

Statická a dynamická analýza laboratorního modelu průtočného směšovače

Static and dynamic analyses of continuous mixer laboratory model

Bc. Rudolf Mikerásek

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Rudolf MIKERÁSEK**

Osobní číslo: **A10482**

Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Statická a dynamická analýza laboratorního modelu průtočného směšovače**

Zásady pro vypracování:

- 1. Seznamte se a popište laboratorní model Armfield PCT40/41/42.**
- 2. V teoretické části se zaměřte na metody modelování a simulace technologických procesů.**
- 3. Provedte a vyhodnoťte statické analýzy pro různé vstupní veličiny.**
- 4. Provedte a vyhodnoťte dynamické analýzy pro různé skoky vstupních veličin.**
- 5. Z dosažených výsledků popište systém z hlediska řízení a navrhnete vhodný řídicí postup.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. FAUSETT, L. V. **Numerical Methods: Algorithms and Applications**. Prentice Hall; 2002, ISBN 0130314005.
2. BOHÁČ, Z., ČASTOVÁ, N.: **Základní numerické metody**. Skriptum VŠB-TUO, Ostrava 1997. ISBN 80-7078-975-1.
3. INGHAM, J., DUNN, I. J., HEINZLE, E., PŘENOSIL, J. E.: **Chemical Engineering Dynamics. An Introduction to Modeling and Computer Simulation**. Second, Completely Revised Edition, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 2000. ISBN 9783527307593.
4. LUYBEN, W.L.: **Process modelling, simulation and control for chemical engineers**. McGraw-Hill, New York, 1989. ISBN 0-07-039159-9.
5. CORRIOU, J.-P. **Process control. Theory and applications**. Springer-Verlag , London. 2004. ISBN 978-1-85233-776-6

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D.

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s laboratorním zařízením Armfield PCT 40/41/42 a provedení statické a dynamické analýzy průtočného reaktoru. V první části byly ve stručnosti popsány dynamické systémy a metody modelování a simulace dynamických systémů. Dále byla práce zaměřena na popis jednotlivých částí zařízení Armfield PCT 40/41/42. Ve druhé části se nachází naměřené statické a dynamické charakteristiky a návrh řídicí a identifikační metody.

Klíčová slova: Modelování, simulace, dynamické systémy, průtočný reaktor, statická analýza, dynamická analýza

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis was to introduce to laboratory device Armfield PCT 40/41/42 and perform static and dynamic analysis of the CSTR. In the first part of the thesis were briefly described the dynamic systems and methods for modelling and simulation of dynamic systems. A report was also concerned to description individual parts of the device Armfield PCT 40/41/42. Next part consists static and dynamic characteristics and design of control and identification methods.

Keywords: modelling, simulation, dynamic systems, CSTR, steady-state analysis, dynamic analysis

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Vojtěškovi, Ph.D. za pomoc při vzniku této práce, cenné rady, odborné vedení, trpělivost a čas, který mě a mé práci věnoval.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/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 diplomovou/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 – diplomovou/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 diplomové/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 diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 METODY VYUŽÍVANÉ PRO MODELOVÁNÍ	12
1.1 MODELOVÁNÍ.....	12
1.2 METODY MODELOVÁNÍ	13
2 METODY SIMULACE SYSTÉMŮ	17
2.1 SIMULACE	17
2.2 METODY SIMULACE.....	17
3 POPIS DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ	19
3.1 POPIS SYSTÉMU DIFERENCIÁLNÍ ROVNICÍ	20
3.2 PŘENOS SYSTÉMU.....	20
3.3 PŘECHODOVÁ FUNKCE A PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU.....	21
3.4 IMPULZOVÁ FUNKCE A IMPULZOVÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU	21
3.5 KMITOČTOVÝ PŘENOS	22
3.6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V KOMPLEXNÍ ROVINĚ	22
3.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V LOGARITMICKÝCH SOUŘADNICÍCH	24
4 POPIS LABORATORNÍHO MODELU PCT40/41/42	26
4.1 PCT 40.....	27
4.1.1 Osazení podstavce	27
4.1.2 Peristaltická čerpadla A & B.....	28
4.1.3 Propojovací hadičky	30
4.2 PCT 41	30
4.2.1 Spirála tepelného přenosu	31
4.2.2 Míchadlo a tepelné usměrňovače	32
4.2.3 Volitelné měřicí sondy	33
4.2.4 Vstupy zkoumaných kapalin	33
4.2.5 Vstup a výstup topné / chladicí spirály	34
4.2.6 Přepad.....	34
4.2.7 Odtok.....	35
4.3 PCT 42.....	36
4.4 SOFTWARE PCT 40	36
5 POPIS REAKTORU Z HLEDISKA MODELOVÁNÍ A SIMULACE	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
6 POPIS MĚŘENÍ	42
7 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA	44
7.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	44
7.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	45
8 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA	46
8.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	46
8.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	49
9 NÁVRH METODY ŘÍZENÍ	50

9.1	NÁVRH ŘÍDÍCÍ METODY	50
9.2	NÁVRH IDENTIFIKAČNÍ METODY	51
ZÁVĚR		57
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....		58
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		60
SEZNAM OBRÁZKŮ		63
SEZNAM TABULEK.....		65
SEZNAM PŘÍLOH.....		66
PŘÍLOHA PI: PROGRAM „VYHODNOT_NOVE.M“		67

ÚVOD

Dnešní doba si činí stále větší nároky na výkonnější a sofistikovanější zařízení, která kopírují moderní trendy vývoje a jsou schopna flexibilně plnit měnící se požadavky zadavatelů. To klade stále větší požadavky na spolehlivost a přesnost řízení. Při výuce budoucích odborníků zabývajících se řízením a regulací je nutné pro úspěšné uplatnění v praxi zajistit možnost si taková zařízení vyzkoušet. To ovšem bývá velmi problematické. Jednak jsou tato zařízení většinou velmi drahá a nevhodná na pokusy začátečníků, u mnohých pak ani nelze v reálném prostředí nasimulovat veškeré možnosti a zvláště pak extrémní a mezní situace.

Proto se neoddelitelnou součástí dnešních průmyslových, výrobních, technologických, přírodních a mnoha dalších odvětví stává modelování a simulace výrobních procesů. To umožňuje současným i budoucím odborníkům zkoumat procesy i v případech, kdy by byl takový experiment v reálu velmi nebezpečný nebo fyzicky nerealizovatelný. Vzniklé modely rovněž umožňují zkoumat i velmi složitá zařízení jak z hlediska chování, tak z hlediska řízení a regulace.

Tato práce se zabývá popisem laboratorního modelu PCT 40 od firmy Armfield a zejména statickou a dynamickou analýzou jeho přídatného modulu PCT 41 představující model průtočného směšovače. Na základě výsledků statické a dynamické analýzy je předložen návrh řízení systému a identifikační metody.

