technická data jež byla použita v mém modelu [8] .

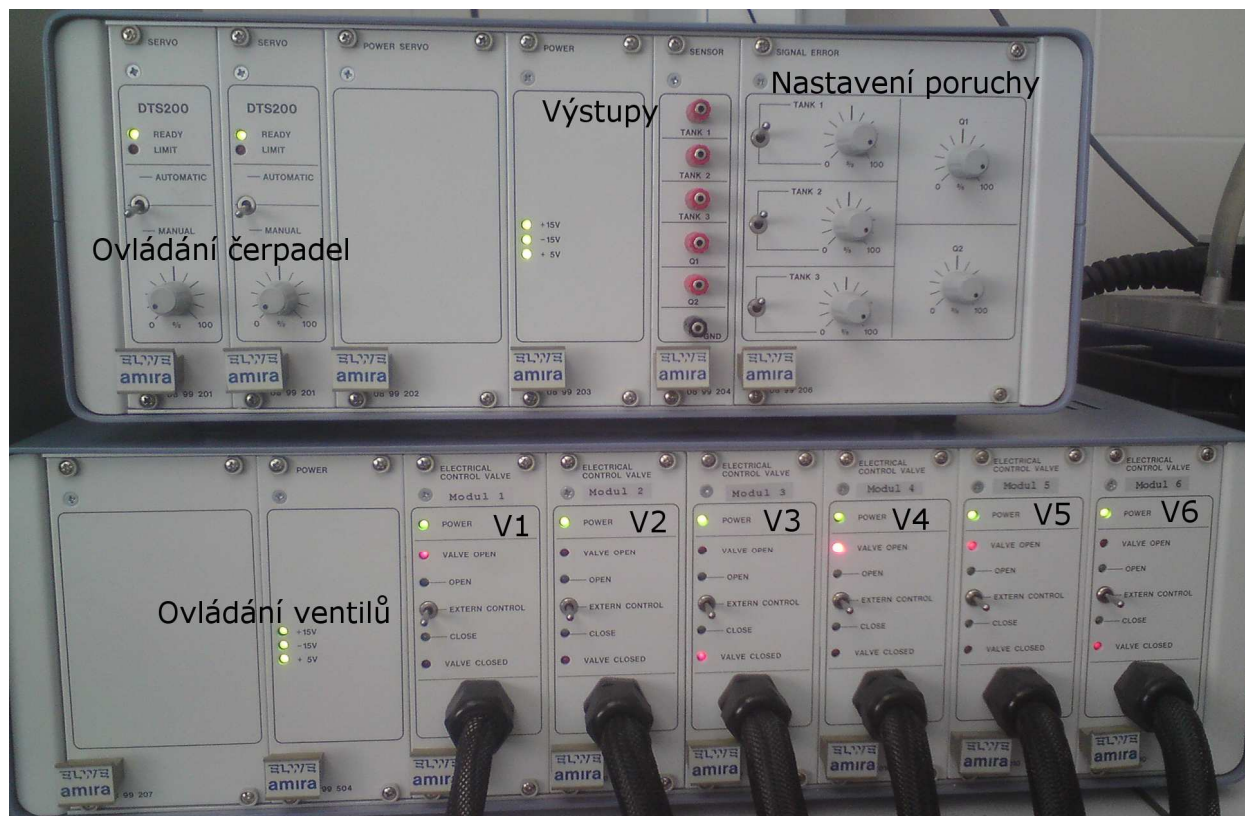
Tab. 4. Technická data Amiri DTS200

| Technické parametry | | |
|--|---------|-----------------|
| Název | Hodnota | Jednotka |
| <u>Rozměry a váha</u> | | |
| Délka | 1300 | mm |
| Šířka | 360 | mm |
| Výška | 880 | mm |
| Hmotnost | 40 | kg |
| <u>Nádrž</u> | | |
| Délka | 1210 | mm |
| Hloubka | 360 | mm |
| Výška | 150 | mm |
| Objem | 55 | kg |
| <u>Válcová nádrž</u> | | |
| Vnější průměr | 150 | mm |
| Vnitřní průměr | 140 | mm |
| Vnitřní průměr přívodního potrubí | 25 | mm |
| Výška včetně krytu | 720 | mm |
| Max. výška hladiny | 630 | mm |
| Kapacita | 9 | l |
| <u>Kulový uzávěr (efektivní oblast)</u> | | |
| Spojovací trubice | 0,5 | cm ² |
| Jmenovitý výkon | 0,5 | cm ² |
| Vytékačový otvor | 0,5 | cm ² |
| <u>Čerpadlo</u> | | |
| Průtoková rychlost | 7 | l/min |

4.2 Ovládání

Ovládací panel (na obrázku 8) je rozdělen na dvě části.

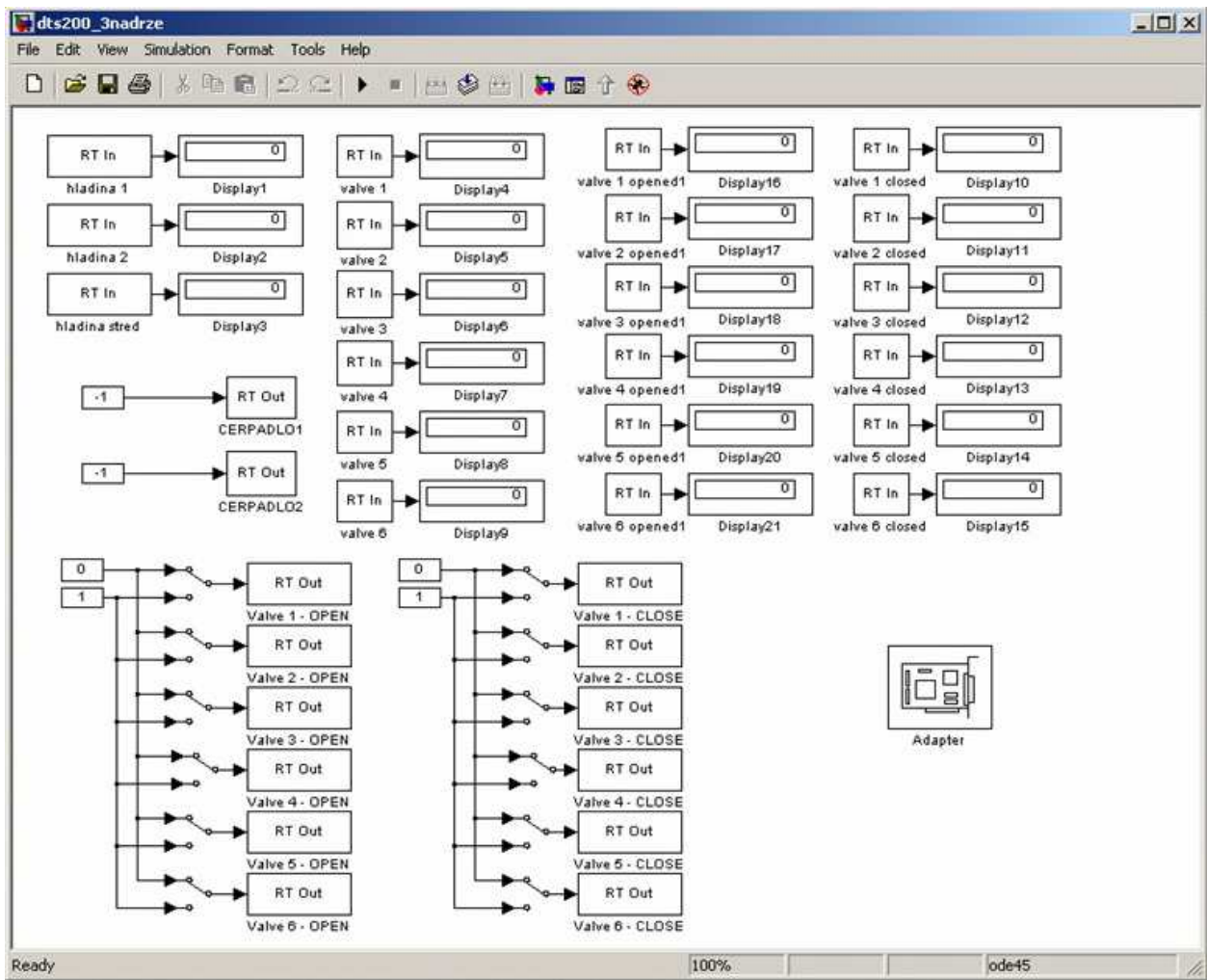
První část (obrázku nahoře), je k ovládání obou čerpadel nezávisle na sobě. Také k nastavení velikosti poruchy v přenosu signálu na obou čerpadlech a na senzorech snímajících výšku hladiny. Druhá část se používá k ovládání všech ventilů.



Obr. 8. Ovládací panely

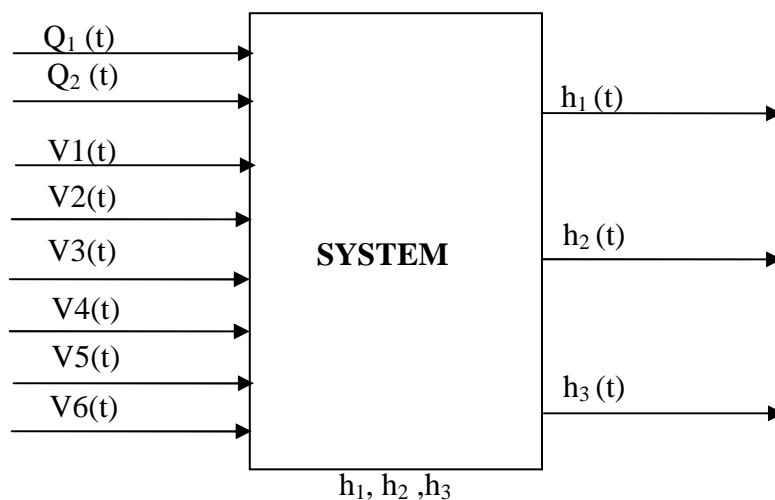
Soustava je také připojena k řídicímu PC pomocí vstupně výstupní karty Adventech PCI-1711. Tato karta zajišťuje přenos řídicích signálů pomocí analogových vstupů a výstupů které zajišťují ovládání čerpadel, ventilů a také snímání výšky hladiny.

Ovládací prostředí je zobrazeno na obrázku 9. V simulinku máme tedy možnost ovládat a také pozorovat chování celé soustavy. Čerpadla lze ovládat v rozsahu -1 (vypnuto) až 1 (zapnuto). Ventily můžeme ovládat v rozsahu -1 (otevřeno) až 1 (zavřeno) v bloku „Valve(1-6)OPEN“ a „Valve(1-6)CLOSE“, dále pak monitorujeme jejich průběh v bloku „valve(1-6)“ a jejich krajní polohy v blocích „valve(1-6)opened1“ a „valve(1-6)closed“. Také monitorování hladiny 1, 2 a 3 je zde zobrazeno v rozsahu -1 plná nádrž a 1 prázdná nádrž v blocích „hladina“.



Obr. 9. Ovládání Amira DTS200 v prostředí SIMULINK

5 ZÁKLADNÍ MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ POPIS SOUSTAVY



Obr. 10. Blokové schéma modelu

Proměnné:

Vstupy: $Q_1, Q_2, Ov_1, Ov_2, Ov_3, Ov_4, Ov_5, Ov_6$

Konstanty: $Kv_1, Kv_2, Kv_3, Kv_4, Kv_5, Kv_6, F_1, F_2, F_3$

Stavy: h_1, h_2, h_3

Výstupy: yh_1, yh_2, yh_3

Počáteční stavy: h_{10}, h_{20}, h_{30}

Zjednodušené předpoklady:

- nádrž má konstantní průřez
- kapalina je ideální
- konstantní tlak na hladiny

Matematický model bilance množství kapaliny:

$$Q_1 = Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} + Ov_4 \cdot Kv_4 \cdot \sqrt{h_1} + F_1 \cdot \frac{dh_1}{dt}$$

$$Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} = Ov_2 \cdot Kv_2 \sqrt{h_2 - h_3} + Ov_5 \cdot Kv_5 \cdot \sqrt{h_2} + F_2 \cdot \frac{dh_2}{dt}$$

$$Q_2 + Ov_2 \cdot Kv_2 \cdot \sqrt{h_2 - h_3} = Ov_3 \cdot Kv_3 \sqrt{h_3} + Ov_6 \cdot Kv_6 \cdot \sqrt{h_3} + F_3 \cdot \frac{dh_3}{dt} \quad (10)$$

Linearizovaný tvar s nulovými počátečními podmínkami:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q - Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} - Ov_4 \cdot Kv_4 \cdot \sqrt{h_1}}{F_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} - Ov_2 \cdot Kv_2 \sqrt{h_1 - h_3} - Ov_5 \cdot Kv_5 \cdot \sqrt{h_2}}{F_2}$$
$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{Q_2 + Ov_2 \cdot Kv_2 \cdot \sqrt{h_2 - h_3} - Ov_3 \cdot Kv_3 \sqrt{h_3} - Ov_6 \cdot Kv_6 \cdot \sqrt{h_3}}{F_3} \quad (11)$$

