

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

VYTVOŘENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU SOUSTAVY GUNT RT 010

Tomáš Brtek

Bakalářská práce

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Brtek**
Osobní číslo: **I14036**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Vytvoření fyzikálního modelu soustavy GUNT RT 010**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

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

Cíl:

Vytvoření, identifikace a verifikace fyzikálního modelu laboratorní soustavy GUNT RT 010.

Obsah teoretické části:

Modelování a experimentální identifikace dynamického modelu soustavy, simulace.

Obsah implementační části:

Vytvoření dynamického modelu pomocí matematicko-fyzikální analýzy, identifikace neznámých parametrů, verifikace modelu v otevřené a uzavřené smyčce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

DRÁBEK, O., MACHÁČEK, J. Experimentální identifikace. Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1987.

BALÁŤE, J. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004.

DUŠEK, F., HONC, D. Matlab a Simulink, Úvod do používání. skriptum, Univerzita Pardubice, vydání první, Pardubice, 2005.

HONC, D., DUŠEK, F. MATLAB/Simulink Support for GUNT Control Units.

In: 19th International Conference on Process Control 2013, Štrbské Pleso, Slovakia, June 18 - 21 2013, Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, pp. 534-539.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Daniel Honc, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce:

1. prosince 2016

Termín odevzdání bakalářské práce:

12. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. prosince 2016

Prohlášení

Prohlašuji:

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

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 25. 4. 2017

Tomáš Brtek

Poděkování

Chtěl by především poděkovat vedoucímu práce Ing. Danielu Honcovi, PhD, za čas, trpělivost a odborné rady při konzultacích. Dále bych rád poděkoval rodičům, kteří mě v průběhu celého studia podporovali.

V Pardubicích dne 25. 4. 2017

Tomáš Brtek

ANOTACE

Práce je zaměřena na vytvoření dynamického modelu laboratorní soustavy GUNT RT 010 analytickou metodou a jeho verifikaci. V teoretické části jsou vysvětleny pojmy identifikace systémů, modelování a simulace. V praktické části je hlavním cílem identifikovat parametry reálné soustavy, určit dynamický matematický popis soustavy a ověřit kvalitu modelu bez regulace a v uzavřeném regulačním obvodu.

KLÍČOVÁ SLOVA

GUNT RT 010, identifikace soustavy, modelování, simulace, verifikace

TITLE

FIRST PRINCIPLE MODEL OF SYSTEM GUNT RT 010

ANNOTATION

The work is focused on creating a dynamic model of the laboratory system GUNT RT 010 by analytical method and its verification. The theoretical part explains concepts of identification systems, modeling and simulation. In the practical part the main objective is to identify the parameters of the real system, determine the dynamic mathematical description of the system and verify the quality of the model without regulation and in the closed loop.

KEYWORDS

GUNT RT 010, Identification system, Modeling, Simulation, Verification

OBSAH

SEZNAM ZKTRATEK A ZNAČEK.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ.....	10
SEZNAM ILUSTRACÍ	12
SEZNAM TABULEK.....	14
ÚVOD	15
1 TEORETICKÁ ČÁST	16
1.1 SYSTÉM.....	16
1.1.1 Třídění systémů.....	17
1.2 MODEL	18
1.2.1 Fyzikální model.....	19
1.2.2 Matematický model.....	19
1.3 MODELOVÁNÍ.....	19
1.4 IDENTIFIKACE	19
1.4.1 Identifikační cyklus.....	20
1.4.2 Identifikace struktury	21
1.4.3 Identifikace parametrů	22
1.4.4 Analytická identifikace	22
1.4.5 Experimentální identifikace	23
1.5 SIMULACE	25
1.6 REGULÁTOR	26
1.6.1 P složka regulátor.....	27
1.6.2 I složka regulátor.....	27
1.6.3 D složka regulátor	27
1.7 REGULAČNÍ OBVOD	28
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	30
2.1 POPIS SOUSTAVY GUNT RT 010	30
2.2 MODEL SOUSTAVY	32
2.2.1 Identifikace parametrů čerpadla.....	32
2.2.2 Identifikace parametrů nádrže a ventilu.....	35
2.2.3 Identifikace parametrů čidla tlaku.....	41
2.3 VERIFIKACE MODELU.....	43
2.3.1 Verifikace statických vlastností	43

2.3.2	Verifikace dynamických vlastností soustavy	45
2.3.3	Verifikace dynamických vlastností v uzavřeném regulačním obvodu	49
3	ZÁVĚR	51
	POUŽITÁ LITERATURA	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	53

SEZNAM ZKTRATEK A ZNAČEK

MOS	model soustavy
PC	Personal Computer
PI	proporcionálně-integrační regulátor
RES	reálná soustava
URO	uzavřený regulační obvod
USB	Universal Serial Bus

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

a	konstantní reálný koeficient
b	konstantní reálný koeficient
d_v	průměr ventilu, m
d_n	průměr nádrže, m
d_t	průměr těla ventilu, m
d_p	aproximovaný průměr ventilu, m
e	konstantní reálný koeficient
e	regulační odchylka
f	konstantní reálný koeficient
F	průtočná plocha ventilu, m ²
F_p	aproximovaná průtočná plocha ventilu, m ²
g	gravitační zrychlení, m·s ⁻²
G	přenos soustavy
h	výška hladiny, m
h_{\max}	maximální výška hladiny, m
h_h	výška hladiny na měřítku, m
h_v	výška od středu ventilu k měřítku, m
h_t	výška od středu ventilu k nádrži, m
k	konstantní reálný koeficient
q	konstantní reálný koeficient
Q	objemový průtok, m ³ ·s ⁻¹
Q_c	objemový průtok čerpadla, m ³ ·s ⁻¹
Q_v	objemový průtok ventilu, m ³ ·s ⁻¹
S_n	obsah nádrže, m ²
S_t	obsah těla ventilu, m ²
t	čas, s
T	časová konstanta, s
T_d	derivační časová konstanta, s
T_i	integrační časová konstanta, s
r_n	poloměr nádrže, m
r_t	poloměr těla ventilu, m
u	akční zásah

u_0	minimální napětí čerpadla, V
u_c	napětí čerpadla, V
u_v	napětí ventilu, V
u_t	napětí tlakového čidla, V
U	vstup soustavy
v_i	porucha
w	žádaná hodnota
y	výstup soustavy, V
y_m	výstup modelu, V
y_{\min}	minimální napětí tlakového čidla, V
Z	zesílení

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Znázornění systému	16
Obr. 1.2 – Třídění dynamických systému	17
Obr. 1.3 – Vyšetřovaný systém.....	18
Obr. 1.4 – Model systému.....	18
Obr. 1.5 – Objekt identifikace	20
Obr. 1.6 – Identifikační cyklus	21
Obr. 1.7 – Ověření správnosti odhadu parametrů	22
Obr. 1.8 – Přechodová charakteristika soustavy 1. řádu.....	23
Obr. 1.9 – Přechodová charakteristika soustav vyšších řádů.....	24
Obr. 1.10 – Blokové schéma nepřímého regulátoru	26
Obr. 1.11 – Přechodová charakteristika P regulátoru	27
Obr. 1.12 – Přechodová charakteristika I regulátoru	28
Obr. 1.13 – Přechodová charakteristika ideálního D regulátoru.....	28
Obr. 1.14 – Otevřený regulační obvod	29
Obr. 1.15 – Uzavřený regulační obvod.....	29
Obr. 2.1 – GUNT RT 010	30
Obr. 2.2 – Schéma systému	31
Obr. 2.3 – Vazby mezi prvky systému.....	32
Obr. 2.4 – Závislost průtoku Q na vstupním napětí čerpadla u_c	34
Obr. 2.5 – Model čerpadla	35
Obr. 2.6 – Parametry nádrže	35
Obr. 2.7 – Závislost otevření ventilu na vstupním napětí ventilu.....	39
Obr. 2.8 – Model ventilu.....	40
Obr. 2.9 – Závislost průtočné plochy f na vstupním napětí ventilu u_v	40
Obr. 2.10 – Model nádrže	41
Obr. 2.11 – Závislost výstupního napětí u_t na hladině h	42
Obr. 2.12 – Model čidla tlaku	42
Obr. 2.13 – Model soustavy GUNT RT 010.....	43
Obr. 2.14 – Simulace změny vstupního signálu u_c	45
Obr. 2.15 – Vybuzení systému a modelu vstupním signálem u_c	46
Obr. 2.16 – Simulace změny vstupního signálu u_v	46
Obr. 2.17 – Vybuzení systému a modelu vstupním signálem u_v	47

Obr. 2.18 – Simulace změny vstupních signálů u_c a u_v	47
Obr. 2.19 – Vybuzení systému a modelu vstupními signály u_c a u_v	48
Obr. 2.20 – Uzavřený regulační obvod.....	49
Obr. 2.21 – Průběh regulované a akční veličiny s PI regulátorem	50

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Určení poměru časových konstant.....	25
Tab. 2.1 – Parametry prvků systému	31
Tab. 2.2 – Výsledky měření času.....	33
Tab. 2.3 – Průtoky pro jednotlivá napětí	33
Tab. 2.4 – Hodnoty výšek.....	36
Tab. 2.5 – Hodnoty průměrů.....	36
Tab. 2.6 – Výsledky měření ustálených hladin.....	38
Tab. 2.7 – Otevření ventilu pro napětí u_v	38
Tab. 2.8 – Výsledky měření výstupního napětí u_t	41
Tab. 2.9 – Naměřené výšky hladin systému při vstupních napětích u_c a u_v	44
Tab. 2.10 – Vypočtené výšky hladin modelu při vstupních napětích u_c a u_v	44
Tab. 2.11 – Chyby v určení výšky hladiny při vstupních napětích u_c a u_v	44
Tab. 2.12 – Nastavení regulátoru.....	49

ÚVOD

Na počátku se lidé při snaze o optimalizaci zařízení museli spoléhat pouze na vlastní instinkt a rozhodovat na základě znalostí a získaných zkušeností. Kromě matematických postupů měli k dispozici mechanická, elektrická a nakonec i elektronická zařízení a v současné době je ve většině případů pro optimalizaci používán počítač.

Současně nemusí být možné nebo vhodné experimentovat na reálných zařízeních a to jak z technických, časových, výrobních, ekonomických nebo dalších důvodů. V těchto případech je vhodnější pracovat s dynamickým modelem řízené soustavy, na kterém lze pomocí simulace navrhnout regulaci a následně testovat různé strategie řízení a provádět další případové studie. Takto je možné vytvářet i nové systémy, přičemž jsou minimalizovány náklady na výrobu, protože nedostatky jsou odstraněny již ve fázi návrhu.

Mým cílem bylo vytvořit model laboratorní soustavy GUNT RT 010 analytickou metodou, kde probíhající jevy v zařízení jsou popsány pomocí fyzikálních zákonů.

Teoretická část této práce se zabývá definicí reálných systémů a jejich tříděním. Dále rozebírá možnosti tvorby matematických modelů a postupy při jejich sestavování.

V praktické části je popsána laboratorní soustava GUNT RT 010 a uveden postup při sestavení dynamického matematického popisu tohoto zařízení. Následně je věnována pozornost verifikaci, která je rozdělena na dvě části. Nejprve se porovnávají vlastnosti soustavy a modelu bez regulace. Poté je zkoumána kvalita modelu v uzavřeném regulačním obvodu.