Úvod teoretické části práce je věnován pojmem modelování a simulace. V krátkosti je vyložena definice jednotlivých pojmu a jejich úloha v oblasti návrhů a řízení moderních technických zařízení. Kapitola se rovněž věnuje základním rozdělením podle různých hledisek a stručným seznámením s jednotlivými postupy a metodami modelování a simulace. Zmíněn je i software, který je nezbytnou součástí simulací. Dále se teoretická část zabývá jednotlivými způsoby popisu dynamických systémů, jako je diferenciální rovnice, přenos, přechodová funkce a podobně. Nezbytnou součástí teoretické části je i popis laboratorního modelu průtočného směšovače, jehož analýza je předmětem této diplomové práce. V jednotlivých podkapitolách jsou postupně popsány jednotlivé součásti přístroje, včetně obrázků a krátké charakteristiky.

Praktická část diplomové práce je věnována samotnému měření a vyhodnocení získaných dat. V první části je proveden popis přípravy měření a popis samotného měření. Další kapitola popisuje provedení a vyhodnocení statické analýzy pro různé vstupní veličiny.

Obsahuje jednak postup měření, tabulku naměřených dat a výsledné charakteristiky znázorněné v grafu. Zakončena je vyhodnocením těchto výsledků. V další kapitole je provedena a vyhodnocena dynamická analýza pro různé skoky vstupních veličin. Obsahuje rovněž postup měření, zobrazení výsledků měření pomocí grafů a vyhodnocení dynamické analýzy. V závěru praktické části je provedena identifikace systému jednorázovou metodou nejmenších čtverců, popis systému z hlediska řízení a navržen vhodný řídicí postup.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 METODY VYUŽÍVANÉ PRO MODELOVÁNÍ

1.1 Modelování

Modelování umožňuje poznávat zkoumané objekty a jejich vlastnosti. Dnes již představuje nedílnou součást návrhů nových technických zařízení, složitých systémů nebo inovativních postupů, či zkoumání složitých procesů bez nutnosti použít reálný objekt a tím vyloučit možnost rizika poškození zařízení, nehody nebo havárie. Tyto skutečnosti se promítly do konečných nákladů, což má značný vliv na rozvoj různých technických i netechnických oborů. V souvislosti s rozvojem a dostupností výpočetní techniky postupně dochází ke značnému rozšíření používání modelování a simulace.

Podstatou modelování je proces, kdy ke zkoumanému reálnému objektu, který v tomto případě představuje originál, přiřadíme pomocí určitých zvolených kritérií fyzický nebo abstraktní model. O fyzickém modelu hovoříme tehdy, pokud je vytvořen podle originálu na základě geometrické podobnosti tak, že si zachová tvarovou podobnost. Příkladem může být model letadla, raketoplánu, automobilu nebo lodi. Z takto vytvořeným modelem lze provádět mnohé experimenty, zkoušky a měření pomocí dějů stejné fyzikální podstaty a zkoumat tak vlastnosti originálu. [1]

Vedle fyzického modelu lze rovněž vytvořit model abstraktní, neboli matematický, vytvořený pomocí matematického popisu dějů, které probíhají na originálním objektu. Pomocí matematického modelu je možno sledovat průběhy fyzikálních veličin, které jsou předmětem zkoumání. Aby bylo možno získat informace, které jsou nutné pro vyhodnocení zkoumaného děje, je potřeba nejprve vyřešit matematický model zpravidla pomocí numerických metod řešení diferenciálních rovnic. Následně je pomocí vhodného simulačního programu vytvořen tzv. simulační model, ve kterém lze měnit parametry, analyzovat odezvy systému a tím získávat poznatky o chování a vlastnostech zkoumaného systému.

V souvislosti s modelováním, respektive s jeho různými způsoby rozlišujeme dva pojmy:

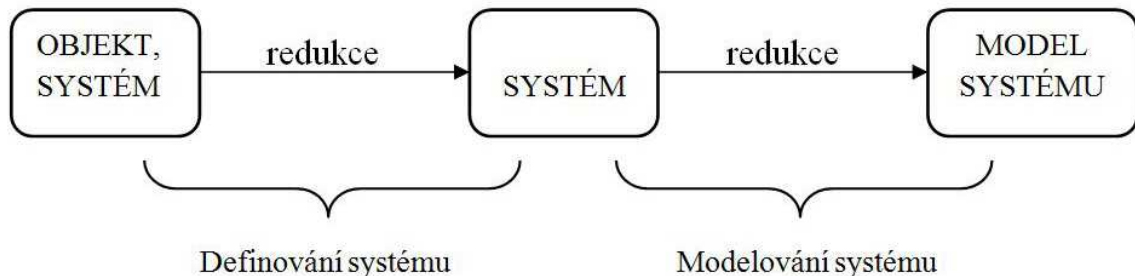
- podobnost,
- analogie.

Podobnost je chápána jako jednoznačné vzájemné přiřazení různých systémů v jejich struktuře, vlastnostech a chování. Podobnost může být fyzikální, matematická nebo kybernetická. *Fyzikální podobnost* systémů a procesů stejné podstaty zahrnuje nejen

geometrickou podobnost, ale rovněž podobnost parametrů a stavových veličin. Podobnost mezi systémy a procesy, které mají stejný matematický popis, vyjadřuje *matematická podobnost*. Pokud systémy vykazují matematickou podobnost ve vnějším chování, potom se jedná o *kybernetickou podobnost*. V tomto případě je na systém pohlíženo jako na černou skříňku. Jsou známy pouze informace o vnějším chování, vnitřní struktura ani vnitřní proměnné nejsou známy. V případě částečných informací o vnitřním uspořádání systému hovoříme o šedé skříňce. Při úplných znalostech struktury systému se jedná o bílou skříňku. [2]

Pokud vykazují systémy a procesy matematickou podobnost, ale jsou fyzikálně odlišné, potom hovoříme o analogii.

Při modelování je nutno přistupovat k určité redukci některých méně důležitých vlastností reálného objektu, jak ukazuje obrázek (Obr. 1). Model nikdy přesně neodráží realitu, je pouze její abstrakcí. Výsledný model bývá kompromisem mezi snahou co nejvíce zjednodušit výpočty při zachování důležitých vlastností a mezi snahou přiblížit chování modelu co nejvíce reálnému systému.