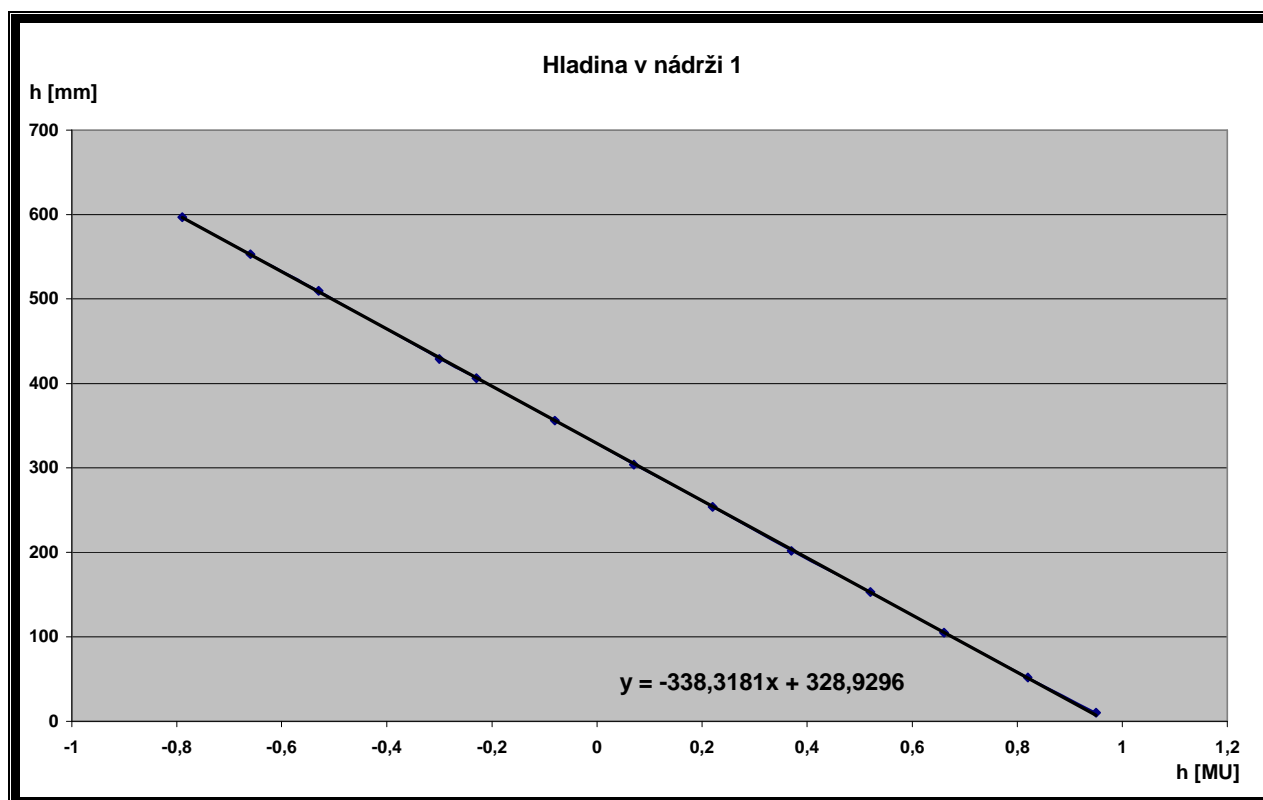
6 MODELOVÁNÍ SYSTÉMU AMIRA DTS200

6.1 Verze 0 – základní model

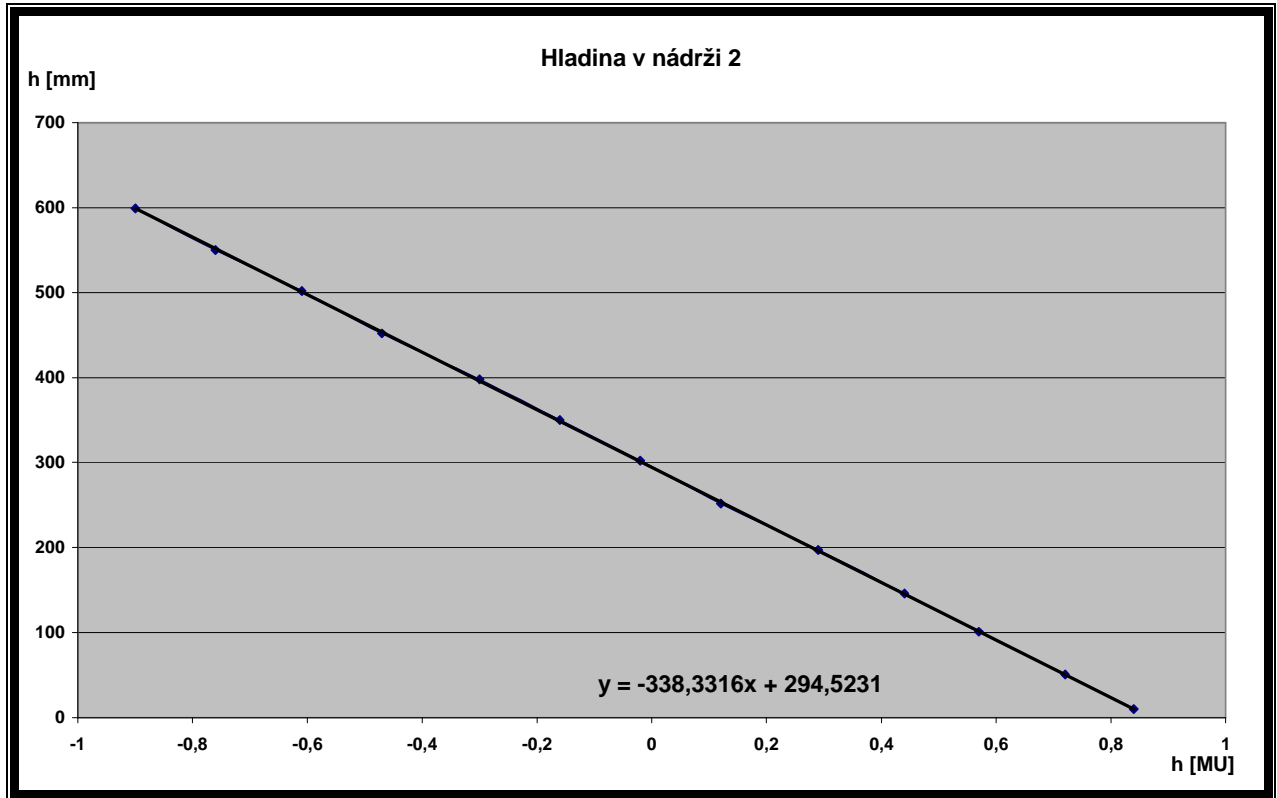
Tato verze obsahuje základní strukturu programu která umožňuje ovládat model ale také dovoluje zadávat libovolné hodnoty bez omezení např. zápornou výšku hladiny nebo záporný průtok čerpadly atd., což je dosti nereálné. Uživatel musí sám uvážit své pokyny tomuto modelu.

6.1.1 Kalibrace výšky hladiny

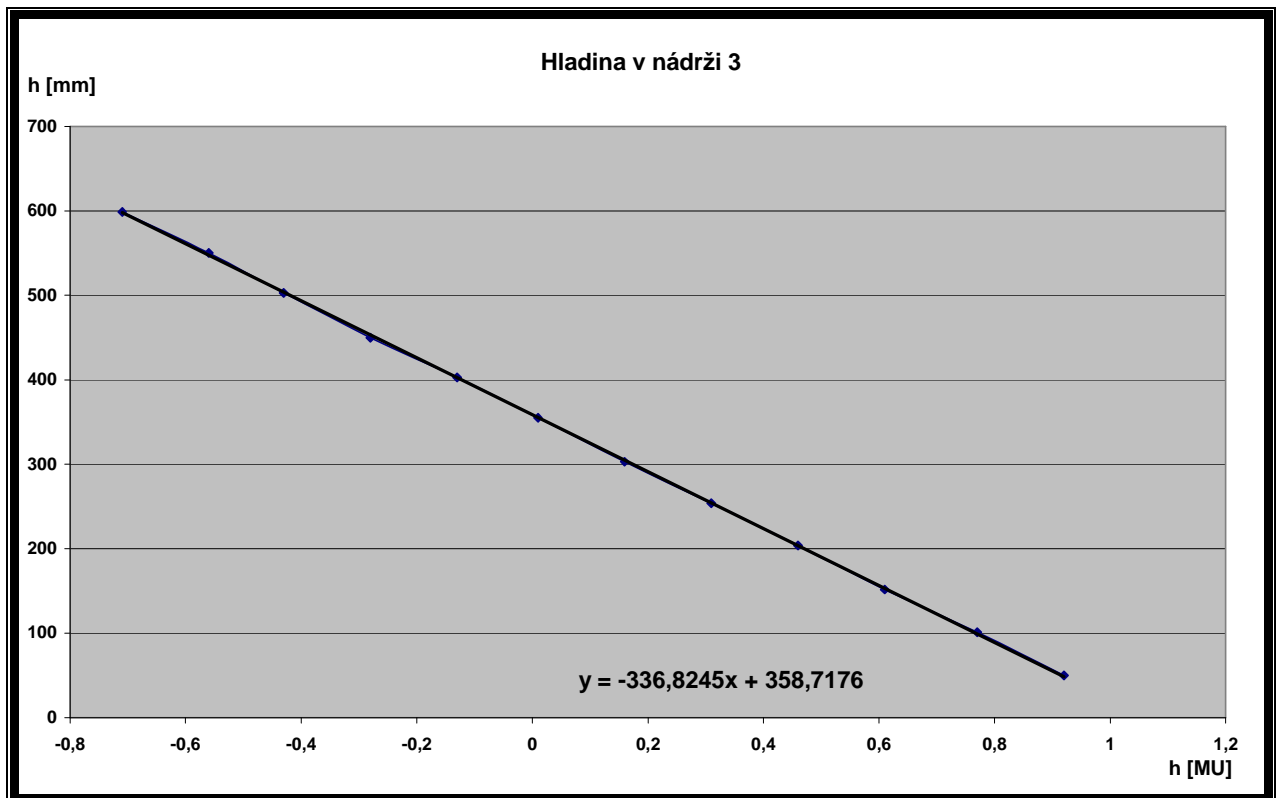
Protože ovládání v SIMULINKU vyhodnocuje výšku hladiny v nádržích v rozmezí $\langle -1,1 \rangle$ odpovídajícímu napětí na senzoru. Toto rozmezí je pro další zpracování naměřených dat nevhodné, museli bychom je neustále převádět na např. jednotky metrů. Byla tedy provedena měření, při kterém se porovnávaly hodnoty z ovládání a ze stupnice nainstalované na nádržích. Přitom bylo předpokládáno, že závislost bude lineární. Závislosti lze vidět v grafu 1, 2 a 3 i s rovnicemi.



Obr. 11. Závislosti výšky hladiny1 v [mm] na výšce hladiny1 v [MU]



Obr. 12. Závislosti výšky hladiny2 v [mm] na výšce hladiny2 v [MU]



Obr. 13. Závislosti výšky hladiny2 v [mm] na výšce hladiny2 v [MU]

6.1.2 Přepočítání signálu čerpadel

Hodnota průtoku čerpadla v prostředí SIMULINKU (viz. Kapitola 4.2) je nevhodná pro další využití. Byla tedy přepočítána na % průtoku kapaliny v m^3/s .

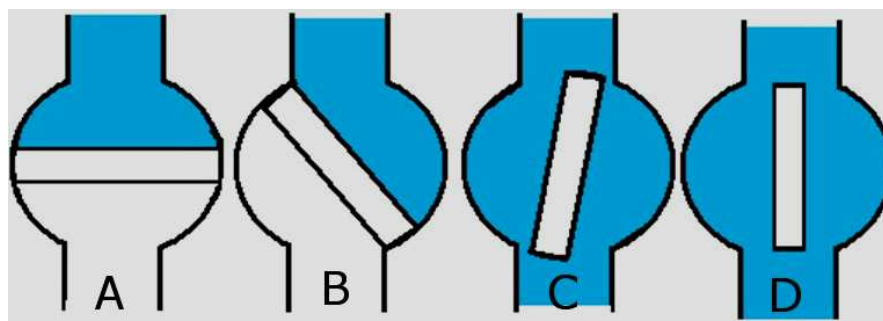
$$\text{Max. průtok} = 7 \text{ l/min} \Rightarrow 0,0001166 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow 100\%$$

6.1.3 Signály z ventilů

V prostředí SIMULINKU je otevření ventilu uvedeno v rozmezí $\langle -1,1 \rangle$ závisící na napětí signálu ze snímačů polohy. Tedy max. a min. napětí bude znázorňovat max. otevření a zavření. Jejich krajní polohy jsou uvedeny v tabulce č.5.

Tab. 5. Seznam mezí ventilů

| Ventil | Meze ventilu | | | |
|--------|--------------|-------|--------|------------|
| | value close | close | open | value open |
| V1 | 0.519 | 0.394 | -0.593 | -0.675 |
| V2 | 0.453 | 0.445 | -0.630 | -0.731 |
| V3 | 0.551 | 0.381 | -0.530 | -0.660 |
| V4 | 0.491 | 0.337 | -0.560 | -0.715 |
| V5 | 0.486 | 0.306 | -0.505 | -0.672 |
| V6 | 0.524 | 0.427 | -0.557 | -0.647 |



Obr. 14. Otevírání ventilů,

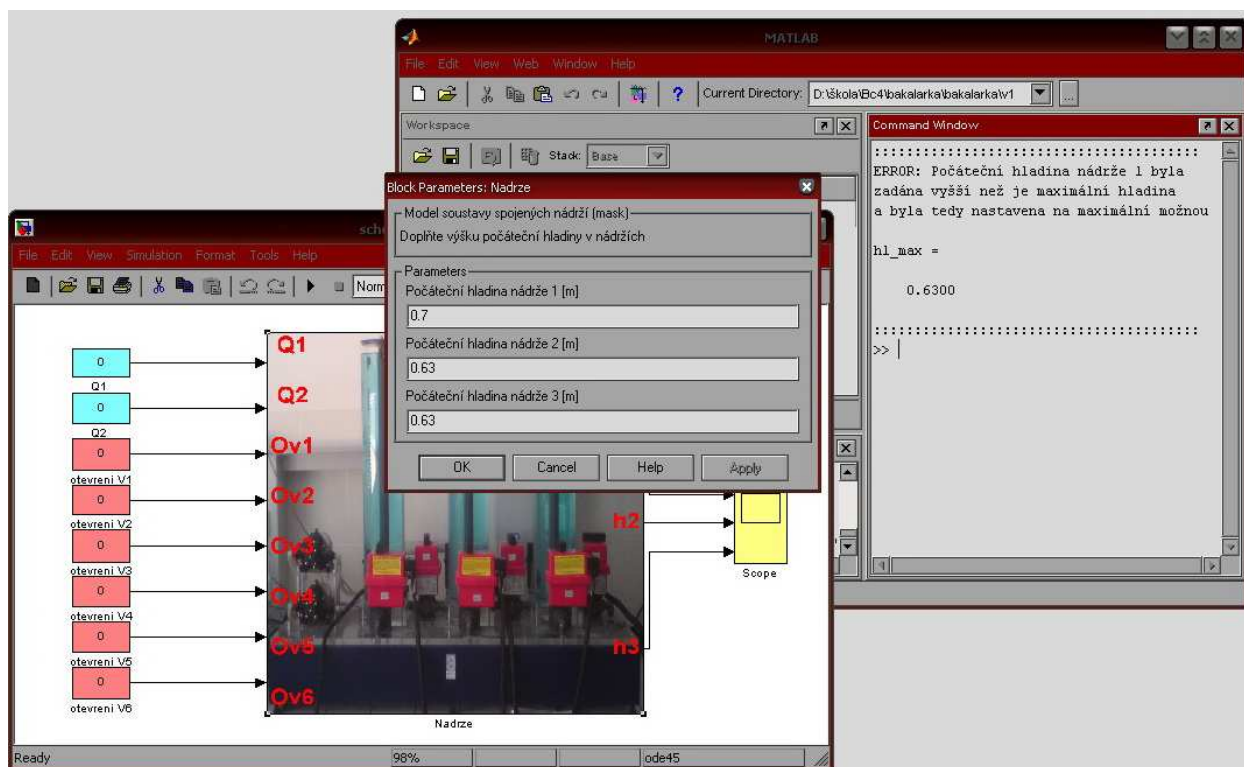
A) value closed, B) close, C) open, D) value open

6.2 Verze 1 – přidání omezení a charakteristiky vypouštěcích potrubí

Tato verze modelu obsahuje veškeré součásti předchozí verze 0 ale je vylepšen o řadu omezení na které vás simulink upozorní a také o hladinu která je ekvivalentní s množstvím kapaliny ve vypouštěcím potrubí.

6.2.1 Omezení vstupů a výstupů

Model omezuje všechny vstupy a výstupy a při překročení těchto mezí např. meze počáteční hladiny zadáním 0,7m , tak po zpuštění vypíše program v Command Windows chybové hlášení uvedené na obrázku 15.

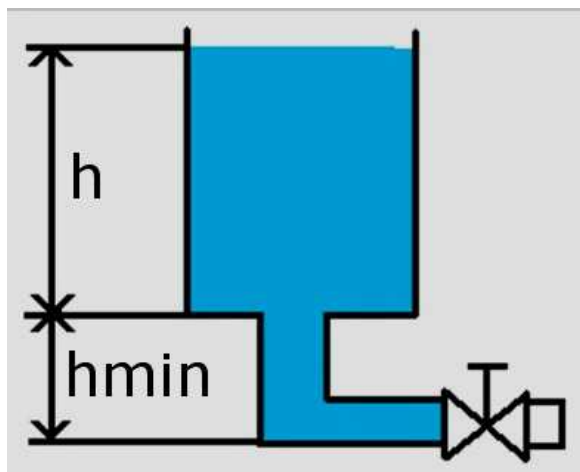


Obr. 15. Chybové hlášení

- Hladina – nyní lze hladina nastavit pouze v intervalu $\langle 0; 0,63 \rangle$ [m] , tedy když bude zadána hladina větší nebo záporná bude automaticky zarovnána na mez intervalu. V modelu verze 0 by toto překročení mohlo vést k neúměrně pomalému vypouštění nebo napuštění.
- Otevření ventilu – nastavíme pouze v intervalu $\langle 0; 100 \rangle$ [%] , model nedovolí nastavit větší nebo záporný průtok. Ve verzi 0 toto překročení vede například k napouštění nádrže ventilem nebo neúměrně rychlému vypouštění nádrže.
- Čerpadla - nastavíme pouze v intervalu $\langle 0; 100 \rangle$ [%] , model nedovolí nastavit větší nebo záporný přítok do nádrží. Ve verzi 0 toto překročení vede například k vysávání kapaliny čerpadlem nebo neúměrně rychlému napuštění nádrže.