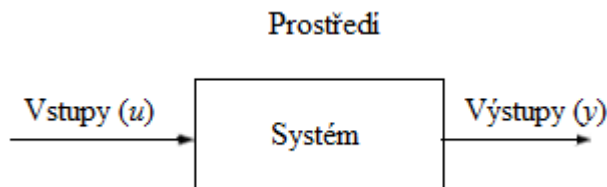
1 TEORETICKÁ ČÁST

V této části se zabývám definicí systému, rozebírám možnosti tvorby matematických modelů a věnuji se regulátorům a regulačním obvodům.

1.1 SYSTÉM

Systém je obecně soubor prvků, mezi nimiž jsou vzájemné vazby a jako celek má určité vztahy ke svému okolí (Balátě, 2004).

Schématická představa působení okolí na systém i systému na své okolí je graficky znázorněna na obr. 1.1.



Obr. 1.1 – Znázornění systému

Každý systém má dvě základní vlastnosti. Chování systému charakterizuje vnější vztahy k okolí, jedná se o závislost mezi podněty okolí působící na vstup systému a jejich odezvami, které se objevují na jeho výstupu. Typickými ukazateli chování jsou dynamické a statické vlastnosti. Zatímco statické vlastnosti se projevují v ustálených stavech, dynamické vlastnosti se projevují mezi ustálenými stavy nebo v případech, kdy se veličina rychle mění a zjišťuje se její okamžitá hodnota. Pojmeme struktura systému rozumíme, počet prvků daného systému, uspořádání a charakter vzájemných vazeb, kterými působí prvky mezi sebou a okolím.

Obě tyto vlastnosti systému se vzájemně ovlivňují, tedy určité struktury odpovídá jednoznačně určené chování a naopak (Balátě, 2004).

Subsystem je část, kterou z nějakého důvodu vyčleňujeme ze systému. Některé prvky jsou v mnohem užších vazbách mezi sebou, s ostatními prvky je vazba volnější.

Prvek systému je nejmenší část systému, která je z hlediska rozlišovací úrovně dále nedělitelná (Řízení technologických procesů, 2006).

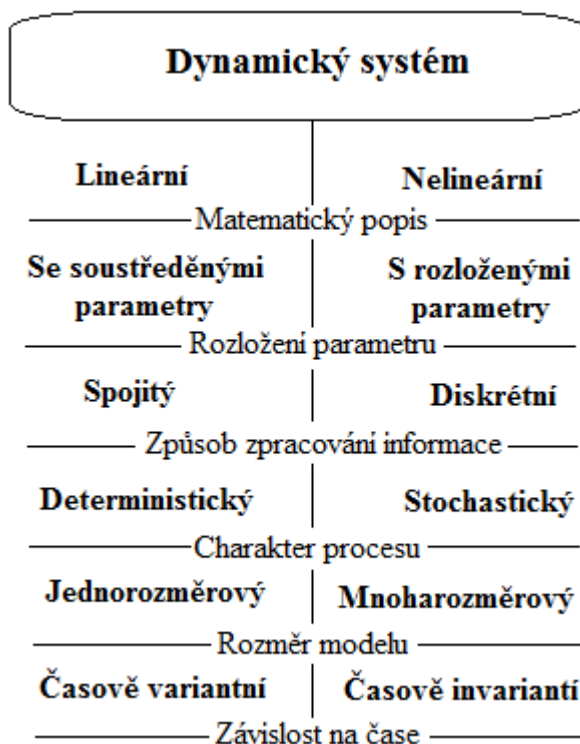
Vzhledem ke spojení mezi prvky systému nebo prvky systému a okolím definujeme vazbu systému. Z hlediska vztahu k okolí rozlišujeme vazbu vnitřní, která spojuje prvky systému mezi sebou a vazbu vnější, která spojuje hraniční prvek systému s okolím. Z hlediska

uspořádání prvků je vazba sériová, u které jsou prvky uspořádány za sebou, vazba paralelní, u které jsou prvky uspořádány vedle sebe a vazba zpětná, která spojuje výstup se vstupem téhož prvku subsystému nebo systému (Jančíková, 2012).

1.1.1 Třídění systémů

Podle chování systémů v čase se systémy dělí na statické a dynamické. U statických systému se stav v závislosti na čase nemění. Chování je vyjádřeno statickou charakteristikou. Druhou skupinou jsou dynamické systémy, jejichž stav je v čase proměnný. Chování je určeno pomocí dynamických charakteristik. Dynamické vlastnosti lze popsat pomocí diferenciálních rovnic.

Dynamický systém se dělí do několika tříd, které znázorňuje obr. 1.2, a může patřit pouze do jedné třídy v horizontálním směru, tj. nemůže být spojitý a zároveň diskrétní. Ve vertikálním směru je kombinace možná, tedy systém může být zároveň lineární, diskrétní a deterministický.



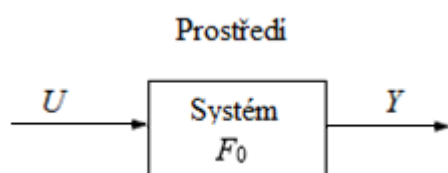
Obr. 1.2 – Třídění dynamických systémů

V průmyslové praxi většina objektů, se kterými je možné se setkat, mají stochastický charakter. Na výstupu soustavy se projevují náhodné vlivy, jejichž zdroj je neznámý, takže není určen pouze vstupními signály a jejich minulou historií. Mohou to být náhodné děje, které

probíhají uvnitř vlastního objektu nebo náhodné vlivy působícího vnějšího okolí. (Vrožina, 2012).

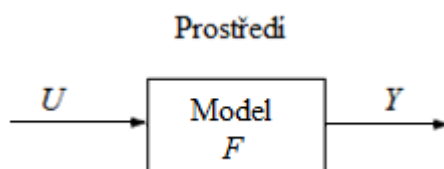
1.2 MODEL

Často je nutné zkoumat chování různých zařízení v mezních situacích, které nesmí nastat na reálných zařízeních, neboť by měli za důsledek značné škody, nebo je třeba vyšetřit vlastnosti objektů ještě před uvedením do výroby. V těchto případech je efektivnější pracovat místo se skutečnými zařízeními s jejich modely, které zobrazují podstatné vlastnosti reálného nebo konstruovaného systému. Obecně vyjadřuje vztahy příčiny a následku, které jsou vázány prostřednictvím operátoru transformace F_0



Obr. 1.3 – Vyšetřovaný systém

Pro model systému zavádíme operátor modelu F , který přiřazuje příčině U následek Y . Schéma modelu, můžeme vidět na obr. 1.4.



Obr. 1.4 – Model systému

Vazbu mezi příčinou U a následkem Y lze zapsat ve tvaru

$$Y = F(U). \tag{1.1}$$

Při identifikaci se snažíme určit takové F , aby bylo co nejbližší reálnému operátoru transformace F_0 .

Model reálného systému se vždy zjednodušuje a zanedbávají se nepodstatné detaily reálného systému. Právě míra zjednodušení rozhoduje, jak přesně bude model vystihovat

chování reálného objektu a jeho praktické použití. V této fázi tvorby modelu se musí rozlišit sledované jevy od nesledovaných, podstatné od nepodstatných (Jančíková, 2012).

1.2.1 Fyzikální model

Fyzikálním model je zmenšená kopie původního objektu na stejném fyzikálním principu. Zde se využívá tzv. teorie podobnosti. Dále může být založen i na jiném fyzikálním principu než původní objekt, ale i v tomto případě se řídí podobnými fyzikálními principy. Příkladem je elektrický obvod.

1.2.2 Matematický model

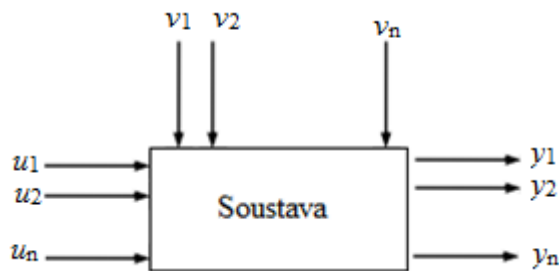
Soubor veličin, které jsou mezi sebou svázány pomocí vazeb a odpovídají fyzikálním veličinám modelovaného systému. Matematický model dynamického systému se popisuje pomocí diferenciálních, diferenčních a algebraických rovnic. Hlavním cílem je vyjádřit vlastnosti objektu tak, aby vystihoval vlastnosti důležité pro jeho zkoumání.

1.3 MODELOVÁNÍ

Modelování je experimentální proces, při němž se vyšetřovanému systému – modelovanému systému jednoznačně podle určitých kritérií přiřazuje fyzický nebo abstraktní model. Jinými slovy, jedná se o nahrazení reálného modelu modelem simulačním. Při tvorbě modelu experimentální soustavy je nutné vycházet z celkové architektury systému a vhodně zvolit vstupní a výstupní veličiny, které jsou měřitelné a jejichž výsledky jsou důležité.

1.4 IDENTIFIKACE

Identifikace je proces, při kterém se určuje matematický popis modelu soustavy, struktura a parametry modelu. Strukturou se rozumí řád a typ diferenciální nebo diferenční rovnice. Parametry jsou koeficienty těchto rovnic. Snahou je vyhodnotit měření a určit odhad operátoru F , tak aby byl v určitém předem definovaném smyslu blízký skutečnému operátoru F_0 . Objekt identifikace je vidět na obr. 1.5.



Obr. 1.5 – Objekt identifikace

Zkoumaný systém lze identifikovat analyticky, základní postupy vedoucí k sestavení matematických modelů systému vycházejí z matematicko-fyzikální analýzy. Příkladem můžou být systémy elektrické, hydraulické, pneumatické, mechanické a tepelné. U identifikace experimentální se vyšetřují dynamické vlastnosti systému a jeho matematický model se sestavuje empirickým způsobem – pomocí vhodných testovacích signálů se systém vybudí a následně se zaznamenává jeho odezva. Z vyhodnocení měřených signálů se určuje model systému (Jančíková, 2012).

1.4.1 Identifikační cyklus

Proces hledání optimálního modelu se skládá z následujících částí:

Plánování experimentu – experimenty s reálnými systémy jsou náročné a drahé, používá se analýza odezvy na vstupní signál.

Volba struktury systému – volí se na základě znalosti systému, působení poruchových veličin nebo podle pracovního bodu

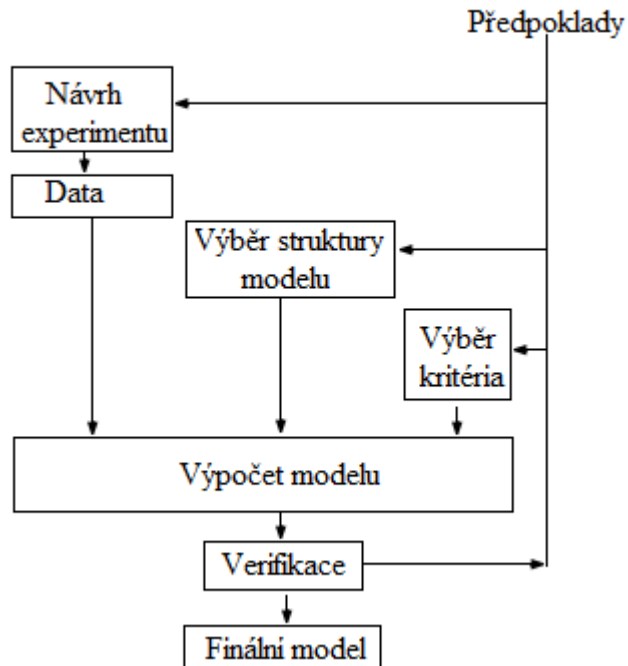
Volba vhodného kritéria kvality – určuje přesnost modelu.