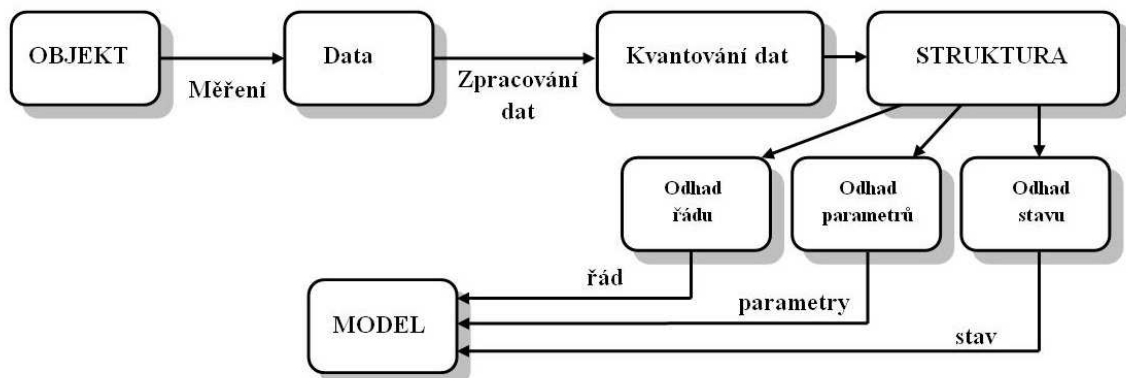
Obr. 1: Postup modelování systému [6]

1.2 Metody modelování

Z hlediska modelování, jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, rozlišujeme, zda je naším cílem vytvořit model *reálný*, čili zmenšenou kopii zkoumaného objektu, nebo chceme vytvořit model matematický neboli *abstraktní*.

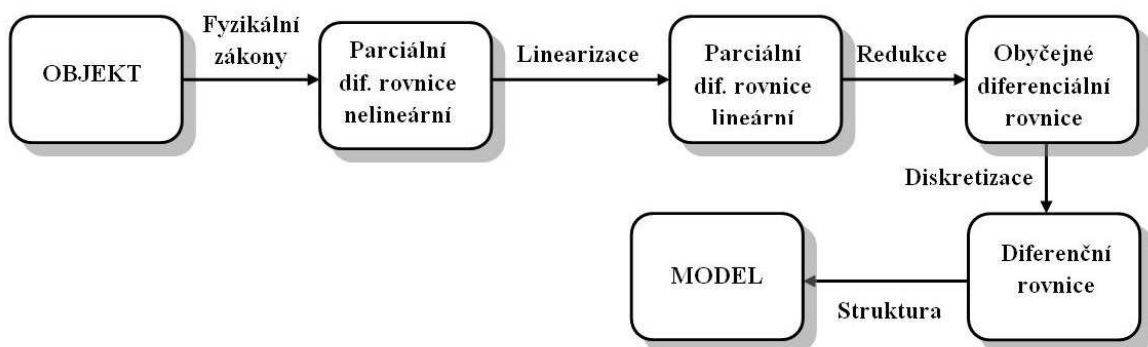
Modelovat je možno *experimentálním* nebo *analytickým* způsobem. Experimentální metoda (Obr. 2) vychází z výsledků získaných experimentováním s daným objektem. Matematický model je získán rozborem průběhů vstupních a výstupních veličin. Nevýhodou této metody je, že popisuje pouze vstupně-výstupní chování zkoumaného objektu, aniž by dávala jakékoliv informace o vnitřní struktuře systému. Nelze tedy zjistit

závislost mezi chováním objektu a jeho konstrukčními parametry. V případě experimentální metody se předpokládá, že zkoumané veličiny jsou měřitelné.



Obr. 2: Experimentální způsob modelování [3]

Analytický způsob modelování (Obr. 3) je prováděn na základě matematicko-fyzikální analýzy zkoumaného objektu. Tato metoda popisuje vztahy mezi stavovými proměnnými a na základě těchto vztahů je určen matematický model. Při popisu vlastností a vztahů uvnitř systému je důležité pamatovat na určení modelu, jeho využití a na cíl modelování. Podle těchto parametrů je nutné zvolit hloubku analýzy. Výsledný model by měl být vzhledem k následným výpočtům co možná nejjednodušší, ale zároveň musí být pro dané použití co nejpřesnější.



Obr. 3: Analytický způsob modelování [3]

Sestavování každého modelu začíná určením cílů a požadavků a dále formálním popisem systému. Tento krok je důležitý zejména z toho důvodu, že následné použití a využití modelu má vliv na rozhodnutí, zda při sestavování tohoto modelu bude brán větší zřetel na přesnost a věrnost vůči originálu za cenu větší složitosti nebo na jednoduchost, ale s většími odchylkami od originálu. Dalším krokem je shromažďování všech dostupných informací o systému, což obvykle vyžaduje odborné znalosti chování systému, znalosti

dané problematiky oboru, do kterého systém náleží, znalosti struktury systému, popřípadě jiné odborné předpoklady. Následnou fází je sestavení obecných závislostí mezi jednotlivými veličinami zkoumaného systému a konečného sestavení matematického modelu.

Důležitou součástí při sestavování matematického modelu jsou bilanční rovnice. V chemickém průtočném reaktoru probíhá řada složitých dějů a reakcí. Na výsledek celého procesu má vliv mnoho faktorů, které většinou znamenají i změnu vlastností reaktoru. Navíc je třeba si uvědomit, že podmínky v reálném reaktoru při reálném procesu nejsou nikdy ideální. Všechny tyto okolnosti mají značný vliv na složitost případných výpočtů. Cílem je však vytvoření co nejjednoduššího matematického modelu. Proto je nutno zavést tzv. zjednodušující předpoklady, které sníží složitost matematického modelu, ovšem zachovají všechny důležité vztahy. Těmito zjednodušujícími předpoklady v případě chemického reaktoru může být například:

- dokonalé promíchávání reakční směsi a chladiwa,
- zanedbání tepelné kapacity stěn,
- zanedbání přestupu tepla do okolí,
- objemy, hustoty a měrná tepla složek jsou konstantní. [4]

Bilanční rovnice v ustáleném stavu obecně znázorňuje rovnost mezi tím, co do systému vstupuje a tím, co ze systému vystupuje. Jelikož u dynamických systémů probíhají časové změny proměnných, je nutné do bilančních rovnic zahrnout i tyto časově závislé změny v podobě akumulace. Slovně lze bilanční rovnici vyjádřit například takto (Obr. 4):

$$\boxed{\text{Suma přítoků}} + \boxed{\text{Suma zdrojů}} - \boxed{\text{Suma odtoků}} - \boxed{\text{Suma zániků}} = \boxed{\text{Časová změna akumulace}}$$

Obr. 4: Bilanční rovnice [4]

Tuto rovnici je možno obecně aplikovat na tok určité formy hmoty zkoumaným objektem, přičemž pojmy *zdroj* a *zánik* chápeme jako transformaci jedné formy na druhou. [3]

Dosažením sledovaných veličin do obecných bilančních rovnic získáme matematický model v podobě obyčejných diferenciálních rovnic (ODR). Odtud lze dále postupně odvodit model ustáleného stavu, popřípadě odchylkový model a linearizovaný model.

Významnou roli pro vytváření modelů hraje maticová algebra. Matic je využíváno k popisu struktury systému a interakci mezi jednotlivými prvky systému.