6.2.2 Modelování vypouštěcích potrubí

Vypouštěcí potrubí (V3 až V6) je nedílnou součástí soustavy. Toto potrubí tedy ovlivňuje tok kapaliny soustavou a to tak že zrychluje vypouštění nádrže viz. obrázek 14. V tomto případě není objem kapaliny v potrubí uvažován, je uvažována pouze vertikální vzdálenost výtoku od dna nádrže (h_{min}). Vyobrazení h_{min} je na obrázku 16.



Obr. 16. Vypouštěcí potrubí nádrže

Upravená diferenciální rovnice (11) pro výpočet h_{min} :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q - Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} - Ov_4 \cdot Kv_4 \cdot \sqrt{h_1 + h_4} \text{ min}}{F_1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Ov_1 \cdot Kv_1 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} - Ov_2 \cdot Kv_2 \cdot \sqrt{h_1 - h_3} - Ov_5 \cdot Kv_5 \cdot \sqrt{h_2 + h_5} \text{ min}}{F_2}$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{Q_2 + Ov_2 \cdot Kv_2 \cdot \sqrt{h_2 - h_3} - Ov_3 \cdot Kv_3 \cdot \sqrt{h_3 + h_3} \text{ min} - Ov_6 \cdot Kv_6 \cdot \sqrt{h_3 + h_6} \text{ min}}{F_3} \quad (12)$$

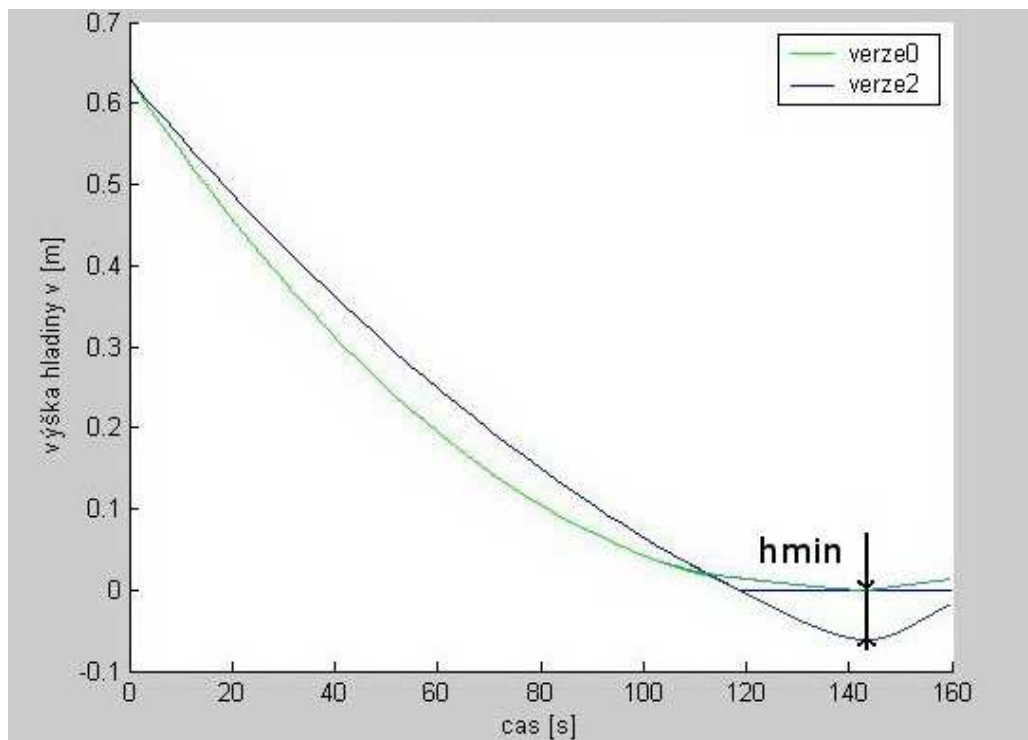
$$\begin{aligned}
 \frac{dh}{dt} &= -O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot \sqrt{h + h_{\min}} \\
 h &= \frac{1}{4} O_v^2 \cdot \frac{K_v^2}{F^2} \cdot t^2 - O_v \cdot K_v \cdot \sqrt{h_p + h_{\min}} \cdot t + h_p \\
 h &= at^2 + bt + c \\
 a &= \frac{1}{4} O_v^2 \cdot \frac{K_v^2}{F^2} \\
 b &= -O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot \sqrt{h_p + h_{\min}} \\
 c &= h_p
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Rovnice (13) popisují časový průběh vypouštění nádrže přes určitý vypouštěcí ventil. Tato závislost je kvadratická, a proto naměřená data závislosti výšky hladiny na čase byly proložena kvadratickou funkcí. Ze zjištěných parametrů kvadratické funkce lze vypočítat konstantu ventilu ($O_v \frac{K_v}{F}$), vzdálenost h_{\min} a počáteční výšku hladiny h_p

$$O_v \frac{K_v}{F} = 2\sqrt{a} \tag{14}$$

Vypočet hladiny ve vypouštěcím potrubí :

$$\boxed{h_{\min} = \frac{b^2}{\left(O_v \cdot \frac{K_v}{F}\right)^2} - h_p}
 \tag{15}$$



Obr. 17. Grafické znázornění hmin pro ventil 4

Tab. 6. Hmin jednotlivých nádrží

| hx_min [mm] | | | |
|-------------|----------|----------|---------|
| h3_min | h4_min | h5_min | h6_min |
| 128.0673 | 149.2653 | 172.1267 | 86.5238 |

6.3 Verze 2 – Modelování ventilů

Pro modelování bylo nutné naměřit charakteristiky vypouštění nádrží přes jednotlivé ventily. Na konci měření bylo již naměřeno přes sto průběhů vypouštění nádrží které bylo nutno dále pečlivě vyhodnotit. Za pomoci těchto vyhodnocených průběhů byly vypočítány hystereze ventilů a také jejich konstanty.

6.3.1 Popis experimentu pro zjištění hystereze

Pro zjištění průběhu hystereze bylo nutné naměřit přes sto průběhů vypouštění nádrží. Na grafu 5 až 10 jsou vyobrazeny jednotlivá měření v podobě “+“ a “*““. Hvězdičky znázorňují měření která byla proložena přímkou. Přímkou které jsou na těchto grafech vyobrazeny byly použity pro odečtení hodnoty hystereze která byla později převedena na % otevření ventilu. Tato měření probíhala dvojím způsobem na každém z ventilů:

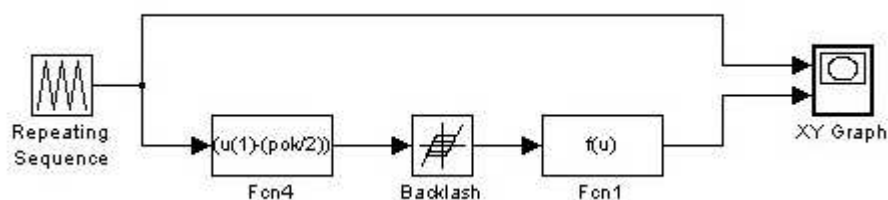
1) Otevírání:

První způsob spočíval v napuštění nádrže na maximální výšku a poté otevření příslušného ventilu v rozmezí maximálního otevření a minimálního (dokud protékala kapalina).

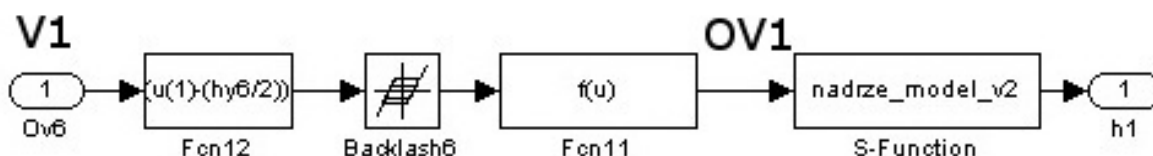
2) Zavírání:

Při tomto způsobu se postupovalo obdobně. Otevírání příslušného ventilu ovšem probíhalo s tím rozdílem že se otevřel vždy na maximum a poté se přivřel na hodnotu v rozmezí maximálního otevření a minimálního (dokud protékala kapalina).

Při simulování hystereze používáme v SIMULINKU blok Backlash který zajišťuje tuto funkci spolu s bloky Fcn které hysterezi srovnávají na počátek souřadnicového systému viz. obrázek 19. Příklad použití pro znázornění hystereze je na obrázku 18.



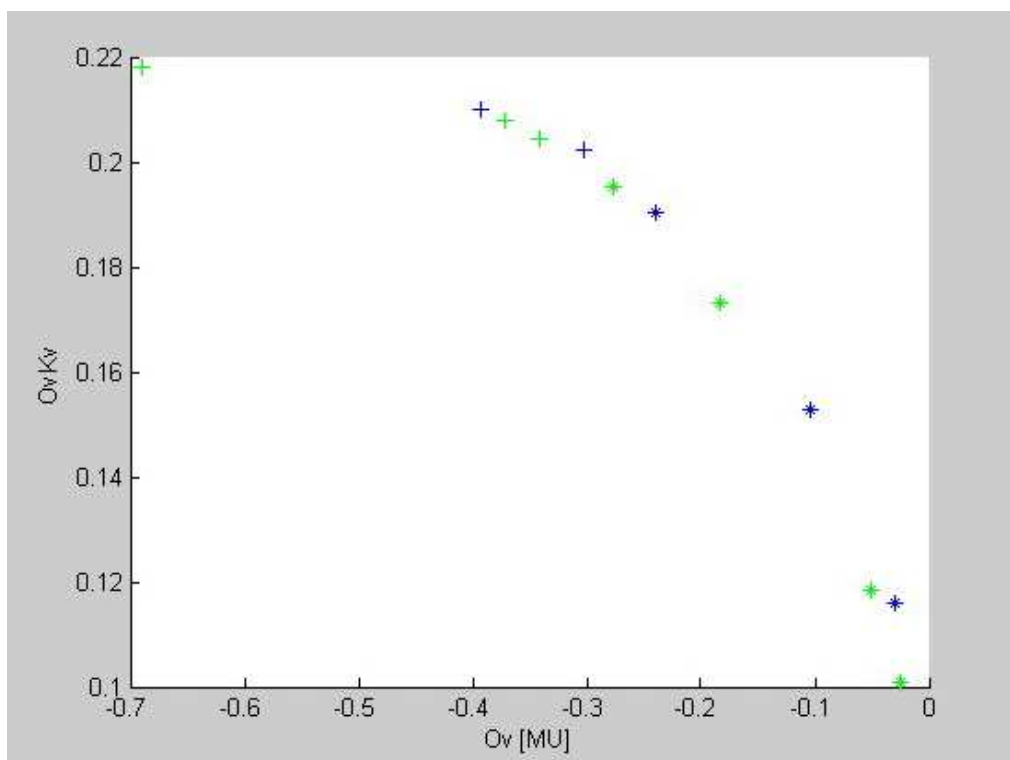
Obr. 18. Příklad použití bloku Backlash.



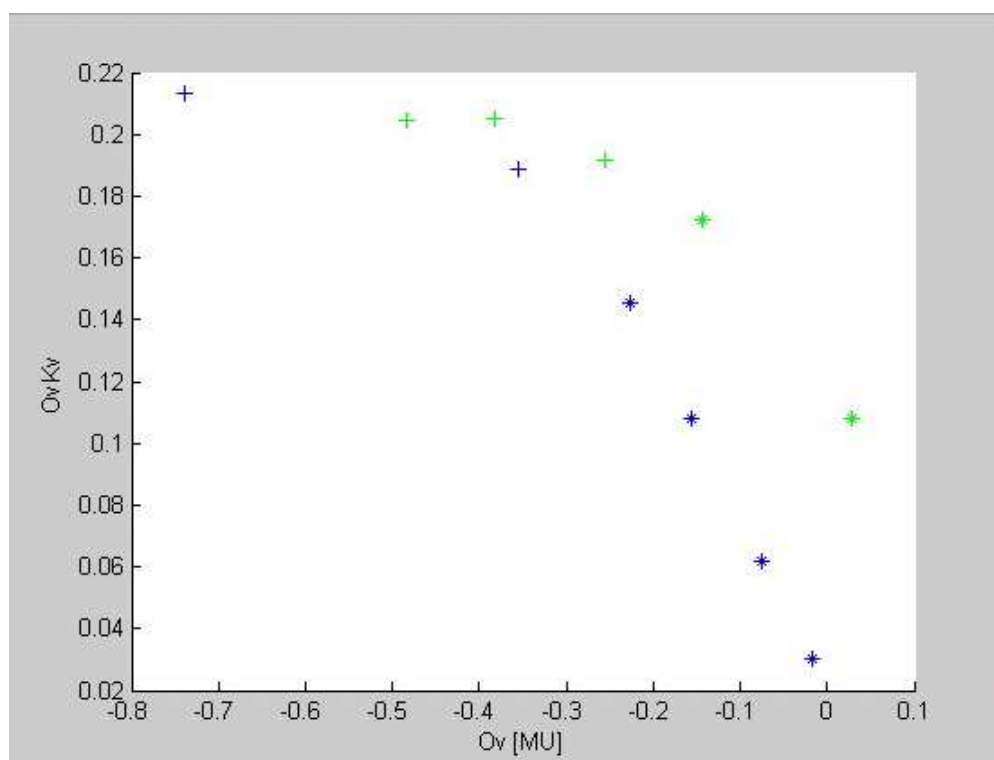
Obr. 19. Příklad použití bloku Backlash pro hysterezi

Zelené body a přímky na grafech 5 až 10 znázorňují měření metodou zavírání a modré body a přímky byly naměřeny metodou otevírání. Výpočet $OvKv$ z diferenciální rovnice (12).