Odhad parametrů – k jejich správnému odhadu je třeba znát vstupní/výstupní data, třídu přesnosti a kritérium. Nejčastější metody odhadu parametrů jsou:

- Analýza přechodové a frekvenční charakteristiky, kdy jsou určovány časové konstanty a řád systému.
- Metoda nejmenších čtverců a její modifikace.
- Metoda maximální věrohodnosti.

Verifikace – test shody chování modelu a systému.

Uvedený postup je graficky znázorněn na obr. 1.6.



Obr. 1.6 – Identifikační cyklus

Identifikační cyklus je ukončen získáním finálního modelu, jehož odchylka výstupu e je dostatečně malá nebo nulová. V ostatních případech je nutné vrátit se zpět v cyklu. Nejčastějšími důvody chyby je špatná volba kritéria nebo nedostatek nebo nepřesnost změřených dat (Macalík, 2008).

1.4.2 Identifikace struktury

Strukturou modelu se rozumí způsob vyjádření závislosti výstupního signálu na signálu vstupním ve tvaru diferenciální rovnice, přenosu, přechodové nebo impulsní charakteristiky. Struktura se volí v závislosti na vyšetřované soustavě.

K úlohám identifikace struktury patří:

- vyčlenění soustavy z prostředí,
- uspořádání vstupů a výstupů soustavy podle jejich vlivu na splnění cílů řízení,
- určení počtu vstupů a výstupů modelu,
- určení charakteru vztahu mezi vstupními a výstupními veličinami.

1.4.3 Identifikace parametrů

Verifikace modelu se provádí pomocí porovnávání výstupu systému y s výstupem modelu y_m při vybuzení systému i modelu stejným vstupním signálem u . Vznikne tak odchylka výstupů e , která je dána vztahem

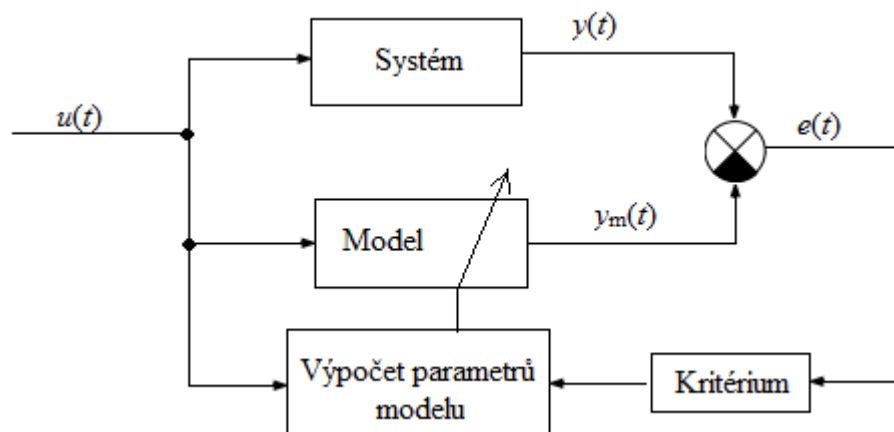
$$e(t) = y(t) - y_m(t), \quad (1.2)$$

kde $e(t)$ je odchylka výstupů,

$y(t)$ – výstup systému,

$y_m(t)$ – výstup modelu.

Pokud je tato odchylka dostatečně malá nebo nulová, byly parametry modelu odhadnuty správně. Pokud tomu tak není, je nutné odhadnout koeficienty modelu znovu, aby došlo ke zmenšení nebo odstranění vzniklé chyby. Pro lepší pochopitelnost je celý tento postup znázorněn na obr. 1.7.



Obr. 1.7 – Ověření správnosti odhadu parametrů

Získaný model lze použít pro predikci chování příslušného systému v závislosti na změnách vstupních veličin. Umožňuje mnohem rychlejší, levnější a efektivnější testování chování (Vrožina, 2012).

1.4.4 Analytická identifikace

U analytické identifikace se vychází z konstrukčních, technologických a provozních údajů objektu, jehož model se sestavuje pomocí matematicko-fyzikální analýzy. Probíhající

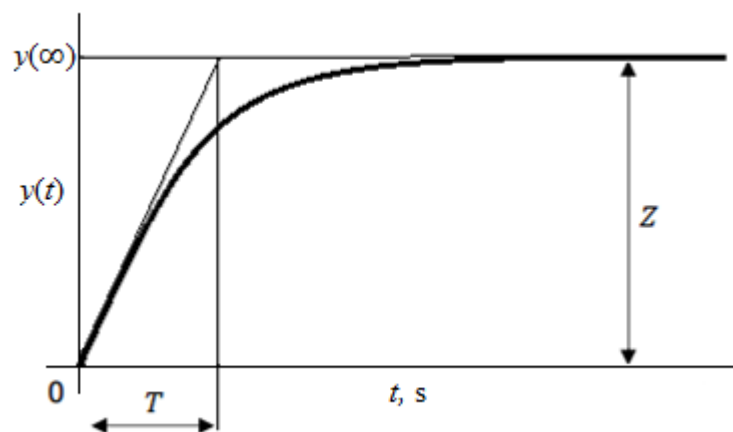
jevy v objektu se popisují pomocí fyzikálních zákonů např. Bernuolliho rovnice, které zároveň popisují vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami soustavy. Tyto vztahy vyjadřují vnitřní popis systému (tzv. white box). Výhodou je možnost zjistit a ovlivňovat dynamické vlastnosti objektu ještě před samotnou realizací. Získané modely se dají mnohem lépe využít než je tomu u modelů získaných metodami experimentální identifikace.

Analytický způsob vyžaduje důkladné znalosti matematické a teoretické konkrétního oboru. Přesnost modelu je závislá na možnosti popsat pouze děje probíhající v daném systému.

1.4.5 Experimentální identifikace

U experimentální identifikace předpokládáme existenci zkoumaného objektu. Matematický model se určuje na základě rozboru experimentálně obdržených vstupních a výstupních údajů. Tento model vyjadřuje vnější chování systém (tzv. black box), tzn. bez možnosti zkoumání vnitřních vlastností.

Postup identifikace bývá vyjádření závislosti výstupního signálu na signálu vstupním ve tvaru diferenciálních rovnic nebo přenosu, následně se provede odhad parametrů tj. koeficientů rovnic. Postup vyjádření závislosti výstupního signálu na vstupním a odhad parametrů vychází ze znalosti přechodových charakteristik, jejichž funkce je znázorněna na obr. 1.8 (Navrátil, 2011).



Obr. 1.8 – Přechodová charakteristika soustavy 1. řádu

Diferenciální rovnice soustavy 1. řádu

$$Ty'(t) + y(t) = Zu(t), \quad (1.3)$$

kde T je časová konstanta, s,

Z – zesílení soustavy.

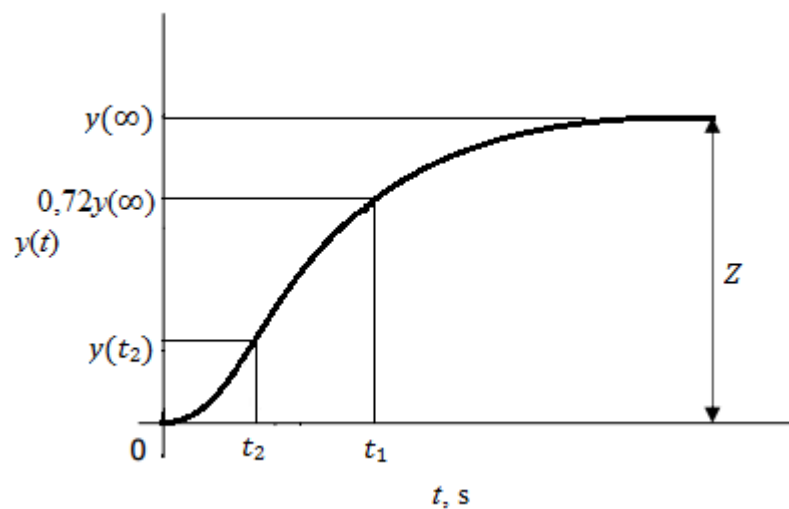
Přenos soustavy 1. řádu je ve tvaru

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Z}{Ts + 1}. \quad (1.4)$$

Zesílení Z se určí ze vztahu

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u(t)}. \quad (1.5)$$

Na obr. 1.9 je znázorněn odhad parametrů soustavy vyšších řádů.



Obr. 1.9 – Přejchodová charakteristika soustav vyšších řádů

Parametry přenosu

$$G(s) = \frac{Z}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (1.6)$$

se určí podle Strejcovy metody, tak že se nejprve odečte časový okamžik t_1 a vypočte součet časových konstant T_1 a T_2 podle vztahu

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564}. \quad (1.7)$$

Následně se vypočte časový okamžik t_2

$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2), \quad (1.8)$$

pro který se z grafu odečte hodnota $y(t_2)$. V tab. 1.1 jsou uvedeny poměry časových konstant, kde

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.9)$$

Ze známého součtu a poměru časových konstant lze vypočítat časové konstanty T_1 a T_2 .

Tab. 1.1 – Určení poměru časových konstant

$y(t_2)$	τ_2	$y(t_2)$	τ_2
0,3	0	0,22	0,183
0,29	0,023	0,21	0,219
0,28	0,043	0,2	0,264
0,27	0,063	0,19	0,322
0,26	0,084	0,18	0,403
0,25	0,105	0,17	0,538
0,24	0,128	0,16	1
0,23	0,154		

1.5 SIMULACE

Principem simulace systémů je nahrazení původního systému simulačním modelem a zpětná aplikace poznatků na původní systém. Bez následku pro simulovaný systém, jeho okolí apod. umožňuje popsat a předpovídat chování různých systémů a procesů.

Hlavní fáze simulace:

- vymezení systému na zkoumaném objektu, určení matematického popisu systému – identifikace,
- sestavení modelu – modelování,
- verifikace – simulace,
- experimenty s modelem – simulace,
- aplikace výsledků experimentů na zkoumaný objekt.

Rozvoj výpočetní techniky rozšířil možnost řešitelnosti matematických modelů. Technická realizace matematického modelu na počítači se nazývá počítačový model (Jančíková, 2012).

1.6 REGULÁTOR

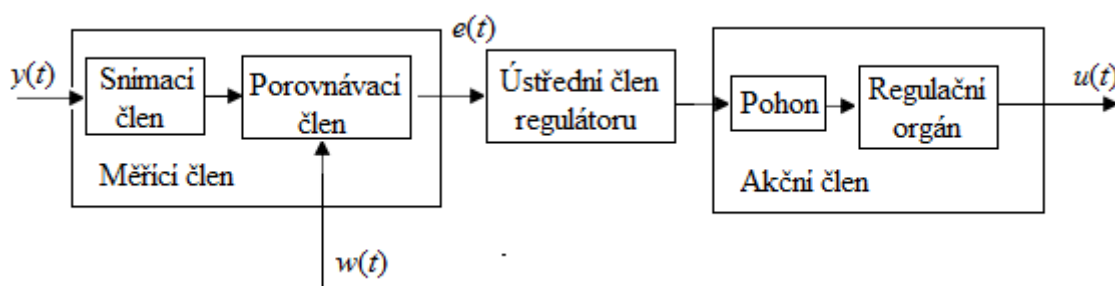
Regulátor je zařízení, které se snaží regulovat vstupní veličinu na požadovanou hodnotu. Principem je vyhodnocení regulační odchylky $e(t)$. Na tomto základě je vyvolán akční zásah, který se snaží regulační odchylku $e(t)$ snížit nebo zcela odstranit. Regulační odchylka $e(t)$ je dána vztahem

$$e(t) = w(t) - y(t), \quad (1.10)$$

kde $e(t)$ je regulační odchylka,
 $w(t)$ – žádaná hodnota,
 $y(t)$ – výstupní hodnota.