Spojité nelineární dynamický systém je popsán dvěma rovnicemi.[5]

stavovou

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)] \quad (1)$$

a výstupní

$$y(t) = g[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)], \quad (2)$$

kde $\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ je vektor stavových veličin; délka vektoru je n ,

$\mathbf{u}^T = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ je vektor vstupních veličin; délka vektoru je m ,

$\mathbf{y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ je vektor výstupních veličin+ délka vektoru je r ,

a $\mathbf{f}^T = (f_1, f_2, \dots, f_n)$, $\mathbf{g}^T = (g_1, g_2, \dots, g_r)$ jsou nelineární vektorové funkce.

Počátečními podmínka je $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^s$

U nelineárního systému je potřeba znát počáteční podmínky. Ty je nutno vypočítat z modelu ustáleného stavu anulováním derivace.

Experimentální metody doznaly velkého rozvoje s příchodem výpočetní techniky. K nejčastěji využívaným patří vyhodnocování přechodových a impulsních charakteristik. Ke zkoumání stochastických objektů slouží metody, které využívají odezvy na náhodné a pseudonáhodné signály.

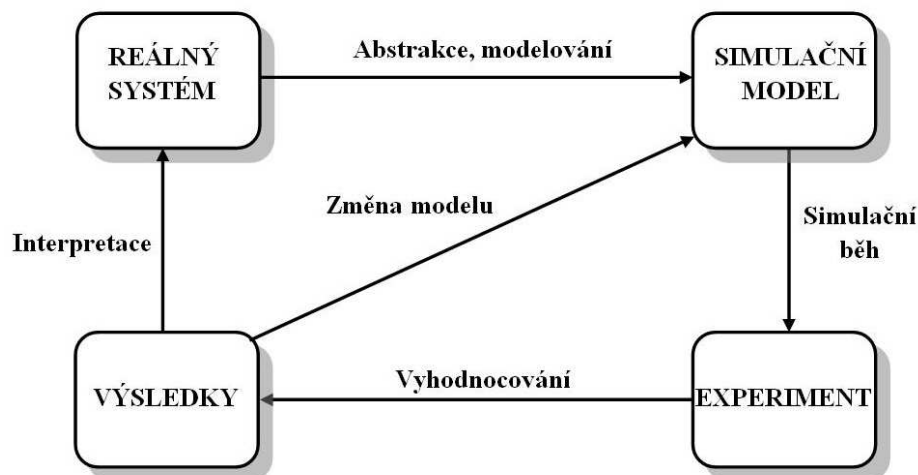
Modely mají nejčastěji podobu diferenciální rovnice, diferenční rovnice, frekvenční charakteristiky nebo impulsní charakteristiky.

2 METODY SIMULACE SYSTÉMŮ

2.1 Simulace

Pojem simulace se užívá v souvislosti s modelováním dynamických systémů s přímou nebo nepřímou zpětnou vazbou na zkoumaný objekt. Používá se tedy při modelování dynamických procesů a systémů. Podstatou simulace (Obr. 5) je ověření správné funkce modelu a jeho realizace, analýza získaných výsledků a jejich následné využití. Simulace je výhodná zejména v případech, kdy reálný systém není fyzicky dostupný nebo je daný experiment na reálném systému nebezpečný nebo technicky neproveditelný. S rozvojem výpočetní techniky vznikla řada simulačních programů, které umožňují provádět řadu experimentů s použitím kritických hodnot a zjišťovat tak chování systémů nebo procesů v mezních situacích. Všeobecné výhody počítačové simulace lze shrnout následovně:

- řízení a optimální nastavení reálného procesu bez nutnosti jeho narušení,
- možnost diagnostikovat případné problémy,
- možnost pochopení vztahů mezi charakteristikami reálného systému,
- možnost zrychlení nebo zpomalení chování probíhajících jevů a tím urychlit výzkum. [11]



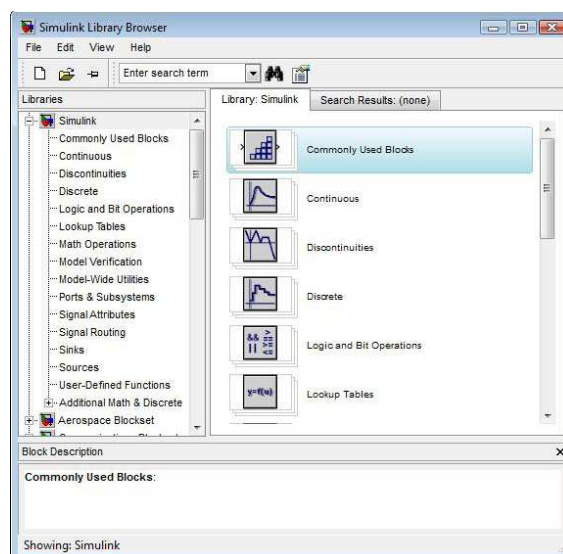
Obr. 5: Princip simulace [11]

2.2 Metody simulace

Pro simulaci dynamických systémů, které reprezentuje soustava diferenciálních rovnic, existuje celá řada numerických metod. Metody lze rozdělit podle mnoha kritérií do

různých tříd s různou efektivitou z hlediska přesnosti a numerické náročnosti. Nejjednodušším představitelem tzv. jednokrokových metod je *Eulerova metoda*, která je však v praxi obvykle nepoužitelná, protože nový stav odpovídá skutečnosti pouze při konstantní rychlosti systému. Při zrychlení (zakřivení trajektorie) přejdeme při použití Eulerovy metody na jinou blízkou trajektorii. Oblíbenou je numerická metoda *Runge-Kutta*. Vychází z Taylorova rozvoje a bere do úvahy i členy vyšších řádů. Jednou ze speciálních metod je například metoda *Monte Carlo*, která patří mezi stochastické metody využívající pseudonáhodná čísla. V dnešním globálním dynamickém prostředí, které vyžaduje komplexní přístup k řešení výrobních systémů, již analytické metody často naráží na hranice svých možností. Proto se stále více uplatňuje počítačová simulace. Dnes již existuje celá řada simulačních programů ve kterých lze simulovat širokou škálu dynamických systémů. Jmenovat lze například Witness, LabView, Sipro, VisiDAQ, Advantech, 20sim, Simmechanics, MATLAB/Simulink aj. V této práci bude zmíněn pouze poslední jmenovaný.

Simulink je nadstavbou Matlabu určenou pro modelování a simulaci dynamických systémů, přičemž využívá algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních a diferenčních rovnic. Práce v Simulinku je celkem jednoduchá a intuitivní, neboť jednotlivé funkční bloky se pomocí počítačové myši přetahují z příslušné knihovny na pracovní plochu, kde je vytvářeno schéma požadovaného modelu. Předností Simulinku je otevřená architektura, která umožňuje uživateli vytvářet nové vlastní funkční bloky a tím ještě více obohatit a rozšířit rozsáhlou knihovnu Simulinku (Obr. 6).



Obr. 6: Bloková knihovna Simulinku

3 POPIS DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ

Systém chápeme v obecné rovině a zejména v automatizační technice jako soubor prvků, které mezi sebou vykazují určité vzájemné vztahy a jako celek pak tento systém vykazuje určité chování ke svému okolí.