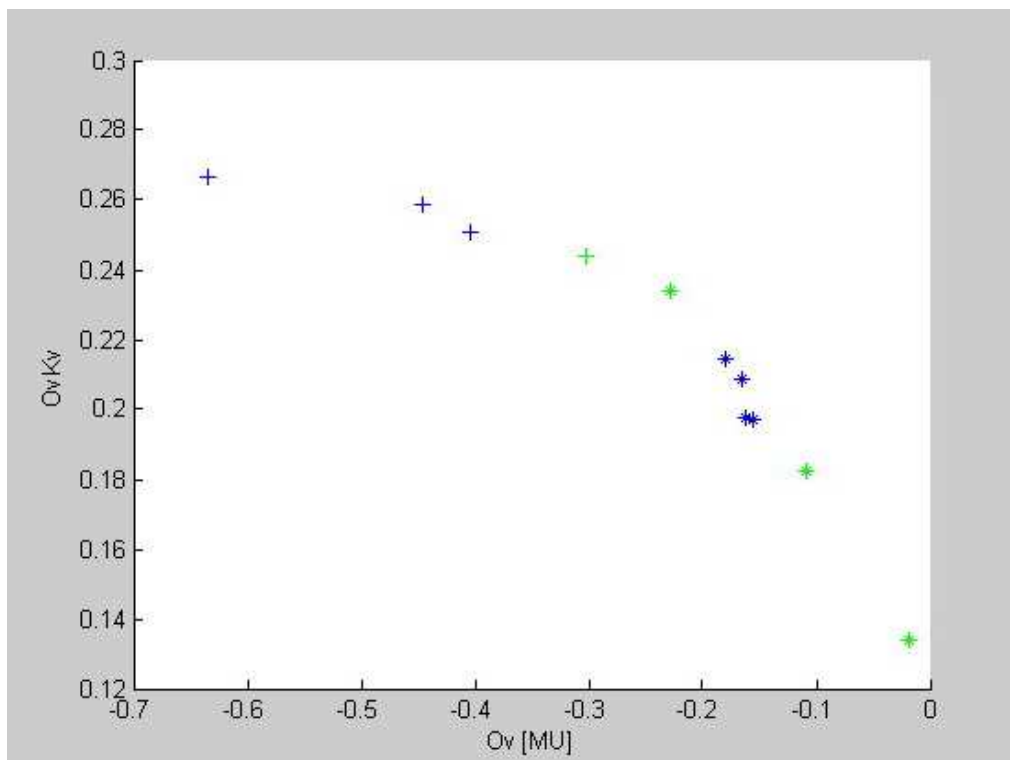
$$OvKv = (2\sqrt{a}) * F \quad (16)$$



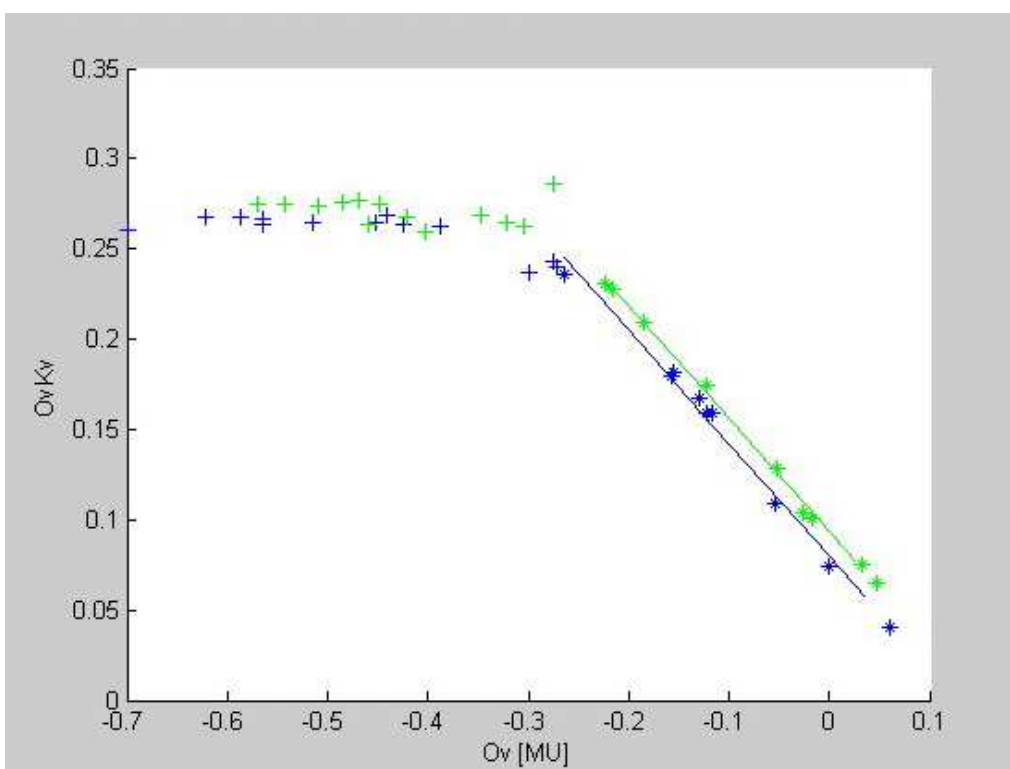
Obr. 20. Měření pro výpočet hystereze ventilu 1



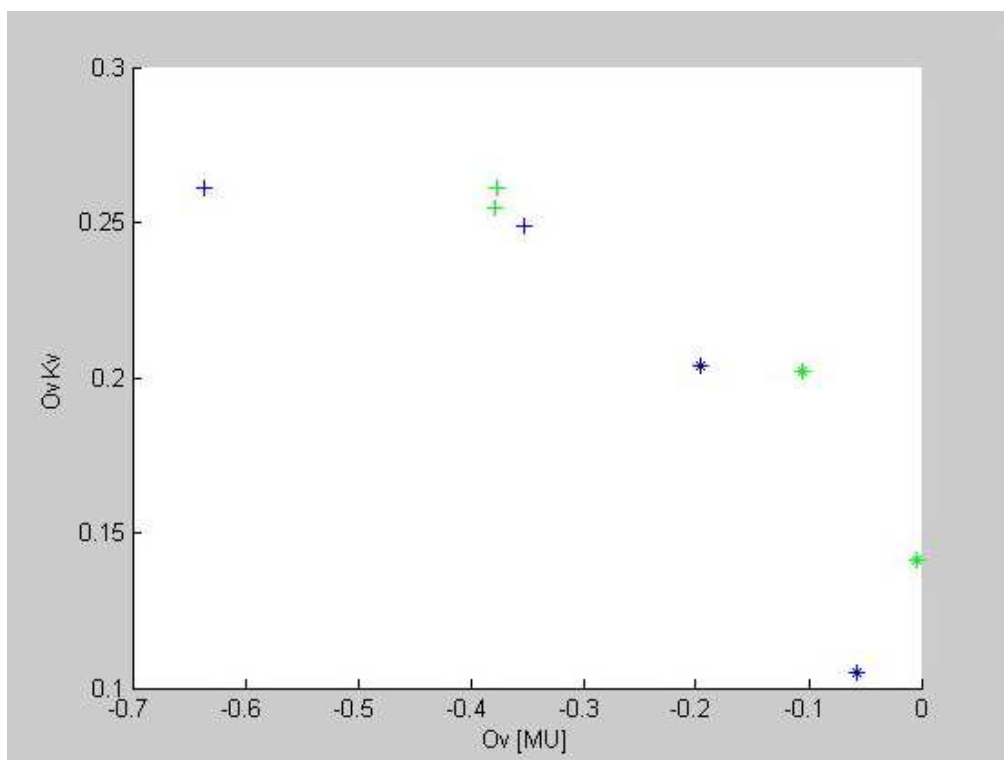
Obr. 21. Měření pro výpočet hystereze ventilu 2



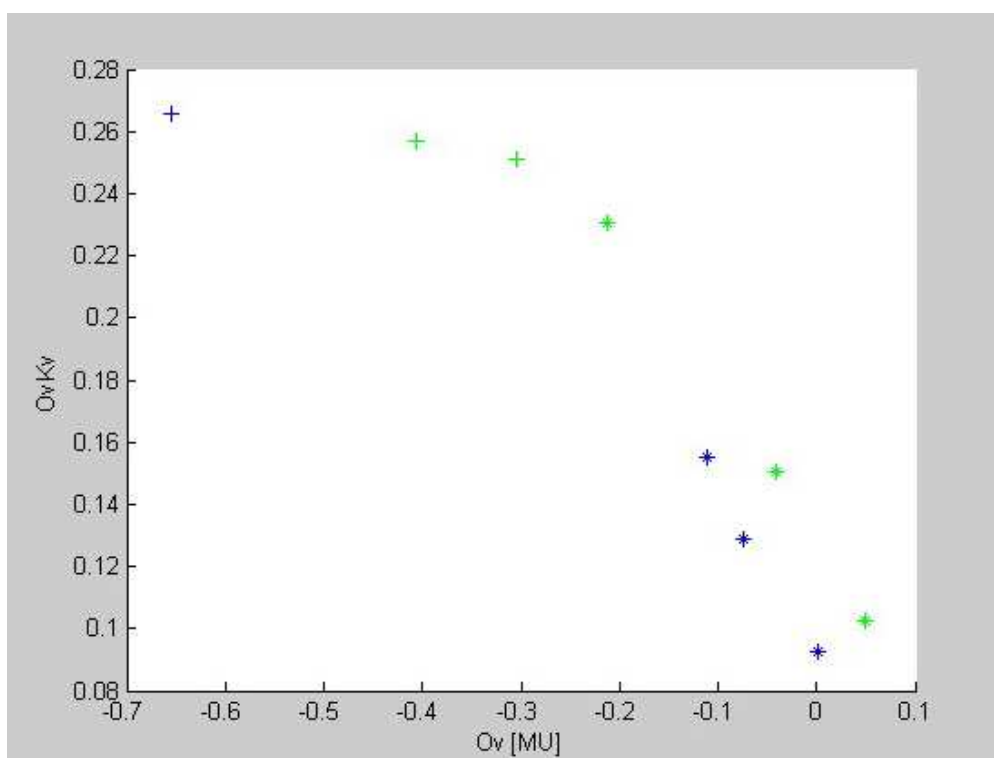
Obr. 22. Měření pro výpočet hystereze ventilu 3



Obr. 23. Měření pro výpočet hystereze ventilu 4

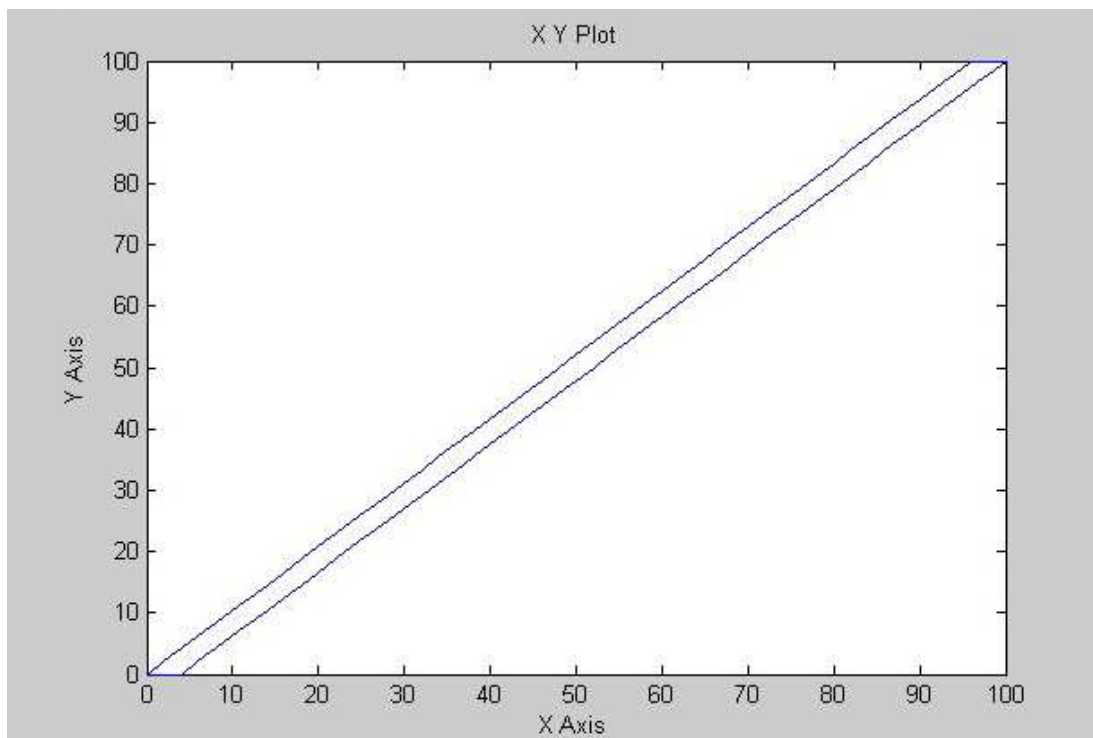


Obr. 24. Měření pro výpočet hystereze ventilu 5

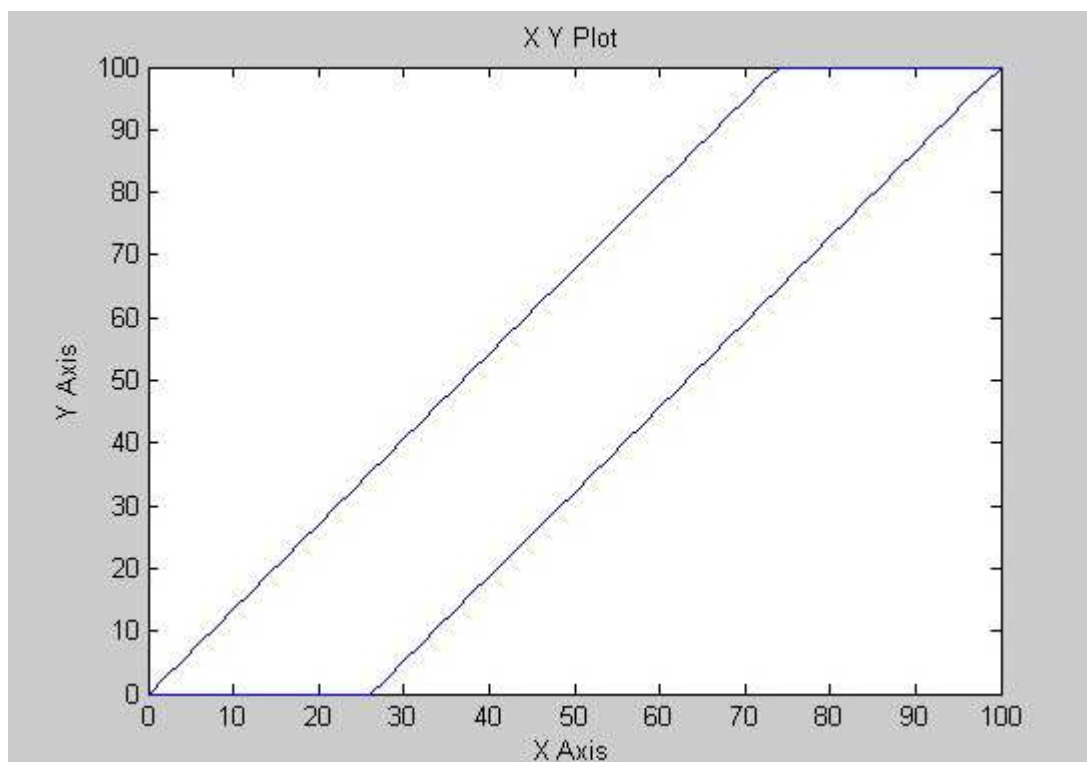


Obr. 25. Měření pro výpočet hystereze ventilu 6

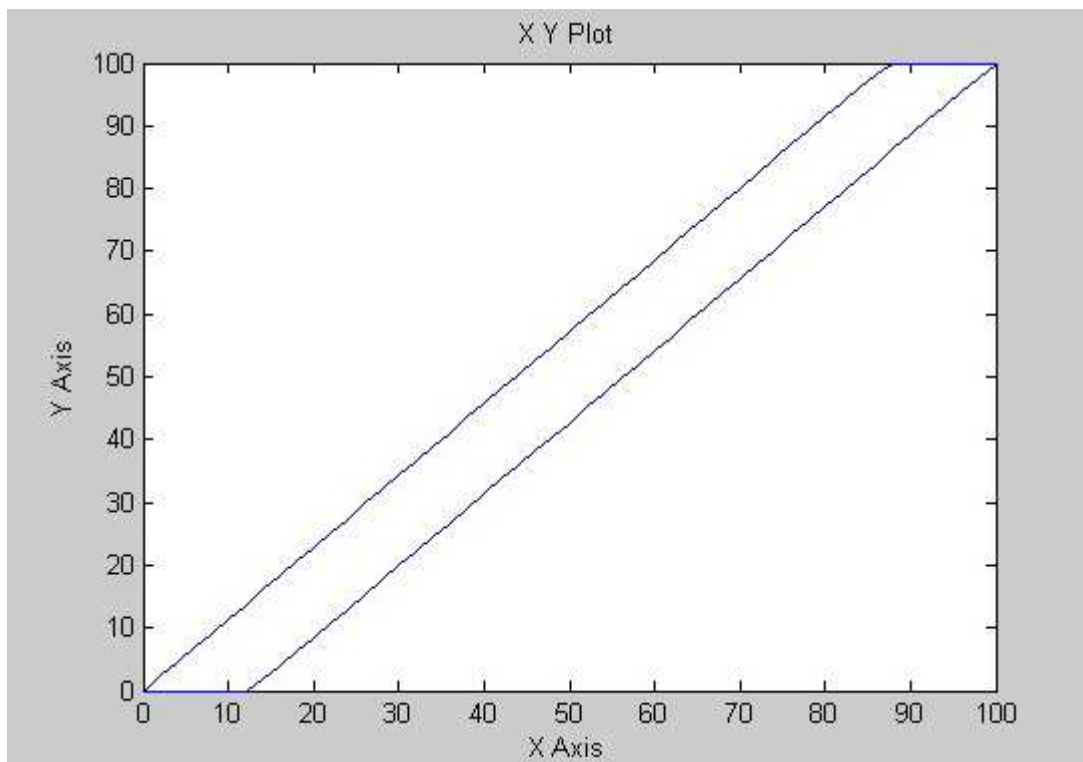
Na grafech 8 až 12 je vyobrazena hystereze tak jak byla vyhodnocena z naměřených průběhů všech ventilů.