Regulátory se dělí na spojité a nespojité podle průběhu výstupní veličiny. Spojité regulátory mají všechny veličiny spojité v čase. Příkladem může být P regulátor, I regulátor atd. V nespojitém regulátoru je některý člen pracující nespojitě. Příkladem mohou být dvoupolohové regulátory.

Z hlediska přívodu energie se regulátory dělí na přímé a nepřímé. Nepřímé regulátory vyžadují vnější přívod energie. Tento druh regulátorů je nejpoužívanější.

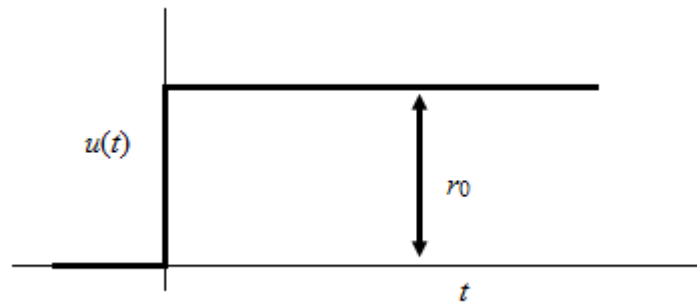


Obr. 1.10 – Blokové schéma nepřímého regulátoru

Porovnáním skutečné hodnoty $y(t)$ a žádané hodnoty $w(t)$ v měřícím členu se zjišťuje regulační odchylka $e(t)$. Ústřední člen podle použití regulátoru (P, PI, PD, PID, apod.) vypočítává akční zásah. Akční člen přenáší výstupní signál z regulátoru do regulované soustavy.

1.6.1 P složka regulátor

Nevýhodou proporcionalní složky je, že trpí trvalou regulační odchylkou e_0 , a tak nedokáže regulovat na požadovanou hodnotu. S rostoucím zesílením r_0 se tato odchylka zmenšuje, nicméně při velkých hodnotách r_0 se může soustava rozkmitat.



Obr. 1.11 – Přejchodová charakteristika P regulátoru

Proporcionalní regulátor vypočítává akční zásah na základě vztahu

$$u = r_0 \cdot e, \quad (1.11)$$

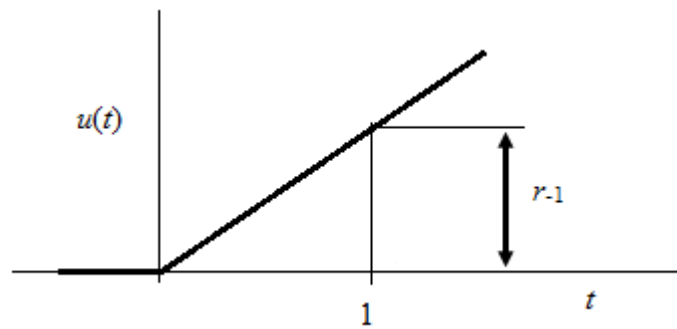
kde r_0 – zesílení P-regulátoru (Balátě, 2003).

1.6.2 I složka regulátor

Integrační složka regulátoru odstraňuje trvalou regulační odchylku e_0 . Nevýhodou může být, že při špatném nastavení se může soustava rozkmitat navíc je pomalý. Akční zásah je vypočítáván podle vztahu

$$u = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1.12)$$

kde r_{-1} – integrační časová konstanta (Balátě, 2003).



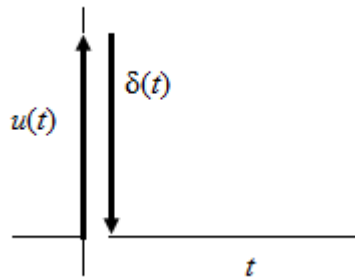
Obr. 1.12 – Přejchodová charakteristika I regulátoru

1.6.3 D složka regulátor

Derivační složka regulátoru urychluje regulaci. Nevýhodou je, že zesiluje šumy, a musí být v kombinaci s jinými složkami regulátoru. Akční zásah počítá podle vztahu

$$u = r_1 \frac{de}{dt}, \quad (1.13)$$

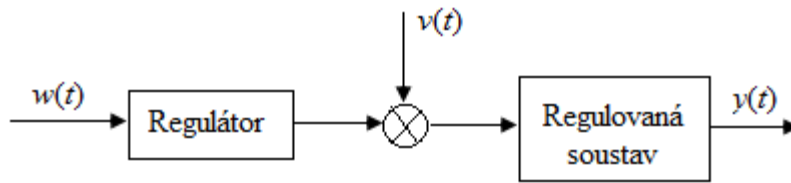
kde r_1 – derivační časová konstanta (Balátě, 2003).



Obr. 1.13 – Přejchodová charakteristika ideálního D regulátoru

1.7 REGULAČNÍ OBVOD

Regulační obvod vzniká připojením regulátoru k regulované soustavě. Vstupní signál regulátoru je žádaná hodnota regulované veličiny $w(t)$. Výstupní veličinou je regulovaná veličina $y(t)$. Na obvod působí poruchové veličiny $v(t)$, které se objevují na vstupu regulátoru nebo se přidávají v průběhu procesu.



Obr. 1.14 – Otevřený regulační obvod

Regulace probíhá na principu zpětné vazby, kdy na základě regulované veličiny vzniká regulační odchylka $e(t)$, která je dána vztahem

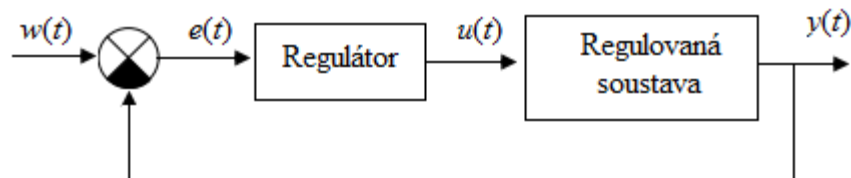
$$e(t) = w(t) - y(t), \quad (1.14)$$

kde $e(t)$ je regulační odchylka,

$w(t)$ – žádaná hodnota,

$y(t)$ – výstupní hodnota.

a působí na vstup regulátoru. Regulátor se snaží pomocí akční veličiny $u(t)$ zmenšovat, v ideálním případě úplně odstranit regulační odchylku $e(t)$ (Balátě, 2003).



Obr. 1.15 – Uzavřený regulační obvod

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 POPIS SOUSTAVY GUNT RT 010

Soustava RT 010 je od německé firmy GUNT a je určena technickým školám se zaměřením na automatizaci.



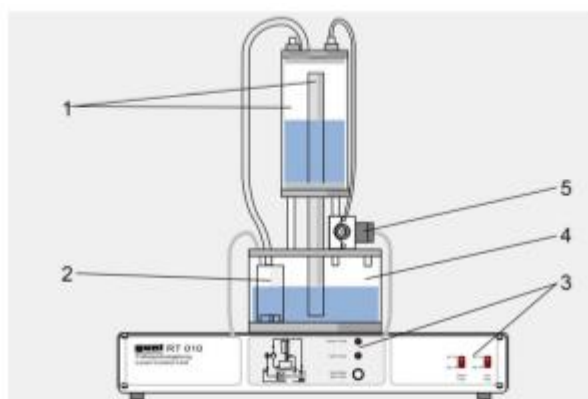
Obr. 2.1 – GUNT RT 010

Soustava obsahuje dvě nádrže. První nádrž slouží jako zásobník vody, druhá je regulovaná a obsahuje měřítko výšky hladiny. Společně jsou propojeny přes čerpadlo, ventil a přepadovou trubici, která slouží jako pojistka před přetečením.

Čerpadlo přečerpává vodu ze zásobníku do regulované nádrže, čímž zastává funkci akčního členu. Čerpadlo je ponorné a je napájeno vstupním napětím u_c v rozmezí 0 V do 5 V. Omezením je, že v rozsahu 0 V do 1,7 V nestačí k překonání převýšení do regulované nádrže.

Druhým prvkem je ventil, který může sloužit jako další akční člen nebo pro simulaci poruchy. Ventil je ovládán napájecím napětím u_v od 0 V do 5 V a jeho otevření značně ovlivňuje vlastnosti celé soustavy.

Posledním prvkem je hydrostatický senzor tlaku, umístěný vně nádrže. Tento tlak je převáděn na výstupní napětí y od 0 V do 2,8 V. Tímto senzorem se tak měří veličina, jež je považována za výstupní. Detailnější rozložení prvků soustavy je znázorněno no obr. 2.2.



- 1 – regulovaná nádrž s pojistkou proti přetečení
- 2 – čerpadlo
- 3 – kontrolky
- 4 – zásobník vody
- 5 – ventil

Obr. 2.2 – Schéma systému

V tab. 2.1 jsou uvedeny základní parametry prvků systému

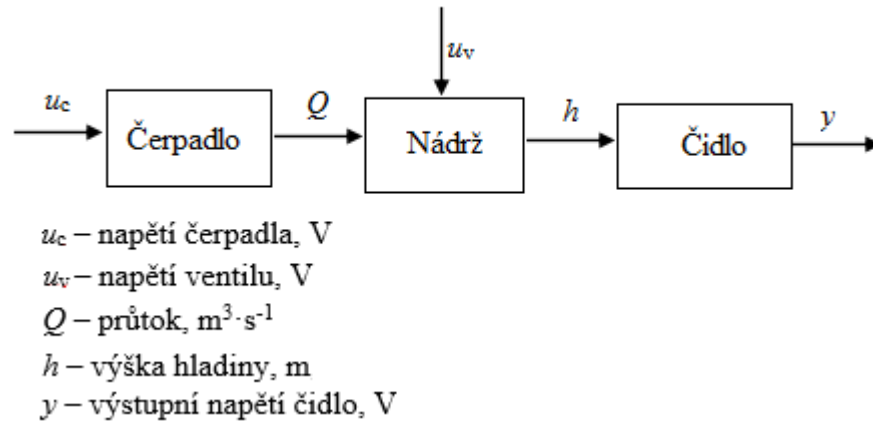
Tab. 2.1 – Parametry prvků systému

Prvky systému	Parametry prvků
měrná nádrž	objem 1,2 l
měrná nádrž	ø 10 cm
zásobník vody	objem 3,7 l
čerpadlo	maximální průtok 8 l·min ⁻¹
tlačové čidlo	měření v rozsahu 0 – 30 mbar
ventil	maximální průtok 11,66 l·min ⁻¹
přepadová trubice	ø 2 cm

Komunikace systému GUNT RT 010 s výpočetním softwarem MATLAB/Simulink v PC probíhá přes USB rozhraní.

2.2 MODEL SOUSTAVY

Mým cílem bylo vytvořit model pomocí analytické metody. Tato metoda umožňuje matematický popis pomocí fyzikálních zákonů a vyjadřuje vnitřní popis. Nejprve jsem určil vazby mezi prvky systému, které budou modelovány. Na obr. 2.3 jsou tyto vazby znázorněny.



Obr. 2.3 – Vazby mezi prvky systému

2.2.1 Identifikace parametrů čerpadla

Při identifikaci čerpadla bylo nutné zjistit objemový průtok, který se mění v závislosti na vstupním napětí čerpadla u_c . Objemový průtok je dán vztahem

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.1)$$

kde Q je průtok, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 V – objem, m^3 ,
 t – čas, s.

Objem nádrže je

$$V = \pi \cdot r_n^2 \cdot h, \quad (2.2)$$

kde r_n je poloměr nádrže,
 h – výška hladiny.