Systémů existuje řada typů, které dělíme podle různých hledisek. Základní dělení systémů je na *lineární* a *nelineární* podle toho, zda jsou vztahy mezi proměnnými uvnitř systému popsány lineárními či nelineárními funkcemi. Systémy, jejichž veličiny jsou závislé pouze na čase a nezáleží na jejich poloze v prostoru, jsou se *soustředěnými parametry*, systémy jejichž veličiny jsou proměnné v čase i prostoru jsou s *rozloženými parametry*. Dále rozlišujeme systémy *spojité*, které jsou definovány na spojitém časovém intervalu a systémy *diskrétní*, které jsou definovány na množině diskrétních hodnot času. U *deterministických* systémů lze jejich chování určit na základě předešlých vstupů a stavů, zatímco na *stochastické* systémy působí náhodné děje a jejich výstup lze určit pouze s určitou pravděpodobností. *Jednorozměrové* systémy mají pouze jeden vstup a jeden výstup. *Mnoharozměrový* systém má více než jeden vstup a minimálně jeden výstup. *Stacionární*, neboli *t-invariantní* systémy mají parametry neměnné v čase, systémy *nestacionární*, neboli *t-variantní* mají parametry časově proměnné.

Dynamické vlastnosti systému určují jeho chování. Lze je popsat dvěma různými, navzájem odlišnými způsoby. Dynamické vlastnosti charakterizuje:

- vnější popis systému,
- vnitřní popis systému.

Při vnějším popisu systému jsou dynamické vlastnosti vyjádřeny pouze pomocí vztahu mezi výstupní a vstupní veličinou. Systém samotný je považován za tzv. černou skříňku (black box) se vstupem a výstupem. Obsah této skříňky, její konstrukce ani fyzikální realizace není důležitá. Systém je zkoumán pouze z hlediska reakcí výstupu na vstupní podněty. Fyzikální děje probíhající uvnitř skříňky nejsou známy a ani nejsou předmětem zájmu.

Vnitřní popis systému je spojen s pojmem stav systému. Vyjadřuje dynamické vlastnosti systému, uvažuje vztahy mezi vstupem, stavem a výstupem systému. Pro zavedení vnitřního popisu systému je nutné znát jeho strukturu a rovněž všechny fyzikální nebo

chemické pochody, které v něm probíhají. Vnitřní popis systému je mnohem dokonalejší než vnější popis. Je vyjádřen stavovými rovnicemi ve stavovém prostoru.

Vnější popis systému [6] může být vyjádřen různými způsoby:

- lineární diferenciální rovnice,
- přenos systému,
- přechodová funkce a přechodová charakteristika systému,
- impulzová funkce a impulzová charakteristika systému,
- kmitočtový přenos,
- frekvenční charakteristika v komplexní rovině,
- frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích.

Mezi těmito druhy popisu systému je těsná souvislost a je možno převádět jeden tvar na druhý.

3.1 Popis systému diferenciální rovnicí

Lineární spojité systém se vstupem $u(t)$ a výstupem $y(t)$ je obecně popsán diferenciální rovnicí:

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_0 u(t) \quad (3)$$

Kde a_j, b_j jsou konstantní koeficienty.

V rovnici (3) musí být splněna podmínka fyzikální realizovatelnosti, tzn., že stupeň nejvyšší derivace výstupní veličiny je vždy větší nebo roven stupni derivace vstupní veličiny. Řád diferenciální rovnice n udává řád systému. Při řešení je nutno znát tvar vstupního signálu a počáteční podmínky.

3.2 Přenos systému

Přenos systému je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny ku Laplaceově obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách systému a vstupního signálu. Výsledný přenos systému má tvar:

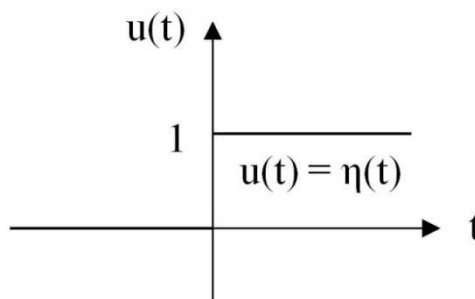
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

3.3 Přejchodová funkce a přechodová charakteristika systému

Přejchodová funkce $h(t)$ je odezvou na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách systému. Přejchodová charakteristika je grafické znázornění přechodové funkce.

Jednotkový – Heavisideův skok (obr. 7) je definován vztahem:

$$u(t) = \eta(t) = \begin{cases} 1 & \text{pro } t \geq 0, \\ 0 & \text{pro } t < 0. \end{cases} \quad (5)$$



Obr. 7: Jednotkový – Heavisideův skok

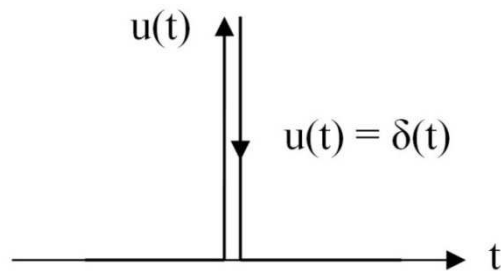
Následující způsoby popisu dynamických systémů nejsou v praktické části použity. Jejich umístění v této práci vychází pouze ze snahy o ucelený přehled způsobů popisu těchto systémů.

3.4 Impulzová funkce a impulzová charakteristika systému

Impulzová funkce $g(t)$, je odezvou na jednotkový impuls při nulových počátečních podmínkách systému. Impulzová charakteristika je grafickým znázorněním této funkce.

Jednotkový – Diracův impuls (obr. 8) je fyzikálně nerealizovatelná idealizovaná funkce. Jde o impuls s nekonečně velkou amplitudou, který trvá nekonečně krátkou dobu a jehož plocha je rovna 1. Je definována vztahem:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1; \quad \delta(t) = 0 \quad \text{pro } t \neq 0 \quad (6)$$



Obr. 8: Jednotkový – Diracův impuls

3.5 Kmitočtový přenos

Kmitočtový přenos $G(j\omega)$ je definován poměrem výstupních harmonických kmitů ke vstupním harmonickým kmitům systému. Na vstup systému je přiveden harmonický signál se sinusovým průběhem

$$u(t) = u_0 \sin \omega t \quad (7)$$

kde u_0 je konstantní amplituda

ω je úhlový kmitočet

Po určité době, potřebné k ustálení přechodových dějů, dostaneme na výstupu harmonický signál $y(t)$, který má stejnou frekvenci jako vstupní signál, ale jinou amplitudu a určité fázové posunutí φ .

$$y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

kde y_0 je amplituda výstupního signálu

φ je fázové posunutí

Kmitočtový přenos je potom vyjádřen takto:

$$G(j\omega) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{y_0 e^{j(\omega t + \varphi)}}{u_0 e^{j\omega t}} = \frac{y_0}{u_0} e^{j\varphi} \quad (9)$$