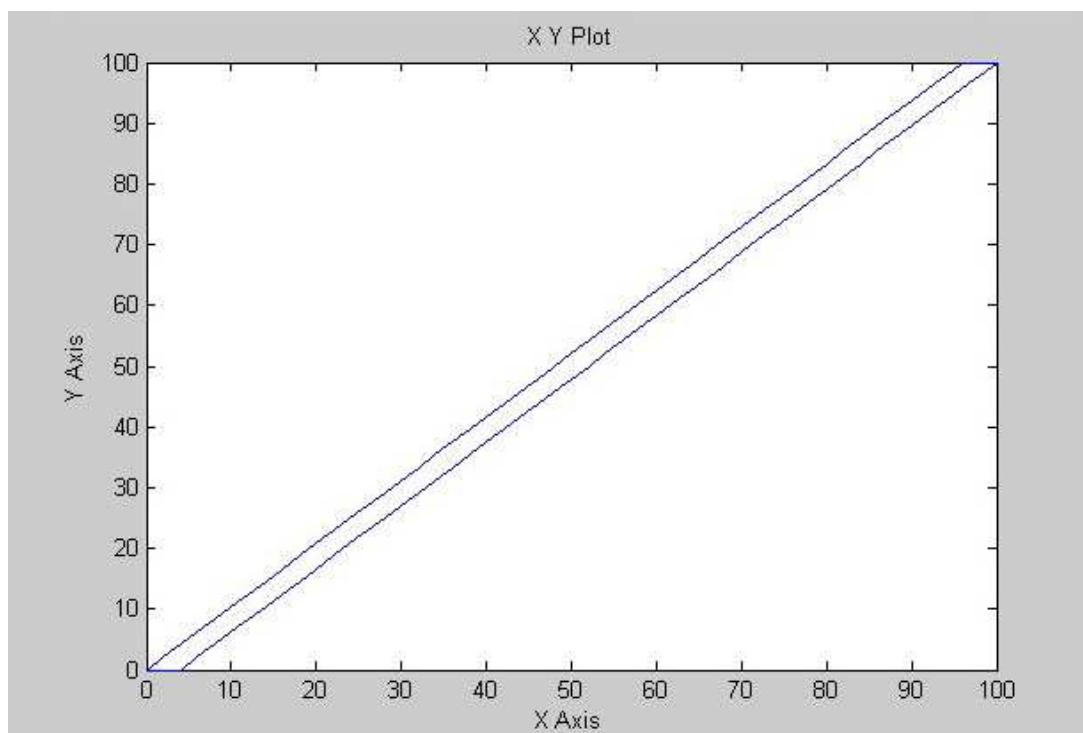
Obr. 26. Hystereze ventilu 1 (osa y = OV1[%], osa x = V1[%])



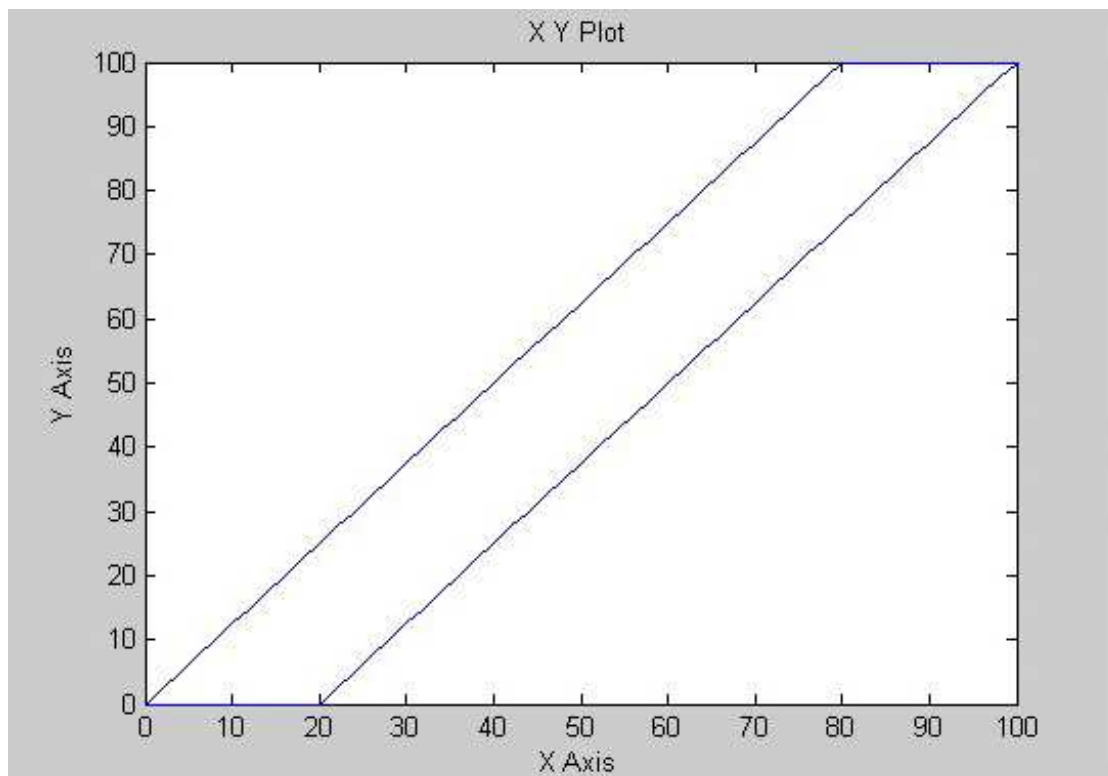
Obr. 27. Hystereze ventilu 2 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%])



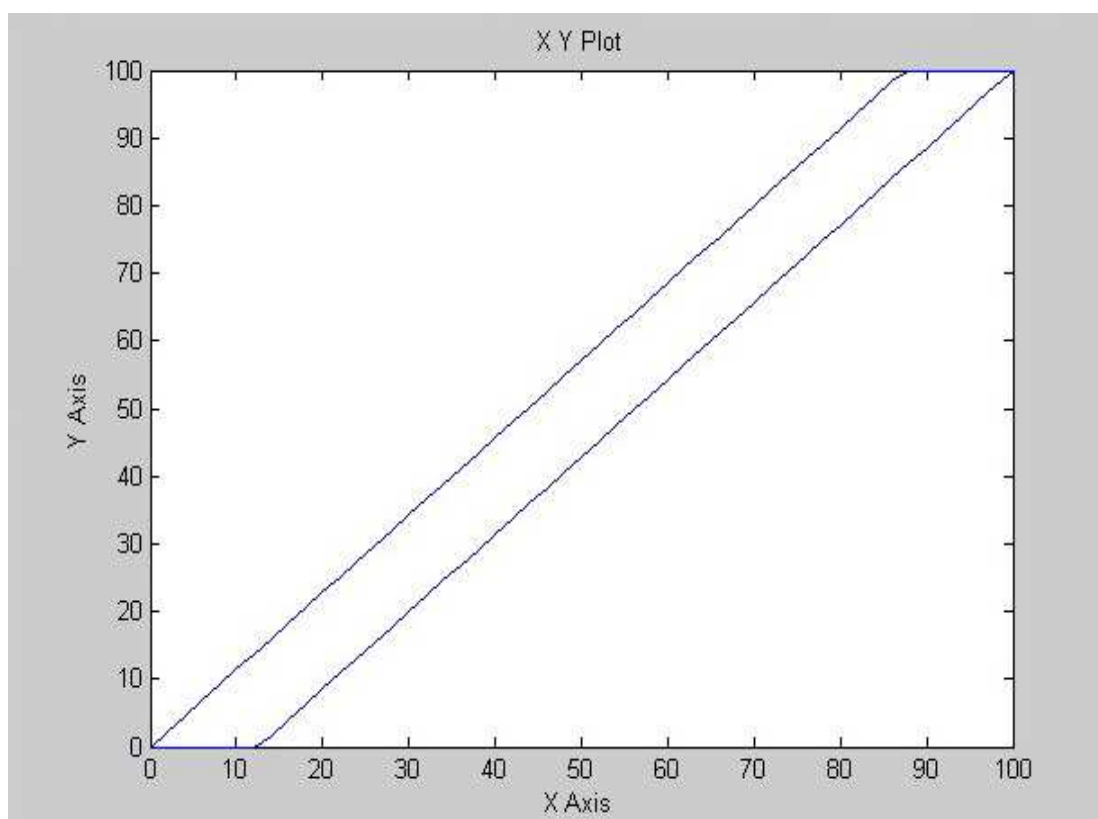
Obr. 28. Hystereze ventilu 4 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%])



Obr. 29. Hystereze ventilu 4 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%])



Obr. 30. Hystereze ventilu 5 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%])



Obr. 31. Hystereze ventilu 6 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%])

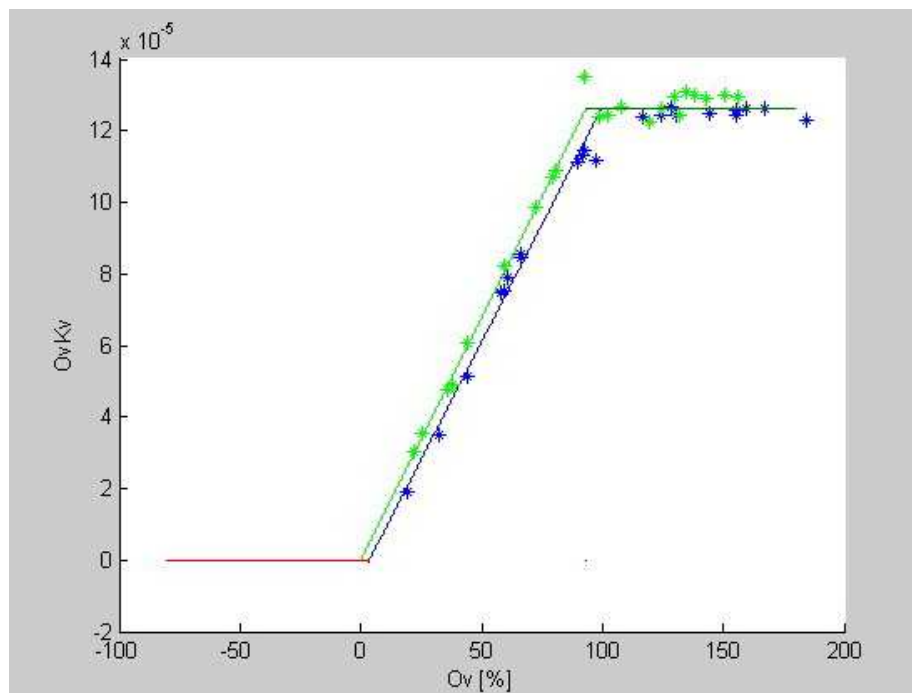
6.3.2 Konstanta ventilu

Tyto konstanty byly vypočítány z průměru, směrnic přímk, které byly proloženy naměřenými průběhy na laboratorním modelu Amira DTS200. Toto vyhodnocení se realizovalo u všech ventilů. Rovnice (14) byla použita pro výpočet konstanty výtokového ventilu. Pro výpočet konstanty přepouštěcích nádrží byla použita diferenciální rovnice (17) zjednodušená a upravená (17). Ukázka proložení naměřenými průběhy směrnicemi je na obrázku 32.

$$\begin{aligned}\frac{dh_1}{dt} &= -O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot \sqrt{h_1 - h_{1p} + h_2} \\ \frac{dh_1}{dt} &= -O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot \sqrt{2h_1 - h_{1p}} \\ (2h_1 - h_{1p})^{\frac{1}{2}} dh_1 &= -O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot dt\end{aligned}\quad (17)$$

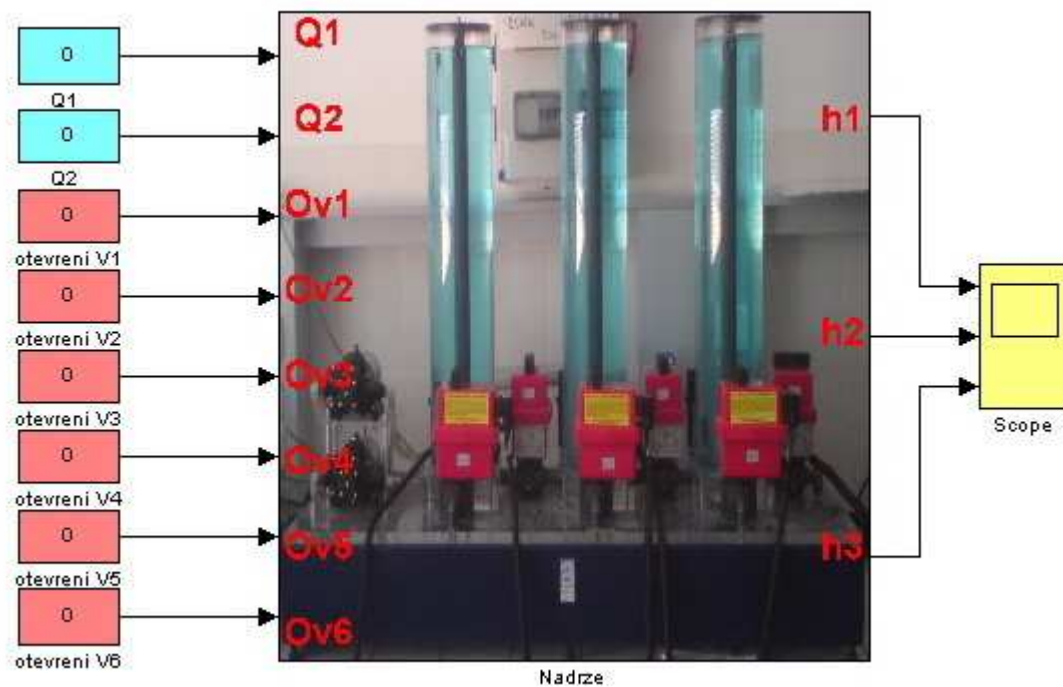
$$\begin{aligned}h_1 &= \frac{1}{2} O_v^2 \cdot \frac{K_v^2}{F^2} \cdot t^2 - \sqrt{h_{1p}} \cdot O_v \cdot \frac{K_v}{F} \cdot t + h_{1p} \\ h_1 &= at^2 + bt + c \\ a &= \frac{1}{2} O_v^2 \cdot \frac{K_v^2}{F^2} \\ b &= -\sqrt{h_{1p}} \cdot O_v \cdot \frac{K_v}{F} \\ c &= h_{1p} \\ O_v \cdot \frac{K_v}{F} &= \frac{-b}{\sqrt{h_{1p}}}; O_v \frac{K_v}{F} = 2\sqrt{a}\end{aligned}\quad (18)$$

| | |
|-------|---|
| O_v | -Otevření ventilu vyjádřeno v [%] |
| h_1 | -Výšky hladiny 1 [m] |
| h_2 | -Výšky hladiny 2 [m] |
| h_p | -Součet h_2 a h_1 [m] |
| F | -Plocha podstavy válcové nádrže [m ²] |
| K_v | - Konstanta přepouštěcího ventilu 1 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |



Obr. 32. Graf měření pro výpočet konstanty ventilu 4 a hystereze

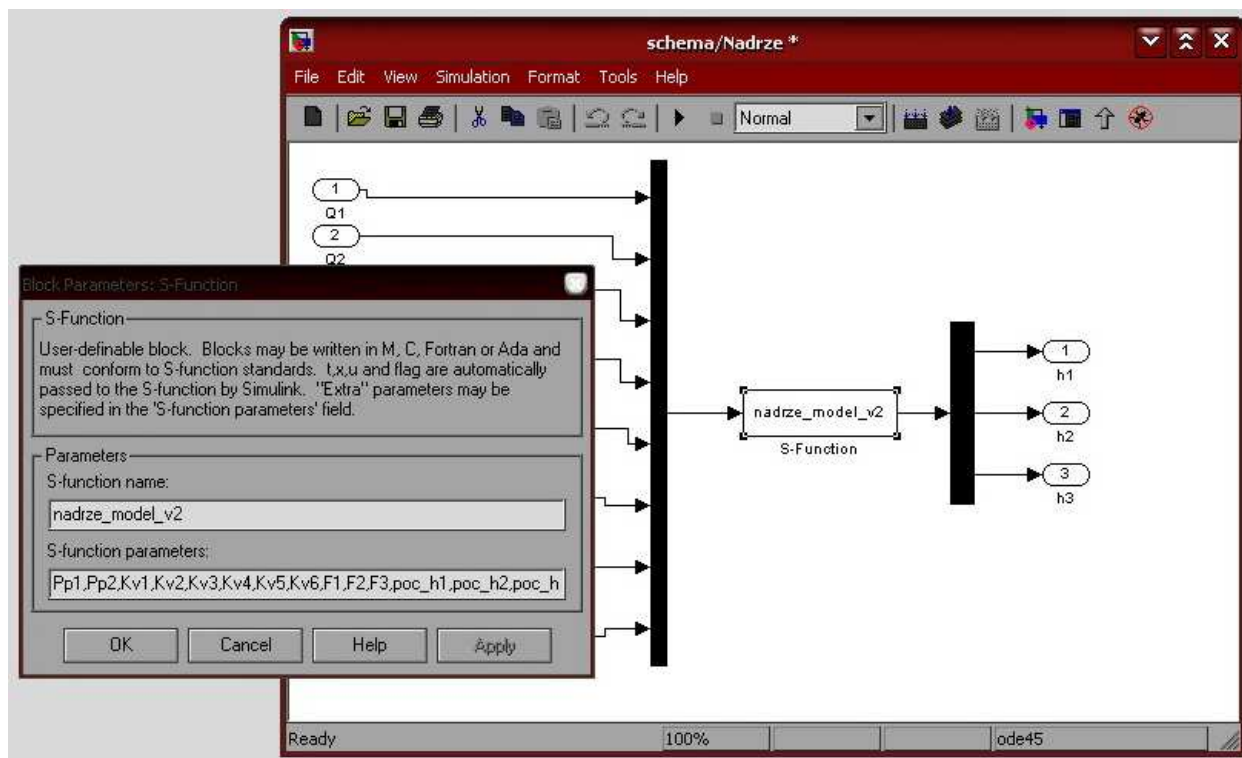
7 MODEL SOUSTAVY V PROSTŘEDÍ SIMULINK



Obr. 33. Simulinkový model soustavy tří spojených nádrží

7.1 Uživatelské nastavení s- funkce

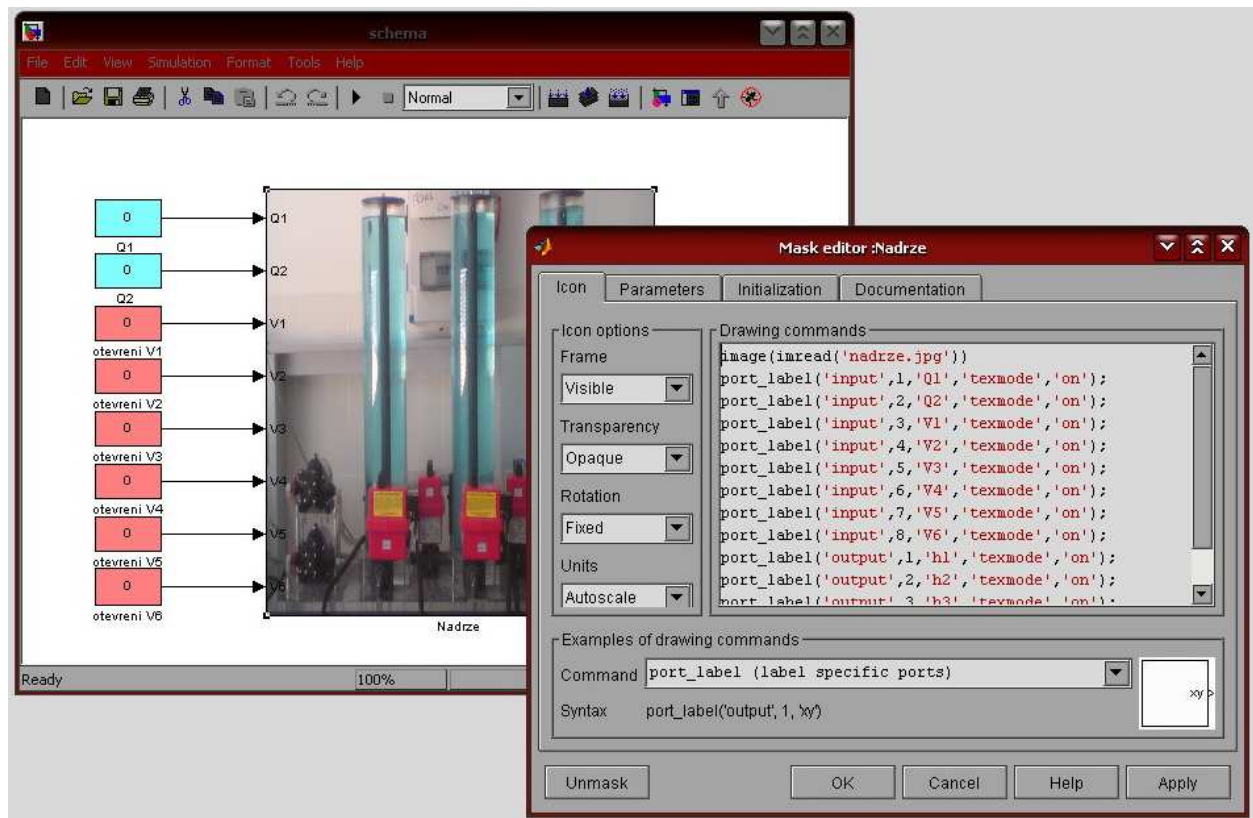
Tady bude popsáno několik použití s-function a některé úkony potřebné k chodu a jednoduché manipulaci s touto funkcí. Např. pokud máme zájem přidat potřebný počet vstupů a výstupů, provedeme to pomocí bloků *mux* a *demux*, které se nacházejí v sekci *simulink-signal routing*. Pro požadovaný počet vstupů stačí kliknout na blok a zde změnit počet vstupů. Pro náš případ vypadá s-funkce podle obrázku 34. Na obrázku lze vidět několik parametrů v políčku S-function parameters, zadáváme zde parametry které použijeme v masce.



Obr. 34. S-funkce pro model tří spojených nádrží

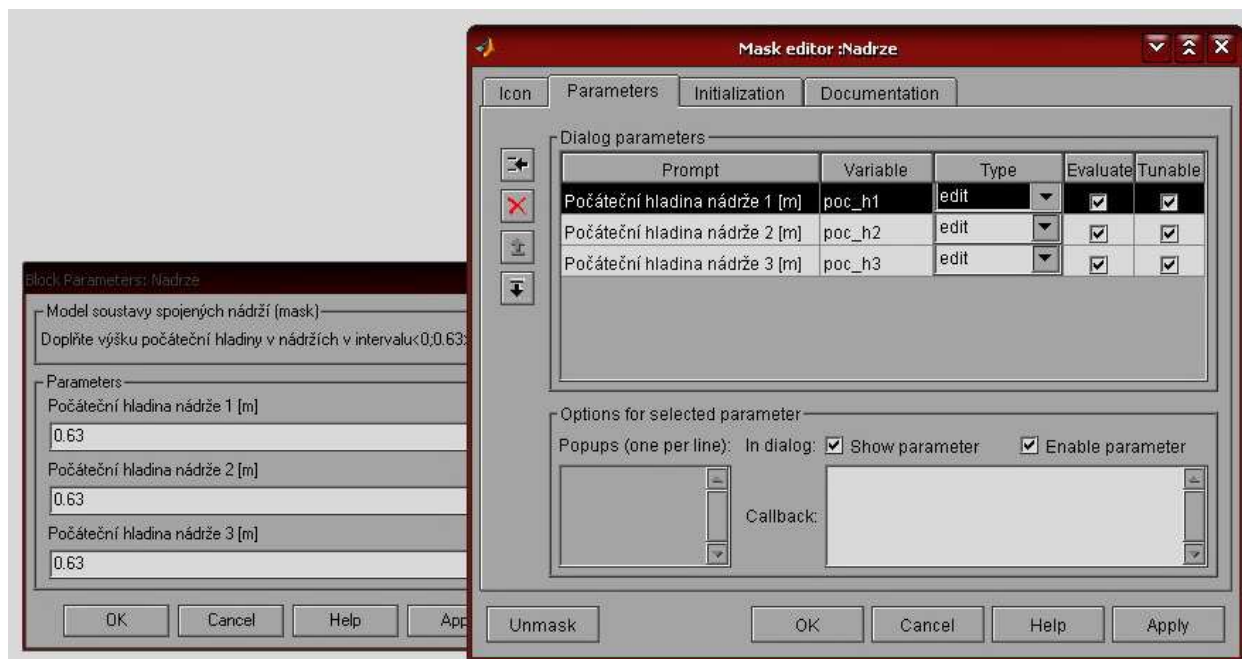
V jednotlivých proměnných se předávají hodnoty výšky hladiny, průtok čerpadlem atd. Označením bloků a kliknutím pravým tlačítkem myši a vybráním položky *create subsystem*, se vytvoří jeden blok se 8 vstupy a 3 výstupy. Dále lze tento blok upravovat a to tak, že pravým tlačítkem klikneme na blok a vybereme položku *edit mask*. Otevře se okno *mask editoru*. V tomto editoru se dají měnit názvy vstupů, dá se načíst obrázek na pozadí bloku. K tomu slouží příkazy:

`image(imrea('nadrze_2.jpg'))`; vloží obrázek na pozadí
`port_label('input',1,'Q1','texmode','on')`; pojmenuje první vstup jako Q1, *texmode* se používá pro zobrazení dolních indexů viz obrázek 35.



Obr. 35. Vytvořený blok se 8 vstupy a 3 výstupy

K vytvoření menu na obrázku 36 se využije záložky *parameters*, kde je možný slovní popis zadávaného parametru a k tomu se přiřadí proměnná, která se pak předá m-filu. Do menu se dá dostat kliknutím levého tlačítka myši na blok.



Obr. 36. Vytvoření menu pro zadávání výšky hladiny

7.2 Vstupy, výstupy, parametry a konstanty s-funkce

Vstupy:

| | |
|--------|--|
| Q1 | -Výkon čerpadla 1 vyjádřeny v [%] maximálního prouku |
| Q2 | -Výkon čerpadla 2 vyjádřeny v [%] maximálního prouku |
| Ov1 | -Otevření přepouštěcích ventilů 1 vyjádřeny v [%] |
| Ov2 | -Otevření přepouštěcích ventilů 2 vyjádřeny v [%] |
| Ov3 | -Otevření vypouštěcího ventilu 3 vyjádřeny v [%] |
| Ov4 | -Otevření vypouštěcího ventilu 4 vyjádřeny v [%] |
| Ov5 | -Otevření vypouštěcího ventilu 5 vyjádřeny v [%] |
| Ov6 | -Otevření vypouštěcího ventilu 6 vyjádřeny v [%] |
| poc_h1 | -Počáteční výšky hladiny v nádrží 1[m] |
| poc_h2 | -Počáteční výšky hladiny v nádrží 2[m] |
| poc_h3 | -Počáteční výšky hladiny v nádrží 3[m] |
| Pp1 | -Průtok čerpadla 1 vyjádřený [m ³ /s] |
| Pp2 | -Průtok čerpadla 2 vyjádřený [m ³ /s] |

Výstupy:

| | |
|----|-------------------------------|
| h1 | -Výšky hladiny v nádrži 1 [m] |
| h2 | -Výšky hladiny v nádrži 2 [m] |
| h3 | -Výšky hladiny v nádrži 3 [m] |

Parametry:

| | |
|--------|--|
| h1_max | -Maximální výška hladiny 1 [m] |
| h2_max | -Maximální výška hladiny 2 [m] |
| h3_max | -Maximální výška hladiny 3 [m] |
| h3_min | - Vyjadřuje délku výtokového potrubí 3 [m] |
| h4_min | - Vyjadřuje délku výtokového potrubí 4 [m] |
| h5_min | - Vyjadřuje délku výtokového potrubí 5 [m] |
| h6_min | - Vyjadřuje délku výtokového potrubí 6 [m] |

Konstanty:

| | |
|-----|---|
| F1 | -Plocha podstavy válcové nádrže 1 [m ²] |
| F2 | -Plocha podstavy válcové nádrže 2 [m ²] |
| F3 | -Plocha podstavy válcové nádrže 3 [m ²] |
| Kv1 | - Konstanta přepouštěcího ventilu 1 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |
| Kv2 | - Konstanta přepouštěcího ventilu 2 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |
| Kv3 | - Konstanta vypouštěcího ventilu 3 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |
| Kv4 | - Konstanta vypouštěcího ventilu 4 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |
| Kv5 | - Konstanta vypouštěcího ventilu 5 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |
| Kv6 | - Konstanta vypouštěcího ventilu 6 [$\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$] |

7.3 Základní struktura s-funkce

function[sys,x0,str,ts]=boiler_model(t,x,u....)

`[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(t,x,u);` - Tato funkce se vykonává jen na začátku běhu programu, tudíž je využita na kontrolu omezení. Slouží k nastavení počtu vstupů, výstupů.

`sys=mdlDerivatives(t,x,u);` - počítá derivace stavů na základě stavů a vstupů. Předává parametry pro výpočet derivací stavů ve funkci `mdlDerivatives`.

`sys=mdlOutputs(t,x,u);` - počítá výstup na základě stavů a vstupů. Na základě parametrů v závorce počítá výstupní hodnoty.

`sys=mdlTerminate(t,x,u);` - ukončení programu.

7.4 Verze 0

Tato verze programu popisuje pouze základní fyzikální zákonitosti soustavy tří spojených nádrží.

Umožňuje obsluhu zadávat do vstupů libovolné hodnoty.

Parametry dále použité ve výpočtech:

```
(t, x, u, flag, Pp1, Pp2, Kv1, Kv2, Kv3, Kv4, Kv5, Kv6, F1, F2, F3, poc_h1, poc_h2, poc_h3)
```

Rozdíl hladin sousedních nádrží:

```
d_h1_h2 = h1-h2;
d_h2_h3 = h2-h3;
```

Hlídá směr toku kapaliny přes přepouštěcí potrubí aby rozdíl hladin nebyl záporný :

```
s1=1;
s2=1;

if(d_h1_h2<0)
    s1=-1;
    d_h1_h2=abs(d_h1_h2);
end

if(d_h2_h3<0)
    s2=-1;
    d_h2_h3=abs(d_h2_h3);
end
```

Derivace (viz. Rovnice 11):

```
sys = [(q1-Ov1*s1*Kv1*sqrt(d_h1_h2)-Ov4*Kv4*sqrt(h1))/F1 ...
        (Ov1*s1*Kv1*sqrt(d_h1_h2)-Ov2*s2*Kv2*sqrt(d_h2_h3)-Ov5*Kv5*sqrt(h2))/F2
        ...
        (q2+Ov2*s2*Kv2*sqrt(d_h2_h3)-Ov3*Kv3*sqrt(h3)-Ov6*Kv6*sqrt(h3))/F3];
```

7.5 Verze 1

Verze 1 obsahuje navíc oproti verzi 0 omezení vstupních hodnot a výšky hx_{min} , které charakterizují délky vypouštěcích potrubí.