Po dosazení vztahu (2.2) do (2.1) je konečný vztah pro průtok čerpadla

$$Q = \frac{\pi \cdot r_n^2 \cdot h}{t}. \quad (2.3)$$

Měřil jsem čas, za který hladina vzroste o výšku h . V tab. 2.2 lze najít výsledky tohoto měření.

Tab. 2.2 – Výsledky měření času

u_c , V	h , m	t , s
1,9	0,05	30
2	0,05	18
2,5	0,10	17
3	0,10	12,2
4	0,10	8,7

Výsledný průtok pro vstupní napětí čerpadla u_c 1,9 V je možné dopočítat podle vztahu (2.3)

$$Q = \frac{\pi \cdot r_n^2 \cdot h}{t} = \frac{3,14 \cdot 0,05^2 \cdot 0,05}{30} = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}. \quad (2.4)$$

V tab. 2.3 jsou dopočítané průtoky pro jednotlivá měřená vstupní napětí čerpadla u_c .

Tab. 2.3 – Průtoky pro jednotlivá napětí

u_c , V	Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1,9	$1,31 \cdot 10^{-5}$
2	$2,18 \cdot 10^{-5}$
2,5	$4,62 \cdot 10^{-5}$
3	$6,43 \cdot 10^{-5}$
4	$9,10 \cdot 10^{-5}$

Průtoky z tab. 2.3 jsem aproximoval pomocí Metody nejmenších čtverců. Při této metodě jsou naměřená data prokládána předem zvolenou funkcí a jsou hledány takové parametry, aby byla shoda dat a funkce co nejlepší. Pro aproximaci průtoku jsem použil následující funkci

$$Q_c = a(u_c - u_0)^b, \quad (2.5)$$

kde a je konstantní reálný koeficient,
 b - konstantní reálný koeficient,
 u_c - vstupní napětí čerpadla, V,
 u_0 - minimální napětí čerpadla, V.

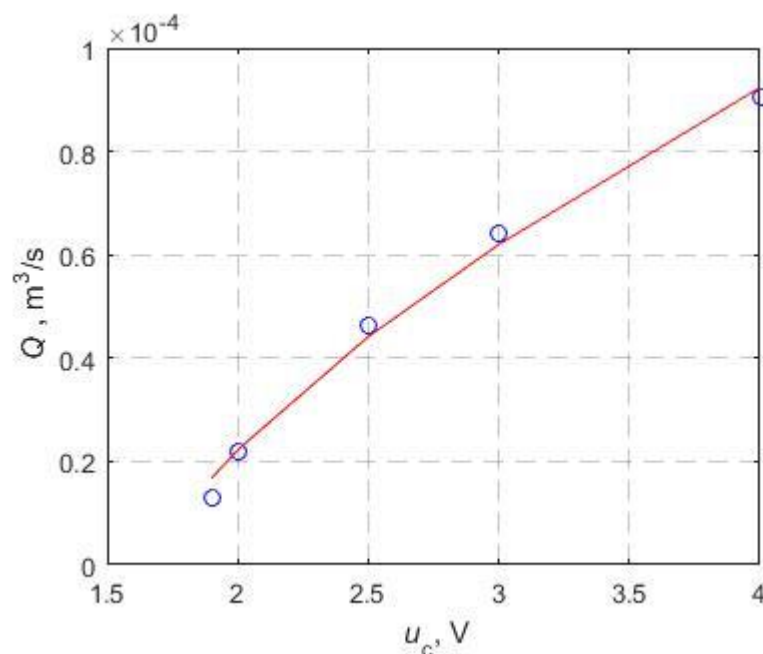
Koeficienty a a b

$$a = 5,16 \cdot 10^{-5},$$

$$b = 0,6981,$$

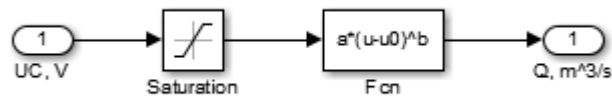
byly dohledány pomocí funkce *fminsearch()*, v softwarovém výpočetním prostředí MATLAB. Na obr. 2.4 lze vidět naměřené průtoky a jejich aproximaci.

Ze vztahu (2.5) vychází model čerpadla, který je vytvořen v prostředí Simulink, a je ukázán na obr. 2.5.



Obr. 2.4 – Závislost průtoku Q na vstupním napětí čerpadla u_c

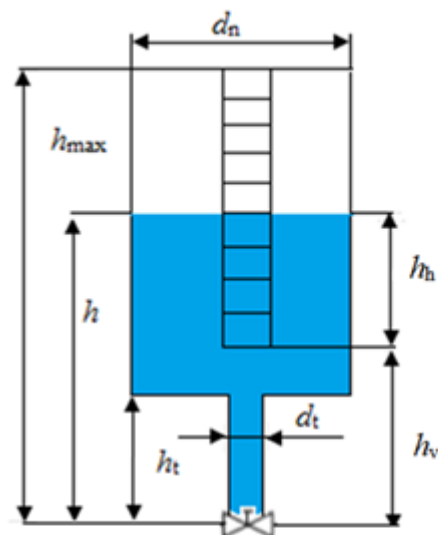
Blok Saturation omezuje napětí, tzn. do funkce vstupuje pouze napětí v rozsahu od 0 V do 5 V.



Obr. 2.5 – Model čerpadla

2.2.2 Identifikace parametrů nádrže a ventilu

Identifikace parametrů nádrže a ventilu spolu úzce souvisí. Osa ventilu není umístěna v rovině dna nádrže, ale níž. V modelu je několik výšek hladin, které jsou popsány na obr. 2.6, kde jsou současně uvedeny průměry nádrže a těla ventilu.



- d_t – průměr těla ventilu, m,
- d_n – průměr nádrže, m,
- h – hladina kapaliny v systému, m
- h_{max} – maximální výška hladiny, m,
- h_n – hladina kapaliny na měřítku, m,
- h_v – výška od středu ventilu k měřítku, m,
- h_t – výška od středu ventilu k nádrži, m.

Obr. 2.6 – Parametry nádrže

Tyto parametry byly měřeny pomocí posuvného měřítka tzv. šupléry a jejich hodnoty lze vidět v tab. 2.4 a v tab. 2.5.

Tab. 2.4 – Hodnoty výšek

Výška	h , m
h_{\max}	0,274
h_v	0,084
h_t	0,079

Tab. 2.5 – Hodnoty průměrů

Průměr	d , m
d_t	0,02
d_n	0,10

Při popisu dějů v nádrži se vychází ze zákona zachování hmoty

$$M_{\text{in}} = M_{\text{out}} + \frac{dm}{dt}, \quad (2.6)$$

kde M_{in} je hmotnostní průtok kapaliny do systému přicházející, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,
 M_{out} – hmotnostní průtok kapaliny ze systému odcházející, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,
 m – hmotnost kapaliny v systému, kg .

Předpokladem je, že kapalina má konstantní hustotu.

$$\rho = \frac{m}{V} = \text{konst}. \quad (2.7)$$

Vztah mezi hmotnostním a objemovým průtokem je

$$M = \rho \cdot Q. \quad (2.8)$$

Lze tedy vztah (2.6) převést na objemový průtok a výsledná bilance systému je tedy

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} + \frac{dV}{dt}, \quad (2.9)$$

kde Q_{in} je objemový průtok kapaliny do systému přicházející, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 Q_{out} – objemový průtok kapaliny ze systému odcházející, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 V – objem kapaliny v systému, m^3 .

Objem válce je

$$V = S \cdot h, \quad (2.10)$$

kde S je obsah nádrže, m^2 ,

h – výška hladiny, m .

Vzhledem k tomu, že se v čase mění pouze výška hladiny h a obsah nádrže S zůstává konstantní lze psát

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} + S \frac{dh}{dt}. \quad (2.11)$$

Nyní lze vyjádřit změnu výšky hladiny

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{S}. \quad (2.12)$$

Průtok Q_{in} je dán průtokem čerpadla Q_c a průtok Q_{out} je dán průtokem Q_v , který v závislosti na otevření ventilu nádrž opouští. Výchozí vztah je

$$Q_v = f \cdot v, \quad (2.13)$$

kde Q_v je průtok ventilem, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

f – průtočná plocha ventilu, m^2 ,

v – rychlost vytékající kapaliny, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rychlost vytékající kapaliny je dána Torricelliho vzorcem

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}. \quad (2.14)$$

Průtočná plocha se počítá podle vztahu

$$f = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4}, \quad (2.15)$$

kde d_v je průměr ventilu.

Konečný vztah pro výpočet průtoku Q_v vznikne dosazením vztahu (2.14) a (2.15) do (2.13).

Výsledný vztah pro průtok Q_v je tedy ve tvaru

$$Q_v = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}. \quad (2.16)$$

Průtočná plocha je ovlivněna průměrem nádrže, který se mění v závislosti na vstupním napětí ventilu u_v , a bylo tedy nutné tuto závislost zjistit. Vyjádřil jsem si ze vzorce (2.16) vztah pro výpočet průměru

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}} \quad (2.17)$$

Následně jsem provedl měření pro různé vstupní napětí ventilu u_v , při kterém jsem využil toho, že s narůstající hladinou kapaliny v nádrži se zvyšuje průtok Q_v , tím dojde po nějaké době k vyrovnání průtoků Q_v a Q_c a tedy k ustálení hladiny.

Tab. 2.6 – Výsledky měření ustálených hladin

u_c , V	u_v , V	h , m
3	5	0,137
3	4	0,199
2,5	3	0,175
2	2	0,114
1,9	1	0,209

Na základě těchto naměřených dat jsem dopočítal průměry ventilu pro jednotlivá měřená napětí

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,43 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,137}}} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (2.18)$$

Tab. 2.7 ukazuje průměry otevření ventilu pro jednotlivá napětí.

Tab. 2.7 – Otevření ventilu pro napětí u_v

u_v , V	d_v , m
5	$7,1 \cdot 10^{-3}$
4	$6,4 \cdot 10^{-3}$
3	$5,6 \cdot 10^{-3}$
2	$4,3 \cdot 10^{-3}$
1	$2,9 \cdot 10^{-3}$

Poté jsem provedl aproximaci (znázorněna na obr. 2.7) funkcí

$$d_v = e \cdot u_v^f, \quad (2.19)$$

kde e - konstantní reálný koeficient,

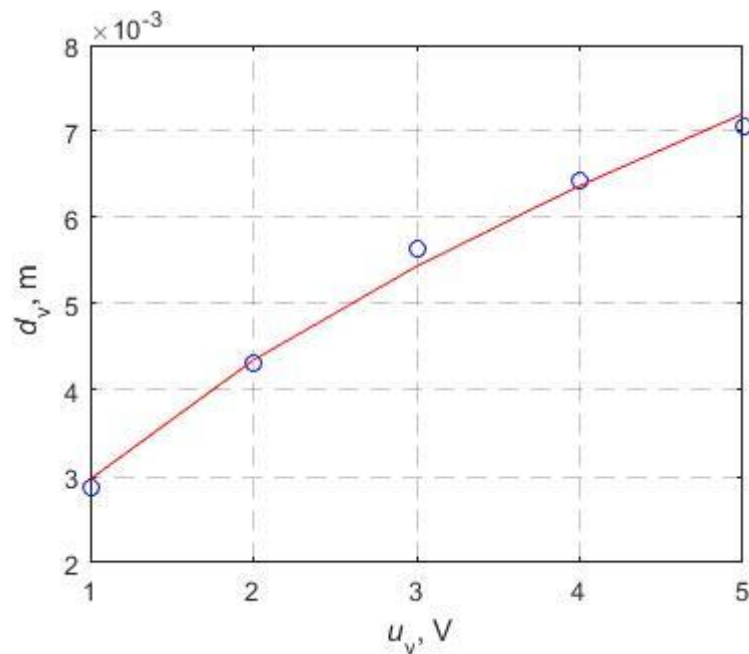
f - konstantní reálný koeficient.