3.6 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině

Jedná se o grafické znázornění frekvenčního přenosu pro úhlovou rychlost, která se mění v intervalu od nuly do nekonečna (obr. 9). Při úhlové rychlosti rovné nule protíná

frekvenční charakteristika reálnou osu pod pravým úhlem, pro úhlovou rychlost blíží se nekonečnu se blíží k pevnému bodu na reálné ose. Frekvenční charakteristika může být vyjádřena ve *složkovém tvaru komplexního čísla*

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = \operatorname{Re} G(j\omega) + j \operatorname{Im} G(j\omega) \quad (10)$$

nebo v *exponenciálním tvaru komplexního čísla*

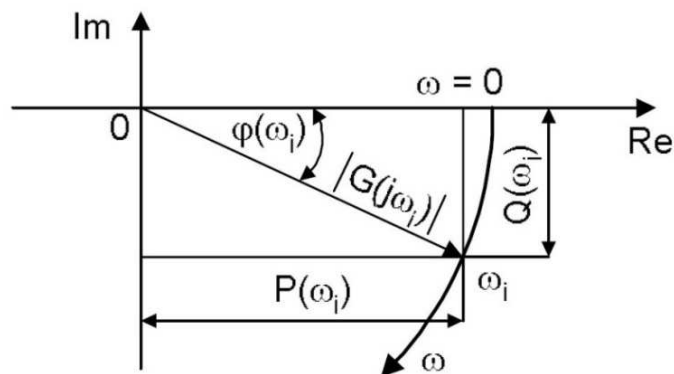
$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = |G(j\omega)|e^{j \arg G(j\omega)} \quad (11)$$

kde $A(\omega)$ je amplituda frekvenčního přenosu

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad (12)$$

$\varphi(\omega)$ je fáze frekvenčního přenosu

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \quad (13)$$



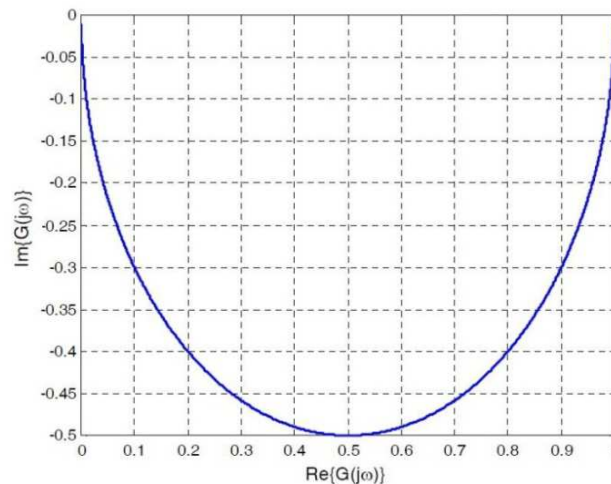
Obr. 9: Frekvenční přenos v komplexní rovině

Obrázek (Obr. 10) znázorňuje příklad frekvenční charakteristiky dynamického systému 1. řádu, popsaného diferenciální rovnicí:

$$y' + y = u, \quad (14)$$

jehož přenos je:

$$G(s) = \frac{1}{s + 1} \quad (15)$$



Obr. 10: Příklad frekvenční charakteristiky
v komplexní rovině [9]

3.7 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Tuto charakteristiku dostaneme logaritmováním frekvenčního přenosu. Její význam je ve zjednodušení výpočtu složených obvodů a jejich jednoduchém sestrojování.

Přenos je vyjádřen pomocí dvou charakteristik:

- amplitudová charakteristika znázorňuje závislost přenosu na decibelech a zobrazuje amplitudy,
- fázová charakteristika znázorňuje závislost fázového posunu na úhlové frekvenci.

Frekvenční charakteristiky se pro různé druhy systémů liší. Vzhledem k tomu, že frekvenční přenos ani jeho charakteristiky nejsou předmětem této práce, nebude zde rozebírán postup sestavování logaritmických frekvenčních charakteristik ani jejich výčet pro různé systémy. Pouze pro ilustraci je zde obecná ukázka logaritmické amplitudové a fázové charakteristiky pro dynamický systém 1. Řádu.

Obrazový přenos obecně pro systém 1. Řádu:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (16)$$

Frekvenční přenos je potom dán rovnicí:

$$G(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} \quad (17)$$

Z tohoto přenosu získáme výpočtem frekvenční charakteristiku v komplexní rovině:

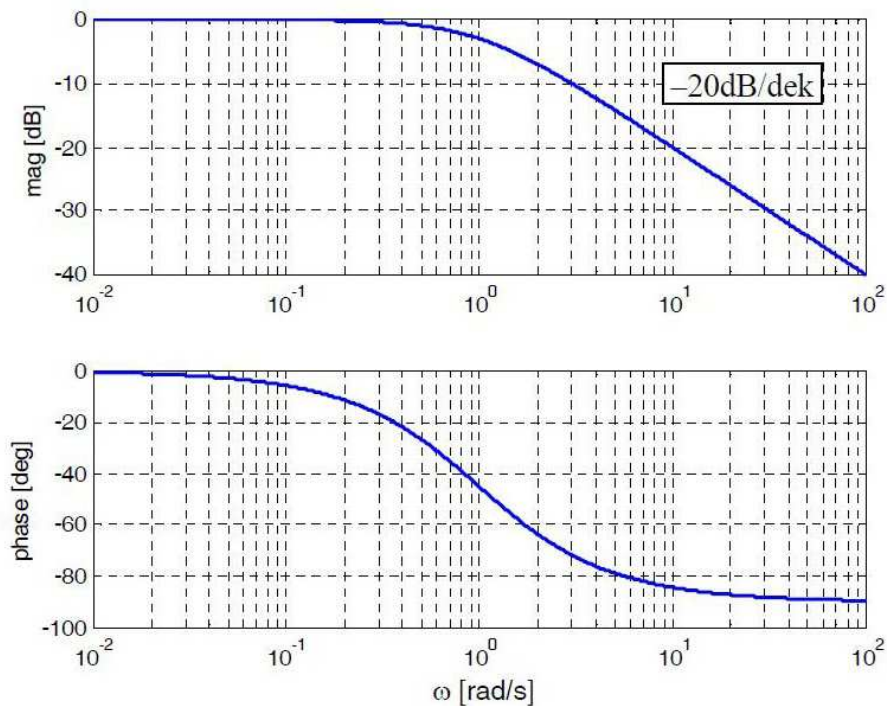
$$G(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} \frac{1 - j\omega T}{1 - j\omega T} = \frac{K}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{K\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \quad (18)$$

Logaritmická amplitudová a fázová charakteristika vypadá následovně:

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20 \log K - 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \quad (19)$$

$$\varphi(\omega) = \arg K - \arg(1 + j\omega T) = -\arg(\omega T) \quad (20)$$

Na obrázku (Obr. 11) je příklad logaritmické amplitudové a fázové charakteristiky systému 1. řádu popsany diferenciální rovnicí (14) s přenosem (15).