Parametry dále použité ve výpočtech:

```
(t, x, u, flag, Pp1, Pp2, Kv1, Kv2, Kv3, Kv4, Kv5, Kv6, F1, F2, F3, poc_h1, poc_h2, poc_h3, h1_max, h2_max, h3_max, h3_min, h4_min, h5_min, h6_min)
```

Nebude dále derivovat, když $h1$ je mimo $\langle 0, h1_{max} \rangle$:

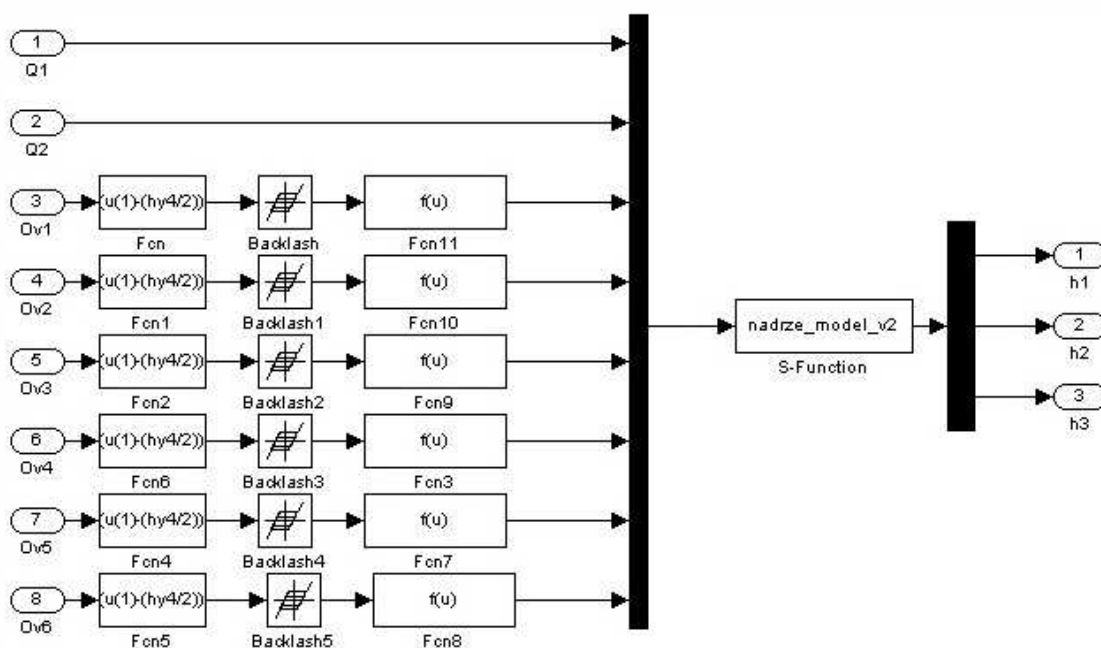
```
if h1>h1_max || h1<0
    Der1=0;
else
```

Změna zápisu derivace (viz. Rovnice 12):

```
    Der1=(q1-Ov1*s1*Kv1*sqrt(d_h1_h2)-Ov4*Kv4*sqrt(h1+h1_min))/F1;
end
```

7.6 Verze 2

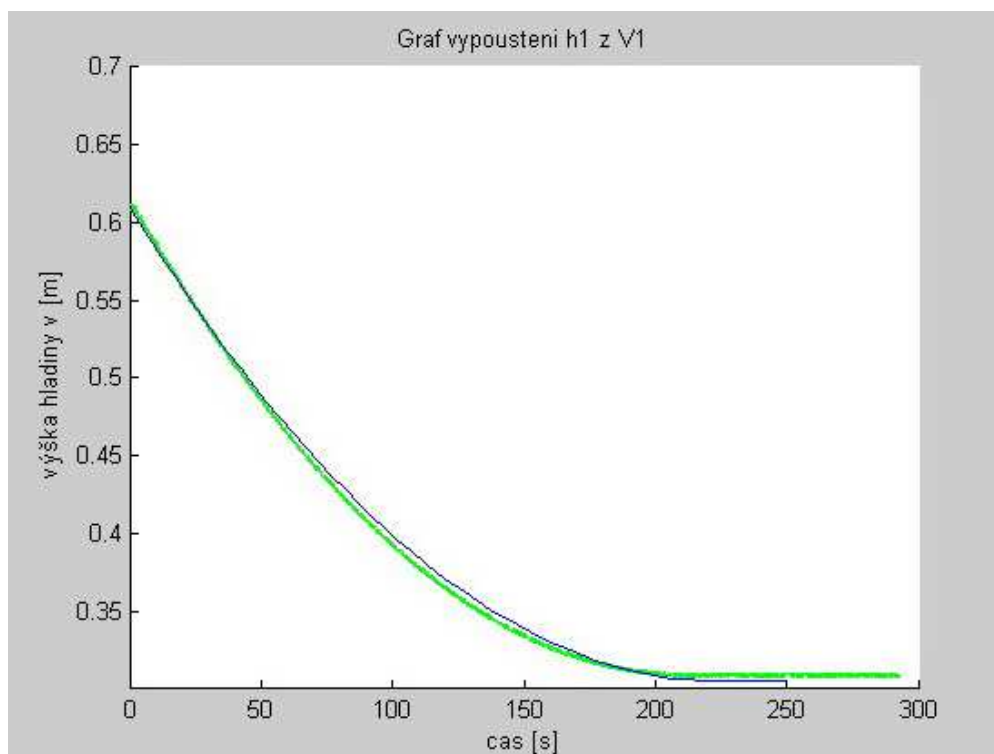
Poslední verze programu je totožná s verzí 1. Liší se pouze v simulinkovém modelu, kde obsahuje bloky (backlash, Fcn) vytvářející hysterezi která je obdobou hystereze ventilů v soustavě tří spojených nádrží.



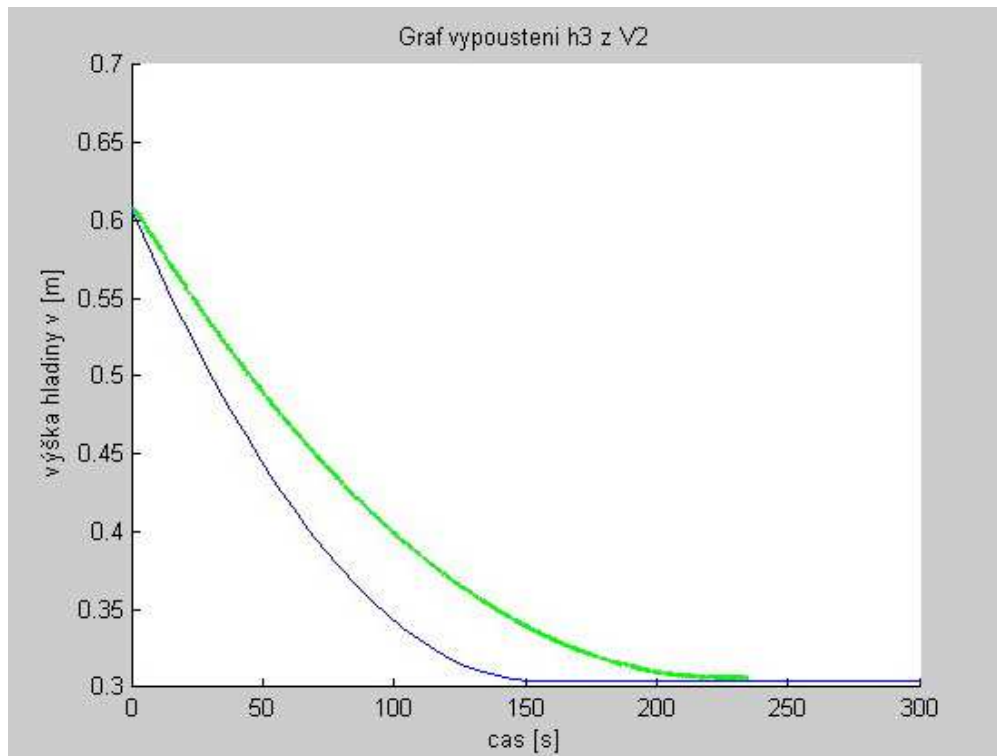
Obr. 37. Ukázka použití bloku backlash v modelu verze2

8 POROVNÁNÍ

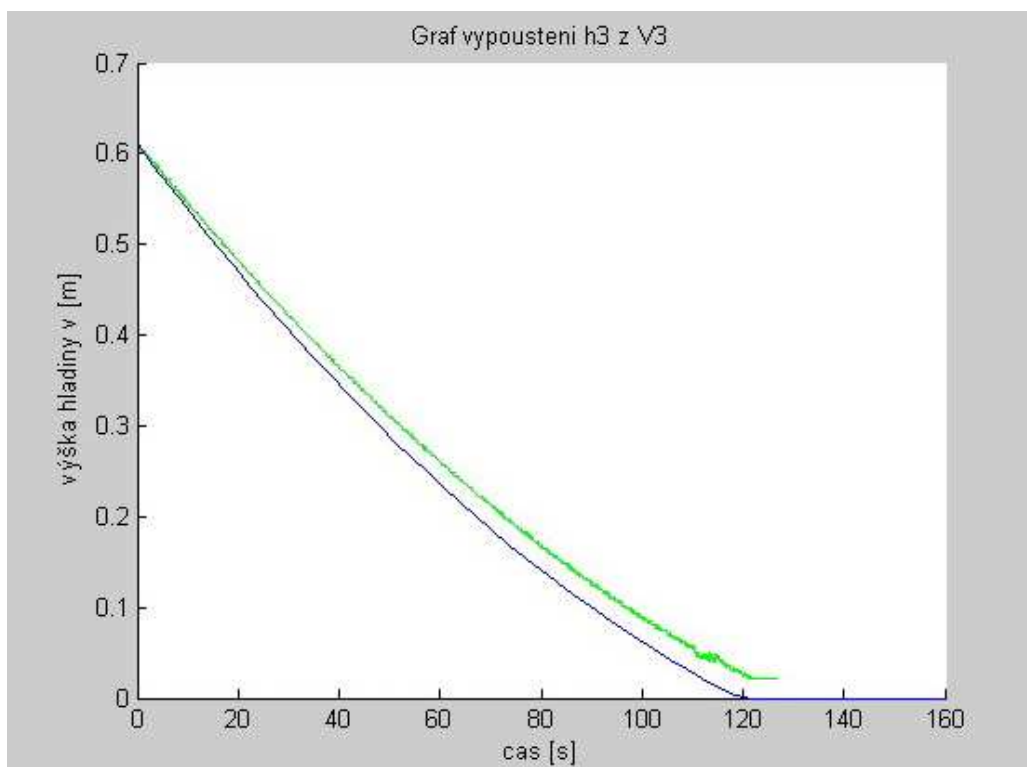
Výsledkem této práce je srovnání výsledků z naměřených dat na soustavě tří spojených nádrží Amira DTS200 a výsledků z vytvořeného modelu. Níže jsou uvedeny grafy s tímto srovnáním v nichž zelená znázorňuje data naměřená na soustavě a modrá znázorňuje data z vytvořeného modelu za stejných výchozích podmínek.



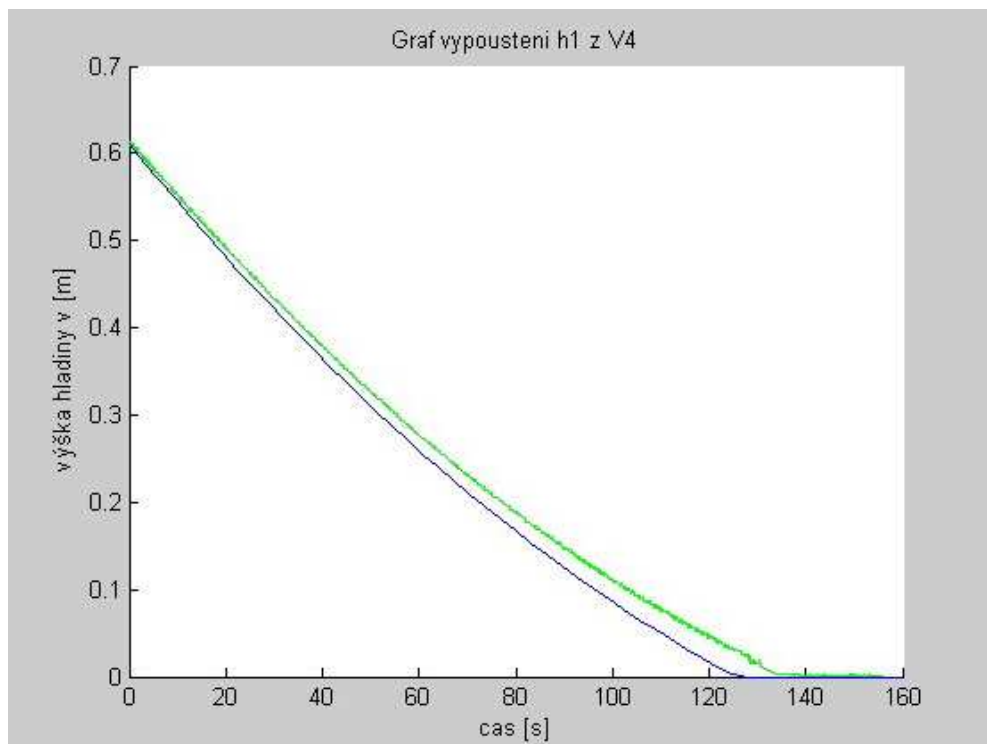
Obr. 38. Srovnání dat ze soustavy a modelu při přepouštění z nádrže 1 přes ventil 1



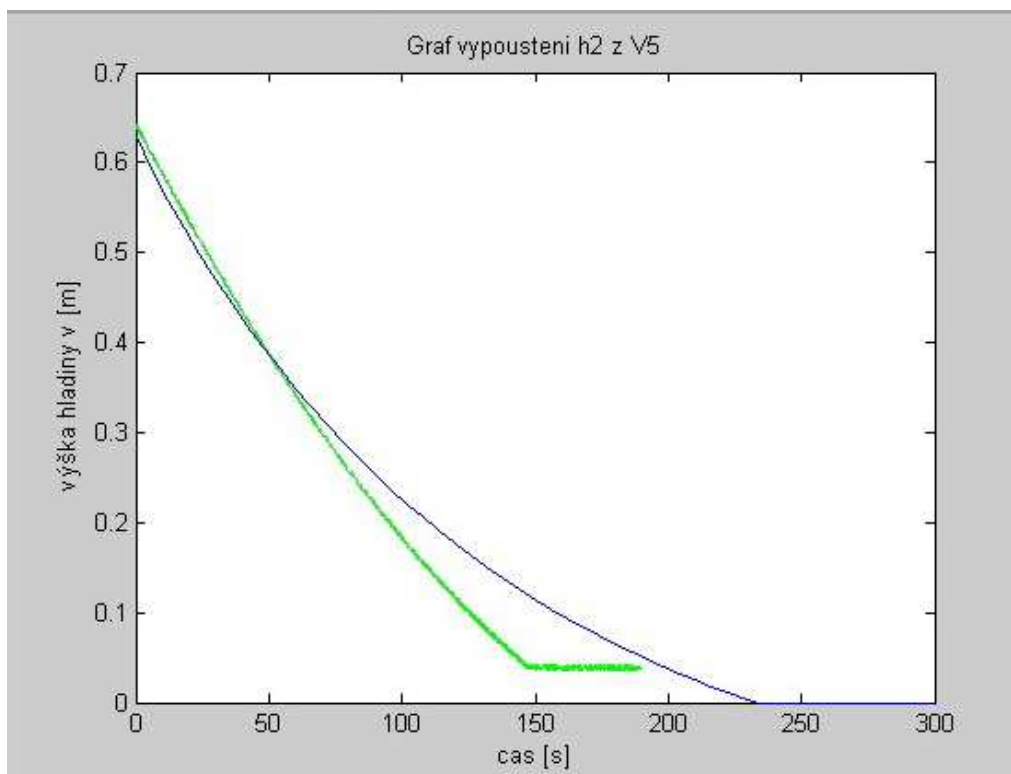
Obr. 39. Srovnání dat ze soustavy a modelu při přepouštění z nádrže 3 přes ventil 2