Koeficienty e a f

$$e = 2,9 \cdot 10^{-3},$$

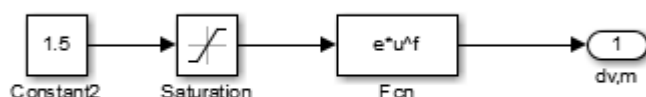
$$f = 0,5639,$$

jsem dohledal pomocí funkce *fminsearch()*, v softwarovém výpočetním prostředí MATLAB.



Obr. 2.7 – Závislost otevření ventilu na vstupním napětí ventilu

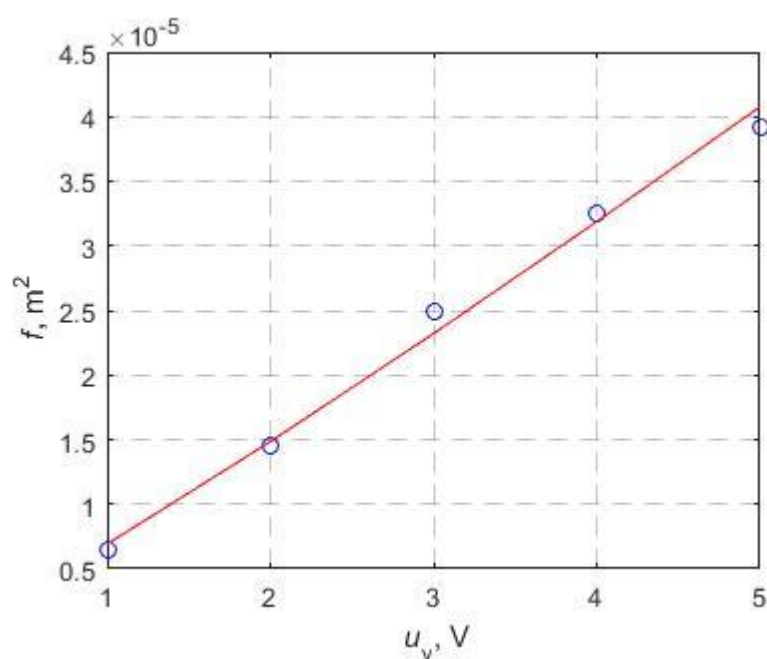
Model ventilu je znázorněn na obr. 2.8. Na vstup se zadává napětí u_v , a podle vztahu (2.19) se dopočítávají průměry ventilu pro toto napětí u_v .



Obr. 2.8 – Model ventilu

Blok Saturation omezuje vstupní napětí u_v na rozsah od 0 V do 5 V.

Pro výpočet průtočné plochy f se použije vztahu (2.15). Obr. 2.9 ukazuje závislost průtočné plochy f na vstupním napětí u_v .



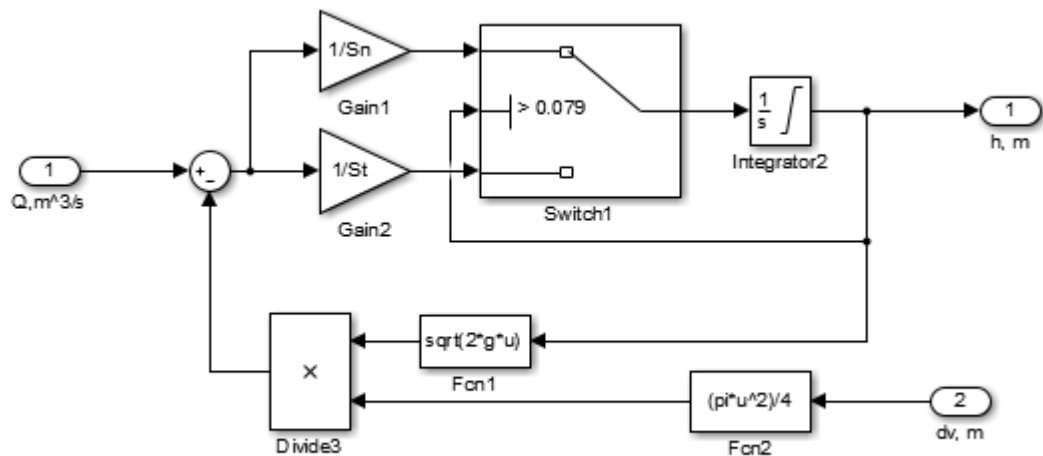
Obr. 2.9 – Závislost průtočné plochy f na vstupním napětí ventilu u_v

Tímto jsem určil průtok Q_v . Ze vztahu (2.11) plyne, že je ještě potřeba určit obsahy

$$S_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,10^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (2.20)$$

$$S_t = \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \quad (2.21)$$

Na obr. 2.10 je vidět, že tyto dva obsahy je nutné přepínat při dosažení hladiny $h_t = 0.079$ m. To je způsobeno tím, že osa ventilu je umístěna pod rovinou dna.



Obr. 2.10 – Model nádrže

2.2.3 Identifikace parametrů čidla tlaku

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1, systém obsahuje tlakové čidlo, které převádí hydrostatický tlak na výstupní napětí u_t . Měřil jsem tedy závislost výstupního napětí u_t na hladině h , z které se dá snadno určit výška hladiny na měřítku h_h podle vztahu

$$h_h = h - h_v. \quad (2.22)$$

Tab. 2.8 – Výsledky měření výstupního napětí u_t

h , m	u_t , V
0,104	0,6250
0,134	0,9814
0,154	1,2207
0,184	1,5967
0,214	1,9678
0,234	2,2119
0,264	2,5586

Naměřené hodnoty jsem aproximoval funkcí

$$u_t = k \cdot h + q, \quad (2.23)$$

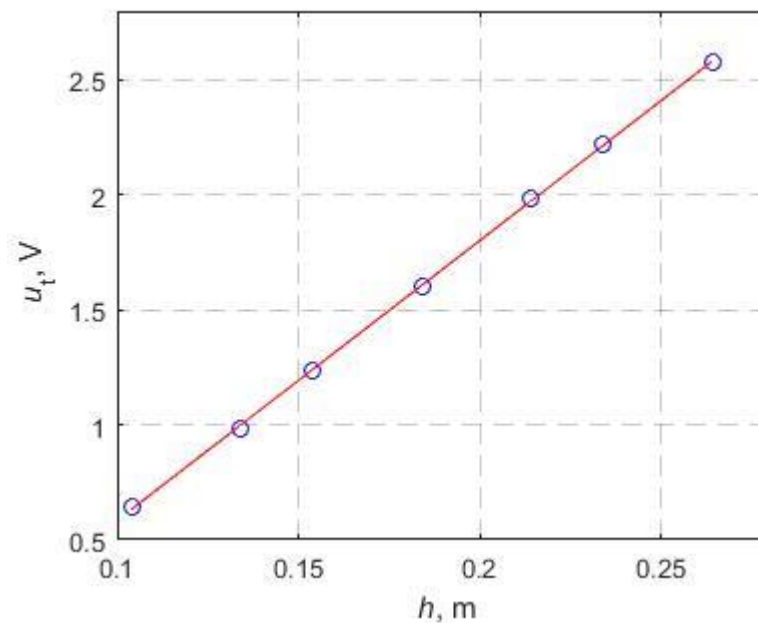
kde k – konstantní reálný koeficient,
 q – konstantní reálný koeficient.

Koeficienty k a q

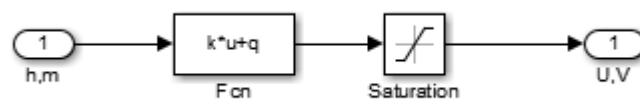
$$k = 12,175,$$

$$q = -0,6456,$$

jsem dohledal pomocí funkce *polyfit()* v MATLABu.



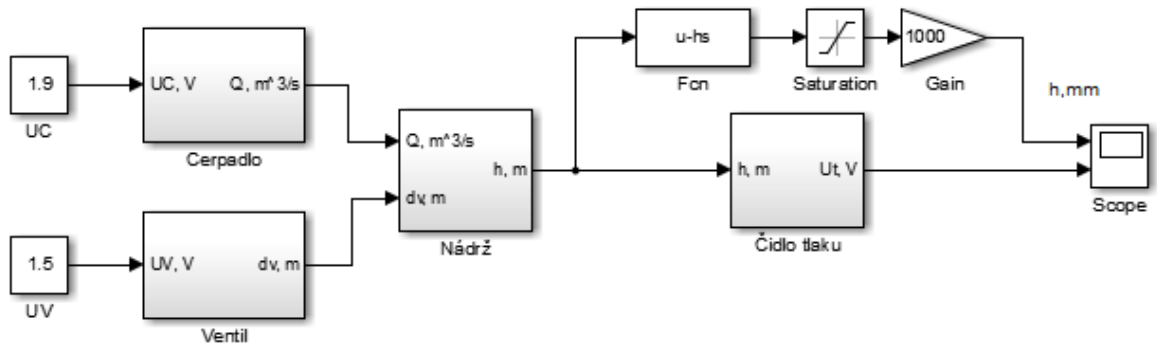
Obr. 2.11 – Závislost výstupního napětí u_t na hladině h



Obr. 2.12 – Model čidla tlaku

2.3 VERIFIKACE MODELU

Po vytvoření modelu, zobrazen na obr. 2.13, jsem musel ověřit, zda jsem v průběhu identifikace postupoval správně a výsledný model je tedy přesný. Provedl jsem tedy verifikaci modelu, kterou jsem provedl nejprve bez regulace a následně s regulací.



Obr. 2.13 – Model soustavy GUNT RT 010

2.3.1 Verifikace statických vlastností

Při verifikaci statických vlastností jsem zkoumal chování systému a modulu v ustáleném stavu tedy, kdy se vyrovnají průtoky Q_c a Q_v a výška hladiny h se již nebude měnit. Tuto výška hladiny h jsem odečetl a následně vyhodnotil chybu, o kterou se liší vlastnosti systému a modelu. Chybu jsem vyhodnocoval podle vztahu

$$\Delta = \frac{|h_s - h_m|}{h_{\max}} \cdot 100, \quad (2.24)$$

kde h_s – výška hladiny soustavy,

h_m – výška hladiny modelu,

h_{\max} – maximální výška hladiny.

Tab. 2.9 – Naměřené výšky hladin systému při vstupních napětích u_c a u_v

u_c , V	u_v , V	h_s , m
1,9	1,5	0,117
2,5	3,0	0,177
2,5	3,5	0,126
3,0	3,5	0,254
3,0	4,5	0,144

Tab. 2.10 – Vypočtené výšky hladin modelu při vstupních napětích u_c a u_v

u_c , V	u_v , V	h_m , m
1,9	1,5	0,122
2,5	3	0,189
2,5	3,5	0,131
3,0	3,5	0,259
3,0	4,5	0,149

Podle vztahu (2.24) jsem určil chybu modelu. Příklad výpočtu chyby určení výšky hladiny

$$\Delta = \frac{|h_s - h_m|}{h_{\max}} \cdot 100 = \frac{|0,117 - 0,122|}{0,274} \cdot 100 = 2,01\%, \quad (2.25)$$

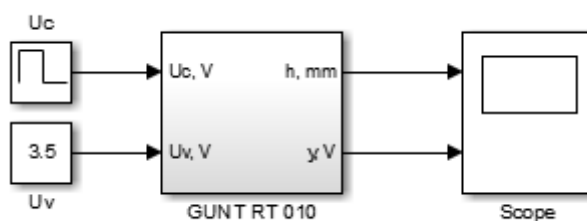
pro vstupní napětí čerpadla u_c 1,9 V a vstupní napětí ventilu u_v 1,5 V.