Obr. 11: Příklad logaritmické amplitudové a fázové charakteristiky [9]

4 POPIS LABORATORNÍHO MODELU PCT40/41/42

K vypracování této diplomové práce bylo použito laboratorní zařízení PCT 40/41/42 firmy Armfield (Obr. 12). Laboratorní model průtočného směšovače je navržen pro širokou škálu použití při výuce základních principů měření a řízení různých procesů. Obsahuje výukový model, pomocí něhož lze řídit procesy, jako je například kontrola teploty, průtoku, tlaku nebo výšky hladiny. Procesy mohou být řízeny buď manuálně, PID regulátorem nebo automaticky stylem on/off. Celý systém je řízen pomocí počítače a výukový software, který je součástí tohoto přístroje, umožňuje díky mnoha funkcím zaznamenávat průběhy měřených a řízených veličin v reálném čase. Software rovněž umožňuje měnit kontrolní parametry řízení a analyzovat průběhy procesů pro různá nastavení a konfigurace systému. Základní model PCT 40 lze rozšířit pomocí modulů PCT 41 a PCT 42 o chemický reaktor na měření vodivosti roztoku a pH sondu. Další možnosti poskytuje elektronická konzole PCT 43 s komerčním PID regulátorem a pneumatický ventil PCT 44 pro speciální měření. Dva poslední moduly však nejsou součástí analyzovaného modelu, proto není jejich popis součástí této práce.



Obr. 12: Laboratorní přístroj PCT 40 s modulem PCT 41

4.1 PCT 40

Základní jednotka PCT 40 umožňuje experimenty s jednoduchými zpětnovazebními regulačními obvody. Základem celého přístroje je mohutný lisovaný podstavec, který je osazen provozními nádobami, čerpadly, ventily, senzory a dalšími elektronickými prvky. Montážní body pak umožňují připojení volitelného příslušenství.

Se základním modulem PCT 40 je možno provádět tyto typy regulačních úloh:

- regulace výšky hladiny kapaliny v zásobníku při změnách průtoku na vstupu,
- regulace průtoku změnou otáček čerpadla,
- regulace teploty v nádobě změnou topného příkonu,

regulace teploty vody změnou průtoku topného či chladicího média ve výměníku.

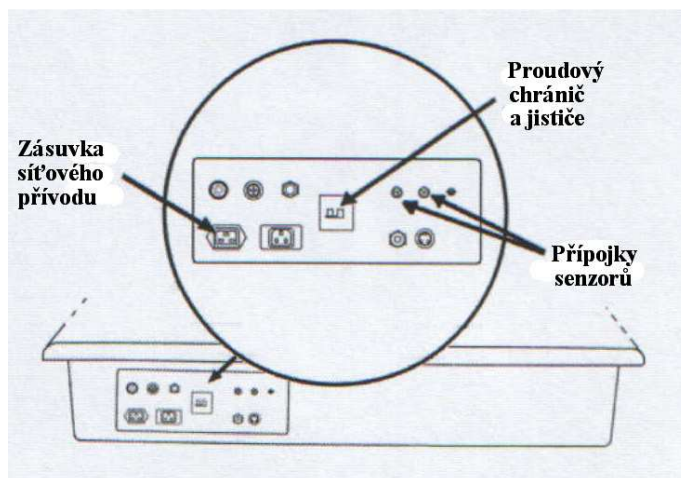
4.1.1 Osazení podstavce

Podstavec obsahuje drenážní kanál s vypouštěcím ventilem na konci, jak je patrné z obrázku (obr. 13). Pomocí dodané flexibilní hadičky tak může být zařízení připojeno k vhodnému odtoku.



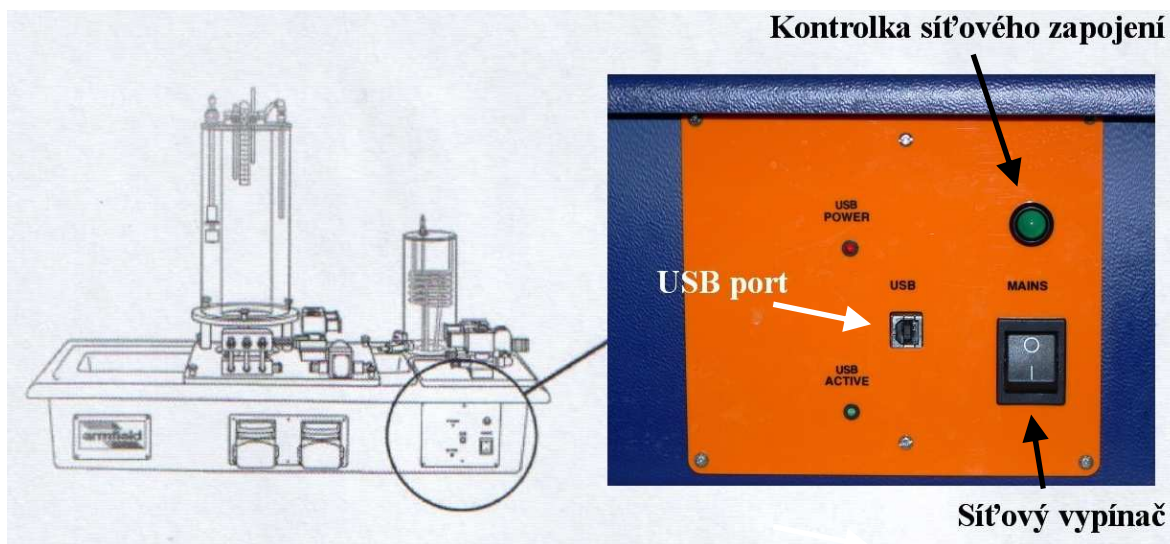
Obr. 13: Lisovaný podstavec PCT 40

Síťový přívod do zásuvky, zdířky pro připojení snímačů, proudový chránič a jističe jsou umístěny na zadní straně podstavce, viz obrázek (obr. 14).



Obr. 14: Osazení zadního panelu

Na pravé přední části se nachází panel za síťovým vypínačem, USB portem pro připojení počítače a kontrolku zapnutí přístroje (obr. 15).