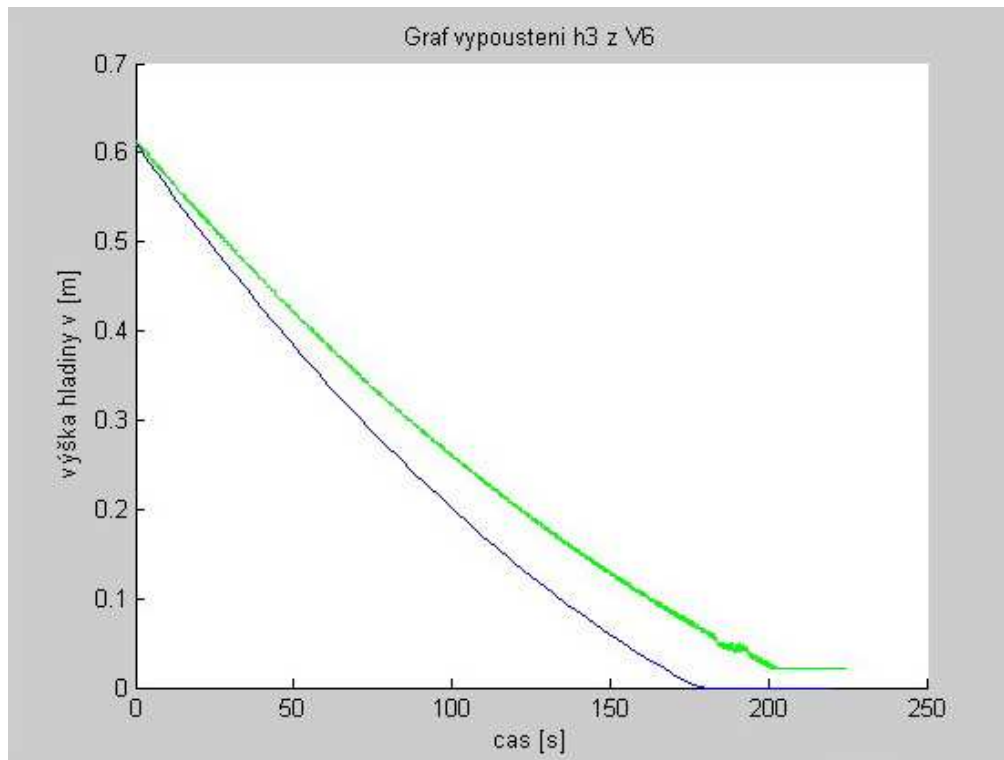
Obr. 40. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 3 přes ventil 3



Obr. 41. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 1 přes ventil 4



Obr. 42. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 2 přes ventil 5



Obr. 43. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 3 přes ventil 6

Odchyly mezi měřeními na soustavě a měřeními na modelu jsou v rozmezí 5 až 7s u ventilů 1, 4, 3, což je dobrý výsledek vzhledem k složitému a zdlouhavému vyhodnocování naměřených dat. Ovšem výsledek v rozmezí 20 až 80s v případě ventilů 2, 5, 6, jsou dosti nepřesné, tato odchylka může být zapříčiněna pravděpodobně nesprávným postupem měření vypouštění nádrže 2 a 3, nebo také malým množstvím měření na jednotlivých ventilech. Možnou příčinou může být v některých případech nevhodným rozložením hodnot otevření ventilů nebo také chybě při vyhodnocování naměřených průběhů .

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byl vytvořen model soustavy tří spojených válcových nádrží. Model byl vytvořen v prostředí Matlab/Simulink a může být použit pro urychlení a usnadnění experimentů prováděných na této laboratorní soustavě a soustavách, které jsou svou topologií obdobné.

Matematickému modelování nelze upřít zejména flexibilitu a způsobilost pro sestavování komplexních modelů. Avšak, přes všechny své přednosti matematický model zůstává pouhou abstrakcí, jež vyjadřuje matematickou reprezentaci řešeného problému. Míra vystihnutí skutečnosti je dána úrovní znalostí fyzikální povahy problému a stupněm dokonalosti matematického popisu působících jevů. Fyzikální model obvykle postrádá výhody zmíněné u matematické verze. Jeho mimořádnou předností však je, že jde o fyzikální realitu, jež je vždy experimentálně ověřována za skutečných fyzikálních podmínek.

Vytvořený model, který byl zkonstruován metodou grey box, tedy odpovídá více než stovce naměřeným a vyhodnoceným průběhům na soustavě tří spojených nádrží a vytvořené bilanční rovnici. Při vytváření modelu byly uvažovány: nelinearity a saturace ve ventilech, délky výtokového potrubí, hystereze ventilů. Vlastnosti kapaliny obsažené v soustavě byly považovány za ideální. Odchyly mezi měřeními na soustavě a měřeními na modelu odpovídají počtu měření na jednotlivých ventilech a pohybuje se přibližně od 4 do 30 %.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

A model system of three interconnected cylindrical tank was created in the framework of the bachelor work. The model was created in the Matlab/Simulink environment and can be used for acceleration and simplification of experiments performed with this laboratory system or systems with an analogous topology.

Mathematical simulation is efficient and eligible for building complex models. However, despite all its advantages, mathematical model stays mere abstraction, which represents mathematical description of a solved problem. The measure of representation is given by level of knowledge of physical character of the problem and by degree of perfection of mathematical description. Physical model usually misses benefits mentioned in connection with acquisition a investigation mathematical version. However, its extraordinary advantage consists in the fact that it is based on physical reality, which is always experimentally checked in real physical conditions.

Created model that has been developed using a grey box method and is based on more than hundred measured and evaluated courses obtained from the three-tank system. Following influences were taken into account when creating the model: nonlinearity and saturation of the valves, the length of outflow conduit, hysteresis of valves. Characteristics of liquid included in the system were considered ideal. Differences between experiment with the system and experiments with the model correspond to the number of measurements of individual valves and are approximately from 4 to the 30%.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOBÁL, V. : Identifikace systémů. 1. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati, 2009. 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [2] Kamler, R. : Metody identifikace spojitých modelů technologických soustav. 1. vyd. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 1999. 147s. www.fm.tul.cz/krt/krt_cz/vyuka/text/identrk.doc
- [3] Filip M. : Návrh a realizace metodiky pro testování systému SAKVŘ. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2006. 46s.
https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/filipm5_2006bach.pdf
- [4] Pišan R. : Knihovna modelů technologických procesů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2007. 10 s.
- [5] Sousedík. : Rozšíření modelů technologických procesů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2009 .18s
- [6] Raida Z., Fiala P.: Počítače a programování 2. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 102 s
- [7] MODELOVÁNÍ BIOPROCESŮ. 14s <http://www.vscht.cz/kch/kestazeni/sylaby/model.pdf>
- [8] Manuál, DTS200 Laboratory Setup Three – Tank – System. ©Copyright Amira GmbH 2000, 2002. 270s
- [9] Noskievič P.: Modelování a identifikace systémů. Ostrava : 1999, 275s. ISBN 80-7225-030-2
- [10] Hřebíček J., Škrdla M.: Úvod do matematického modelování. 2006, 83s.
<https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | | |
|-----|---|-----------------------------------|
| u | | výstupy |
| n | | měřené poruchy |
| Q1 | | čerpadlo č.1 |
| Q2 | | čerpadlo č.2 |
| V1 | | přepouštěcí ventil 1 |
| nm | | měřené poruchy |
| V2 | | přepouštěcí ventil 2 |
| V3 | | výtokový ventil 3 |
| V5 | | výtokový ventil 5 |
| V6 | | výtokový ventil 6 |
| N1 | | nádrž č.1 |
| N2 | | nádrž č.2 |
| N3 | | nádrž č.3 |
| h1 | m | výška hladiny v nádrži 1 |
| h2 | m | výška hladiny v nádrži 2 |
| h3 | m | výška hladiny v nádrži 3 |
| Ov | % | otevření ventilu vyjádřeny v |
| F | m ² | plocha podstavy válcové nádrže |
| Kv | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | Konstanta přepouštěcího ventilu 1 |
| Ov1 | % | otevření přepouštěcích ventilů 1 |
| Ov2 | % | otevření přepouštěcích ventilů 2 |
| Ov3 | % | otevření přepouštěcích ventilů 3 |
| Ov4 | % | otevření přepouštěcích ventilů 4 |
| Ov5 | % | otevření přepouštěcích ventilů 5 |

| | | |
|--------|---|--|
| Ov6 | % | otevření přepouštěcích ventilů 6 |
| poc_h1 | m | počáteční výšky hladiny v nádrží 1 |
| poc_h2 | m | počáteční výšky hladiny v nádrží 2 |
| poc_h3 | m | počáteční výšky hladiny v nádrží 3 |
| Pp1 | $m^3 / \%$ | průtok čerpadla 1 vyjádřený |
| Pp2 | $m^3 / \%$ | průtok čerpadla 2 vyjádřený |
| h1_max | m | maximální výška hladiny 1 |
| h2_max | m | maximální výška hladiny 2 |
| h3_max | m | maximální výška hladiny 3 |
| h1_min | m | množství kapaliny ve výtokovém potrubí 1 |
| h2_min | m | množství kapaliny ve výtokovém potrubí 2 |
| h3_min | m | množství kapaliny ve výtokovém potrubí 3 |
| F1 | m^2 | plocha podstavy válcové nádrže 1 |
| F2 | m^2 | plocha podstavy válcové nádrže 2 |
| F3 | m^2 | plocha podstavy válcové nádrže 3 |
| Kv1 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 1 |
| Kv2 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 2 |
| Kv3 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 3 |
| Kv4 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 4 |
| Kv5 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 5 |
| Kv6 | $\sqrt{m^5} \cdot s^{-1} \cdot MU^{-1}$ | konstanta přepouštěcího ventilu 6 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1. Systém | 14 |
| Obr. 2. Model | 14 |
| Obr. 3. Inverzní model | 15 |
| Obr. 4 Identifikační cyklus | 18 |
| Obr. 5 Schéma a-funkce a parametry | 28 |
| Obr. 6. Laboratorní model AMIRA DTS200 | 32 |
| Obr. 7. Blokové schéma modelu | 33 |
| Obr. 8. Ovládací panely..... | 35 |
| Obr. 9. Ovládání Amira DTS200 v prostředí SIMULINK..... | 36 |
| Obr. 10. Blokové schéma modelu | 37 |
| Obr. 11. Závislosti výšky hladiny1 v [mm] na výšce hladiny1 v [MU]..... | 39 |
| Obr. 12. Závislosti výšky hladiny2 v [mm] na výšce hladiny2 v [MU]..... | 40 |
| Obr. 13. Závislosti výšky hladiny2 v [mm] na výšce hladiny2 v [MU]..... | 40 |
| Obr. 14. Otevírání ventilů, | 41 |
| Obr. 15. Chybové hlášení | 42 |
| Obr. 16. Vypouštěcí potrubí nádrže | 43 |
| Obr. 17. Grafické znázornění hmin pro ventil 4..... | 45 |
| Obr. 18. Příklad použití bloku Backlash. | 46 |
| Obr. 19. Příklad použití bloku Backlash pro hysterezi..... | 46 |
| Obr. 20. Měření pro výpočet hystereze ventilu 1 | 47 |
| Obr. 21. Měření pro výpočet hystereze ventilu 2 | 47 |
| Obr. 22. Měření pro výpočet hystereze ventilu 3 | 48 |
| Obr. 23. Měření pro výpočet hystereze ventilu 4 | 48 |
| Obr. 24. Měření pro výpočet hystereze ventilu 5 | 49 |
| Obr. 25. Měření pro výpočet hystereze ventilu 6 | 49 |
| Obr. 26. Hystereze ventilu 1 (osa y = OV1[%], osa x = V1[%]) | 50 |
| Obr. 27. Hystereze ventilu 2 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%]) | 50 |
| Obr. 28. Hystereze ventilu 4 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%]) | 51 |
| Obr. 29. Hystereze ventilu 4 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%]) | 51 |
| Obr. 30. Hystereze ventilu 5 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%]) | 52 |
| Obr. 31. Hystereze ventilu 6 (osa y = OV4[%], osa x = V4[%]) | 52 |

| | |
|---|----|
| Obr. 32. Graf měření pro výpočet konstanty ventilu 4 a hystereze | 54 |
| Obr. 33. Simulinkový model soustavy tří spojených nádrží..... | 55 |
| Obr. 34. S-funkce pro model tří spojených nádrží | 56 |
| Obr. 35. Vytvořený blok se 8 vstupy a 3 výstupy..... | 57 |
| Obr. 36. Vytvoření menu pro zadávání výšky hladiny | 58 |
| Obr. 37. Ukázka použití bloku backlash v modelu verze2..... | 61 |
| Obr. 38. Srovnání dat ze soustavy a modelu při přepouštění z nádrže 1 přes ventil 1 | 62 |
| Obr. 39. Srovnání dat ze soustavy a modelu při přepouštění z nádrže 3 přes ventil 2..... | 63 |
| Obr. 40. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 3 přes ventil 3..... | 63 |
| Obr. 41. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 1 přes ventil 4..... | 64 |
| Obr. 42. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 2 přes ventil 5..... | 64 |
| Obr. 43. Srovnání dat ze soustavy a modelu při vypouštění nádrže 3 přes ventil 6..... | 65 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1. Vlastnosti analytické a experimentální identifikace [9]..... | 19 |
| Tab. 2 Porovnání "white" a "black box" modelů..... | 21 |
| Tab. 3. Porovnání modelů ve spojitě a diskrétní oblasti | 24 |
| Tab. 4. Technická data Amiri DTS200 | 34 |
| Tab. 5. Seznam mezí ventilů | 41 |
| Tab. 6. Hmin jednotlivých nádrží..... | 45 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|------|--------------------------------------|
| P I | Popis a rozložení souborů na CD-ROMU |
| P II | CD-ROM |

PŘÍLOHA P I : POPIS A ROZLOŽENÍ SOUBORŮ NA CD-ROMU

měření

| | |
|-------|---|
| h1v1 | - měření ventilu 1 při otevírání |
| h1v1o | - měření ventilu 1 při zavírání |
| h1v4 | - měření ventilu 4 při otevírání |
| h1v4o | - měření ventilu 4 při zavírání |
| h2v5 | - měření ventilu 5 při otevírání |
| h2v5o | -měření ventilu 5 při zavírání |
| h3v2 | - měření ventilu 2 při otevírání |
| h3v2o | -měření ventilu 2 při zavírání |
| h3v3 | - měření ventilu 3 při otevírání |
| h3v3o | - měření ventilu 3 při zavírání |
| h3v6 | - měření ventilu 6 při otevírání |
| h3v6o | - měření ventilu 6 při zavírání |
| v0 | -model v prostředí Matlab/SIMULINK verze 0 |
| v1 | - model v prostředí Matlab/SIMULINK verze 1 |
| v2 | - model v prostředí Matlab/SIMULINK verze 2 |

PŘÍLOHA P II: CD-ROM

Na CD-ROMU jsou uloženy naměřená data všech ventilů při zavírání a otevírání. CD-ROM také obsahuje modely verze 0, 1 a 2 včetně programů a příslušenství (.jpg)