Tab. 2.11 – Chyby v určení výšky hladiny při vstupních napětích u_c a u_v

u_c , V	u_v , V	Δ , %
1,9	1,5	2,01
2,5	3,0	4,38
2,5	3,5	1,82
3,0	3,5	1,82
3,0	4,5	1,82

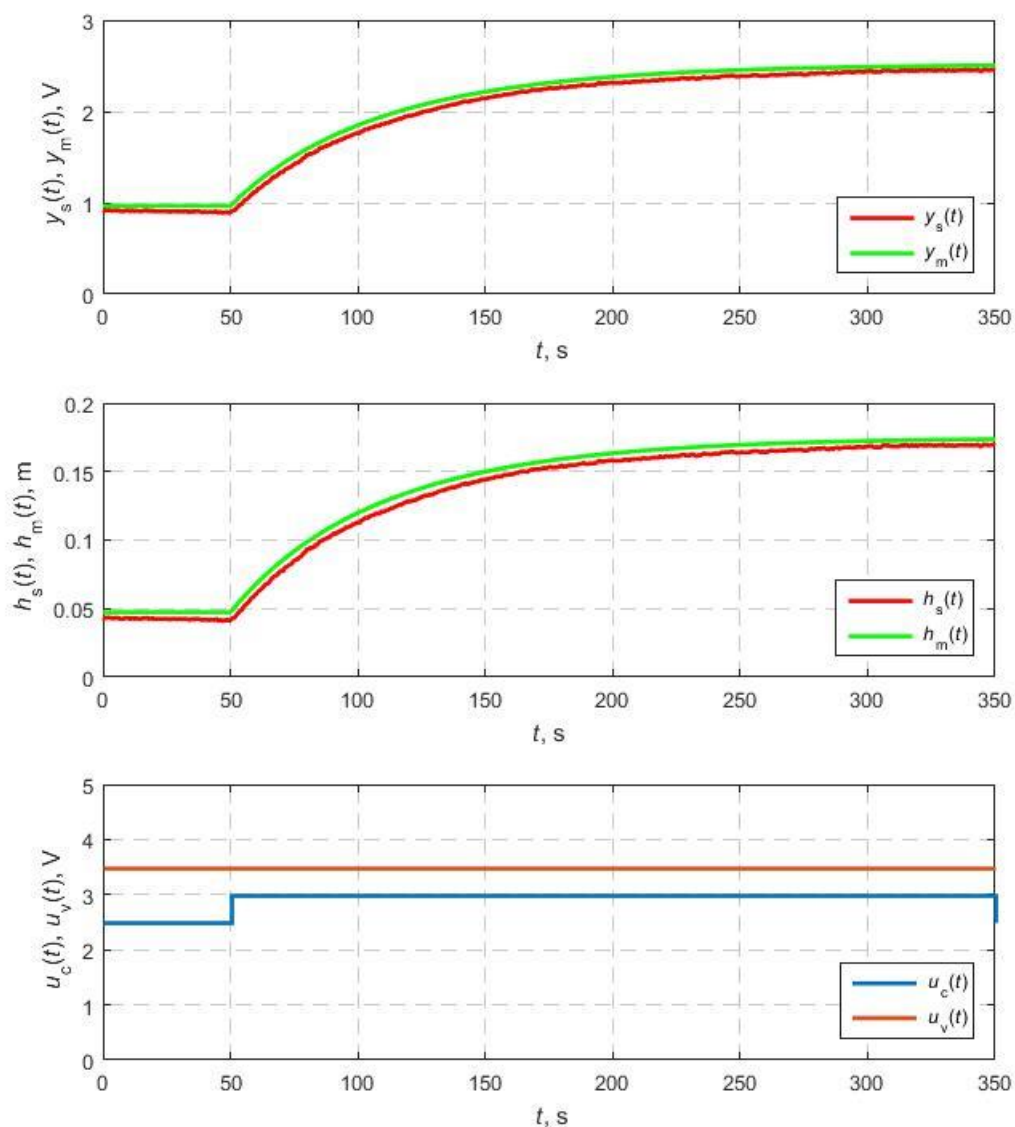
2.3.2 Verifikace dynamických vlastností soustavy

Při ověřování dynamických vlastností modelu jsem zkoumal chování při přechodu mezi ustálenými stavy.



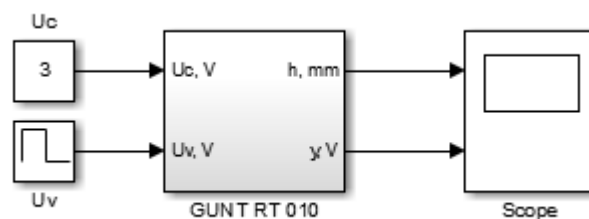
Obr. 2.14 – Simulace změny vstupního signálu u_c

Model i systém jsem vybudil stejným vstupním signálem a zaznamenával odezvu na tento signál. Nejprve jsem zaznamenával reakci na skokovou změnu napětí čerpadla u_c , přičemž napětí ventilu u_v zůstane konstantní 3,5 V. Měření jsem vyhodnocoval pomocí odezev, které jsou vidět na obr. 2.15.

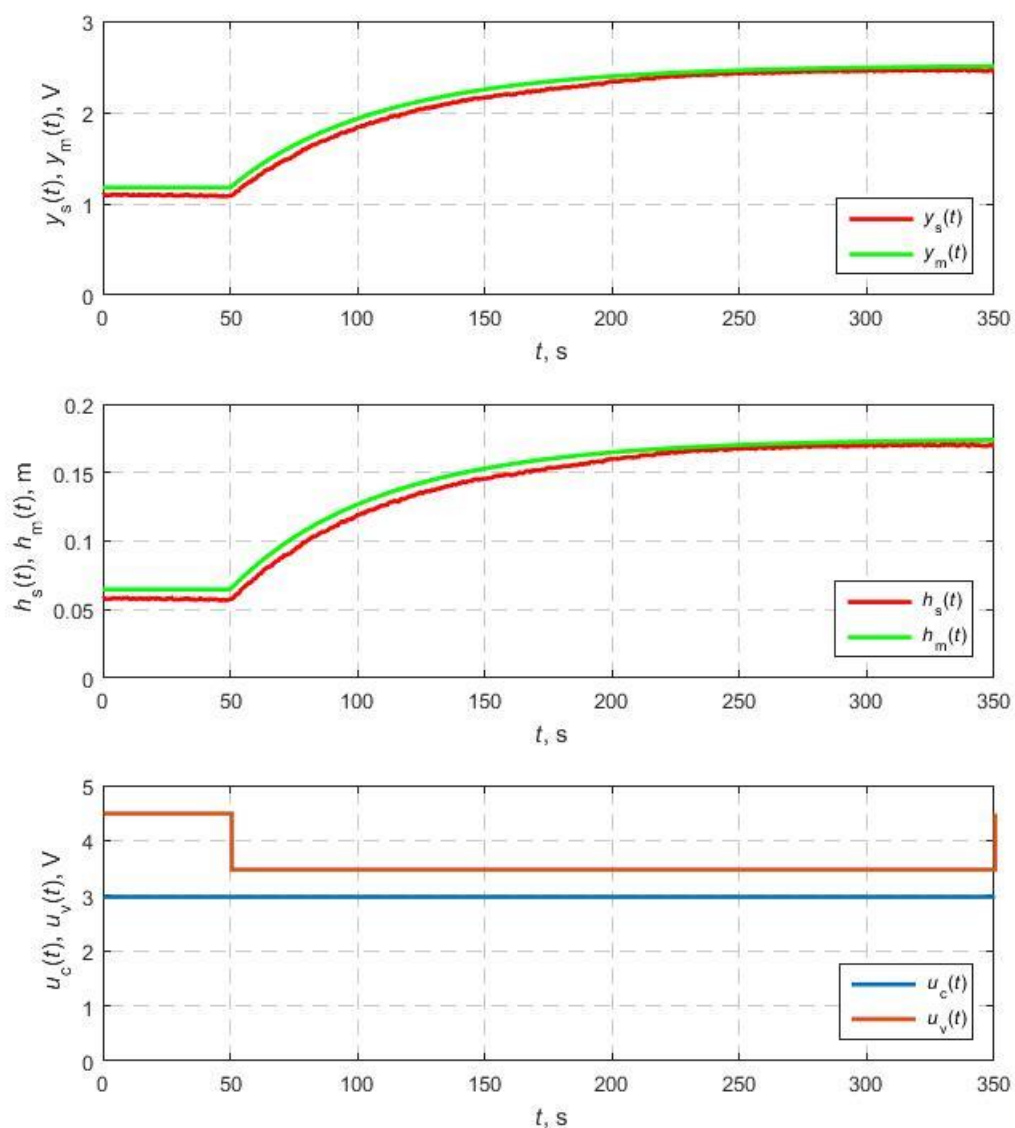


Obr. 2.15 – Vybuzení systému a modelu vstupním signálem u_c

V následujícím měření jsem naopak skokově změnil napětí u_v a u_c ponechal konstantní 3 V.

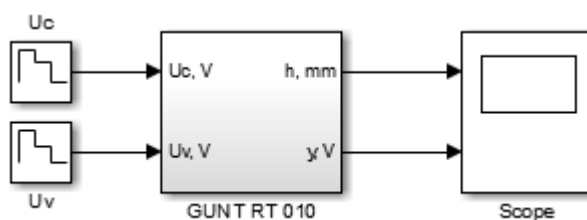


Obr. 2.16 – Simulace změny vstupního signálu u_v

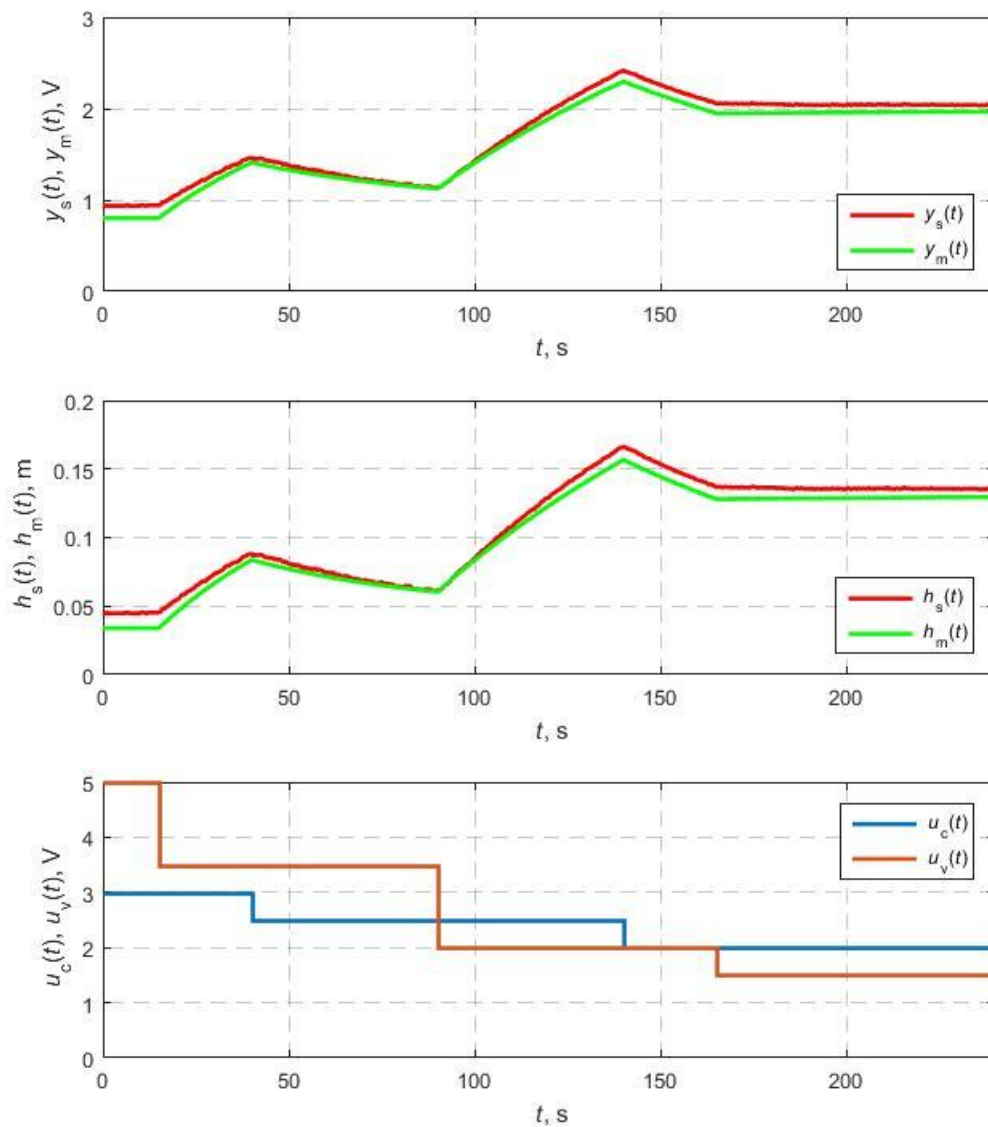


Obr. 2.17 – Vybuzení systému a modelu vstupním signálem u_v

V poslední řadě jsem otestoval shodu chování na skokové změny obou vstupů.



Obr. 2.18 – Simulace změny vstupních signálů u_c a u_v



Obr. 2.19 – Vybuzení systému a modelu vstupními signály u_c a u_v

Pro větší přehlednost jsem zaznamenanou odezvu systému u_t převedl na výšku hladiny na měřítku

$$h_s = \frac{u_t - q}{k} = \frac{u_t + 0,6456}{12,175}. \quad (2.26)$$

2.3.3 Verifikace dynamických vlastností v uzavřeném regulačním obvodu

Regulační obvod vzniká připojením regulátoru k regulované soustavě. Pro kvalitní regulaci je třeba správně nastavit parametry regulátoru. V důsledku použití PI regulátoru, jsem nastavoval pouze konstanty r_0 a T_i

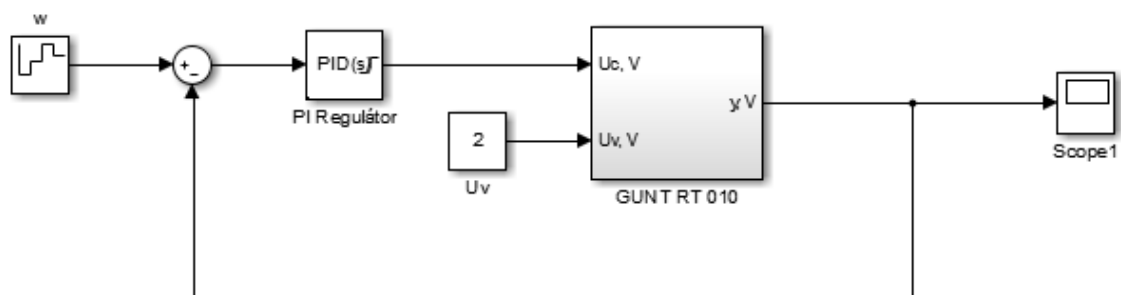
$$u(t) = r_0 \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right]. \quad (2.27)$$

Tyto konstanty regulátoru jsem určil experimentální metodou pokus-omyl a jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.12.

Tab. 2.12 – Nastavení regulátoru

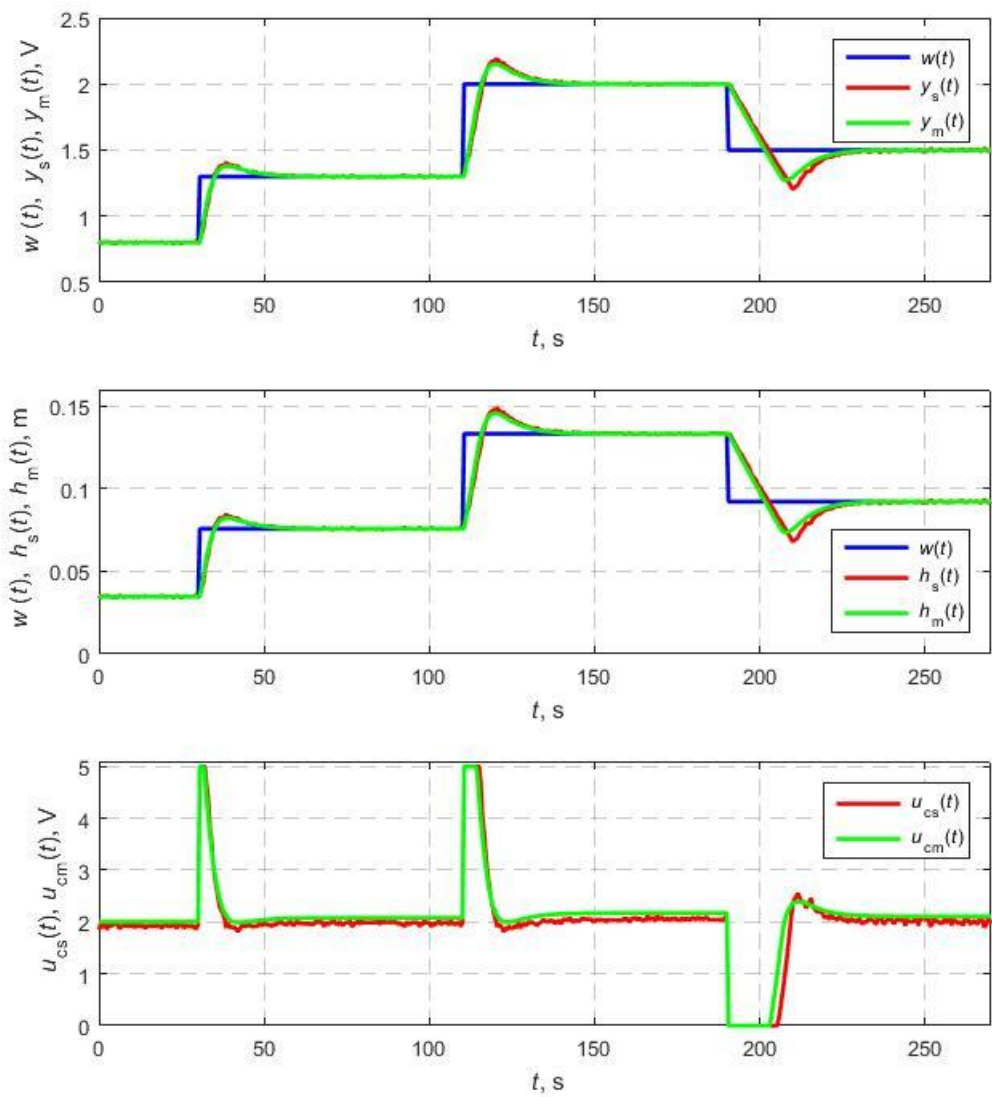
Konstanta	Hodnota
r_0	8
T_i	8

Pro simulaci jsem si vytvořil schéma, které je vidět na obr. 2.20



Obr. 2.20 – Uzavřený regulační obvod

Akční veličinu jsem zvolil napětí čerpadla u_c . Napětí ventilu u_v je po celou dobu simulace konstantní 2 V.



Obr. 2.21 – Průběh regulované a akční veličiny s PI regulátorem

3 ZÁVĚR

Cílem bylo vytvořit matematický model laboratorní soustavy GUNT RT 010 analytickou metodou, kde probíhající jevy v zařízení jsou popsány pomocí fyzikálních zákonů vycházejících ze zákona o zachování hmoty a energie. Analytická metoda vyjadřuje vnitřní popis soustavy.

Jako první jsem zjistil objemový průtok čerpadla v závislosti na jeho vstupním napětí. Měřil jsem čas, za jaký hladina vzroste o předem stanovenou výšku při konkrétním napětí. Z těchto výsledků jsem vypočítal objemový průtok a vhodnou funkcí aproximoval v softwarovém prostředí MATLAB.

Při identifikaci nádrže jsem nejprve sestavil hmotnostní bilanční rovnici. Při popisu množství kapaliny, která z nádrže vytéká, jsem použil Torricelliho rovnici. Průtok z nádrže je funkcí otevření ventilu, které se mění v závislosti na vstupním napětí ventilu. Tuto závislost jsem určil měřením ustálené hladiny při různých kombinacích vstupních napětí čerpadla a ventilu. Z výsledků měření jsem dopočítal otevření ventilu a získanou závislost opět aproximoval vhodnou funkcí.

Poté jsem musel identifikovat tlakové čidlo. Změřil jsem závislost výstupního napětí na hladině a provedl aproximaci.

Koeficienty funkcí byly nalezeny pomocí MATLABu a výsledný model jsem sestavil v simulačním prostředí Simulink.

Přesnost modelu byla zkoumána bez regulace a s regulací. Nejprve jsem porovnával statické vlastnosti. Měřil jsem výšku ustálené hladiny systému a modelu a jejich rozdílem jsem vyhodnocoval chybu určení výšky hladiny. Zaznamenáním dynamické odezvy systému na různé kombinace vstupních signálů jsem ověřoval dynamické vlastnosti modelu. Následně bylo provedeno měření v uzavřeném regulačním obvodu. Po porovnání reálných a simulovaných průběhů je z grafů vidět, že model je poměrně přesný. Nepřesnosti jsou způsobené nedokonalou aproximací průtoků a chování ventilu. Na výslednou dynamiku modelu má nádrž rozhodující vliv, a proto jsem čerpadlo a čidlo uvažoval bez dynamických vlastností.

POUŽITÁ LITERATURA

- BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-730-0020-2.
- VROŽINA, M; JANČIKOVA, Z a DAVID, J. 2012. *Identifikace systémů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2594-6.
- NAVRÁTIL, P. 2011. *Automatizace - Vybrané statě* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně., [cit. 2017-02-26]. ISBN 978-80-7318-935-8.
- MACALÍK, R. *IDENTIFIKACE REGULOVANÉ SOUSTAVY: EXPERIMENTÁLNÍ JEDNOTKA PRO SPALOVÁNÍ BIOMASY* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10676. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Máša.
- JANČÍKOVÁ, Z. *Teorie systémů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2017-02-17]. ISBN 978-80-248-2561-8. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TS/Teorie%20systemu.pdf>
- GUNT HAMBURG. 2005. *RT 010: Training system: Level control, HSI*. [online]. Hamburk: GUNT Hamburk. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: http://www.gunt.de/static/s3411_1.php?p1=&p2=&pN=.
- Řízení technologických procesů: Úvod*. 2011. [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://rtp.webzdarma.cz/pojmy.php>

SEZNAM PŘÍLOH

A - CD

Příloha k bakalářské práci

VYTVOŘENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU SOUSTAVY GUNT RT 010

Tomáš Brtek

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce
- 2 Skripty a mdl soubory k bakalářské práci