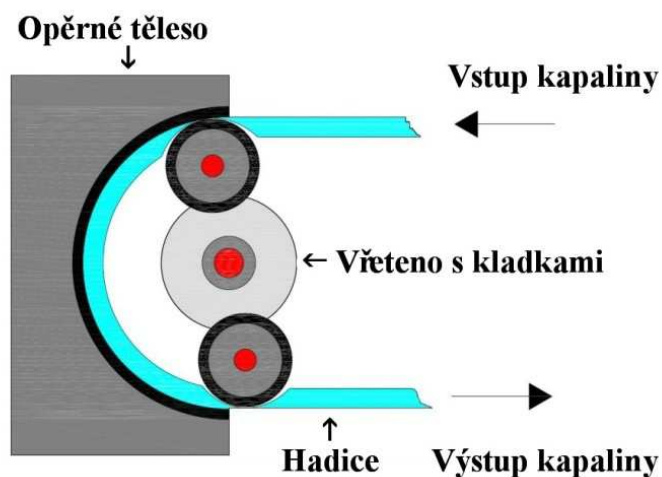


Obr. 15: Osazení čelního panelu

4.1.2 Peristaltická čerpadla A & B

Peristaltická čerpadla, někdy také označována jako hadicová čerpadla, pracují na principu paměti materiálu, ze kterého je vyrobena flexibilní hadice čerpadla. Ta je sevřena proti stěně otáčejícími kladkami tak, aby byla v místě sevření zcela neprůchozí. Tím, jak kladky

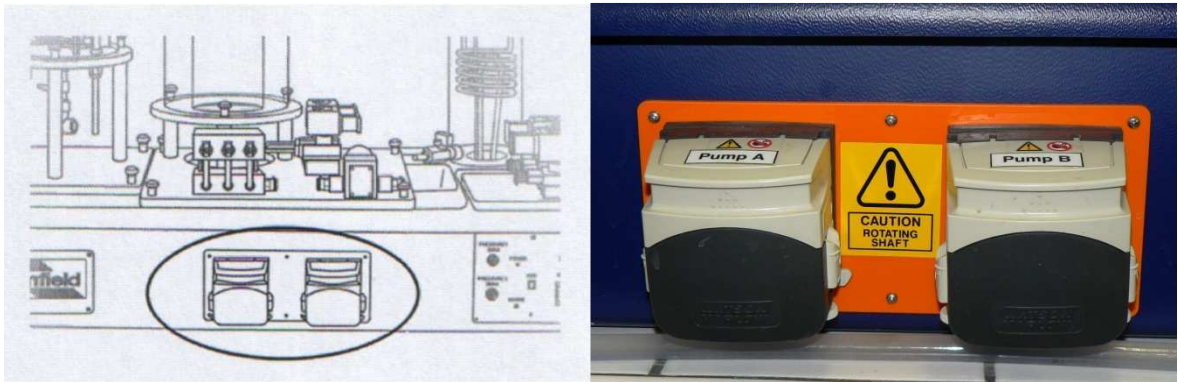
postupují po hadici, tlačí uzavřený úsek před sebou a tím i kapalinu, která je v tomto úseku uzavřena. Za kladkou se stlačená hadice opět vrací do svého původního tvaru, čímž vzniká podtlak. Tímto pod tlakem je nasávána další kapalina, dokud není úsek sevřen následující kladkou. Takto sevřená kapalina opět putuje směrem ke koncovému ústí hadice. Situace se neustále opakuje, takže na výstupu kapalina vytéká téměř stálým proudem. Princip peristaltického čerpadla zobrazuje obrázek (Obr. 16).



Obr. 16: Princip peristaltického čerpadla

V případě přístroje PCT 40 jsou obě peristaltická čerpadla identická a nacházejí se na přední straně lisovaného podstavce (obr. 17). Jsou určena pro rozvod kapaliny mezi jednotlivými součástmi modelu a umožňují regulaci 0 – 100% svého výkonu. Mohou pojmout širokou škálu silikonových hadiček, například ty z příslušenství přístroje. Čerpadla mohou být provozována současně nebo samostatně v závislosti na konkrétní úloze měření.

Vzhledem k tomu, že obě peristaltická čerpadla mají možnost samostatného nastavení velikosti průtoku kapaliny, je pravděpodobné, že jejich průtok se bude při měřeních lišit. Proto je nutné před vlastním započítáním experimentů, při kterých je k dopravě tekutin z nádrží do reaktoru využíváno těchto čerpadel, provést jejich kalibraci a následná naměřená data vztáhnout k těmto hodnotám průtoků čerpadel.



Obr. 17: Peristaltická čerpadla A a B

4.1.3 Propojovací hadičky

Propojení součástí přístroje s jednotlivými čerpadly a ventily obstarávají propojovací hadice. Tyto hadice mají několik druhů vzájemně nezaměnitelných koncovek (obr. 18). Jedná se o koncovku se zpětným ventilem, bez zpětného ventilu a zástrčkovou koncovku. Je nutné dbát na správné zapojování koncovek do jednotlivých vpustí, aby nedošlo k jejich poškození nebo k poškození přístroje.

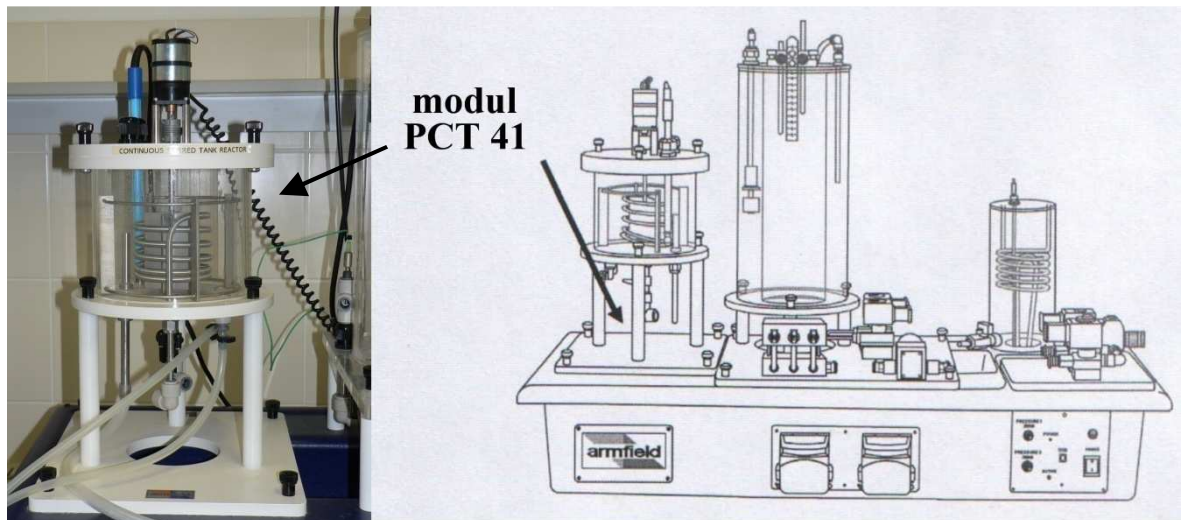


Obr. 18: Propojovací hadičky s koncovkami

4.2 PCT 41

Statická a dynamická analýza byla prováděna na modulu PCT 41, který představuje rozšiřující přídatný modul základního modelu PCT 40. Je umístěn na lisovaném podstavci vlevo od velké procesní nádoby, jak ukazuje obrázek (obr. 19). Tento modul představuje model reaktoru, který je vybaven topnou, popř. chladicí spirálou, míchadlem poháněným

elektromotorem a snímačem koncentrace, který pracuje na principu měření elektrické vodivosti média.

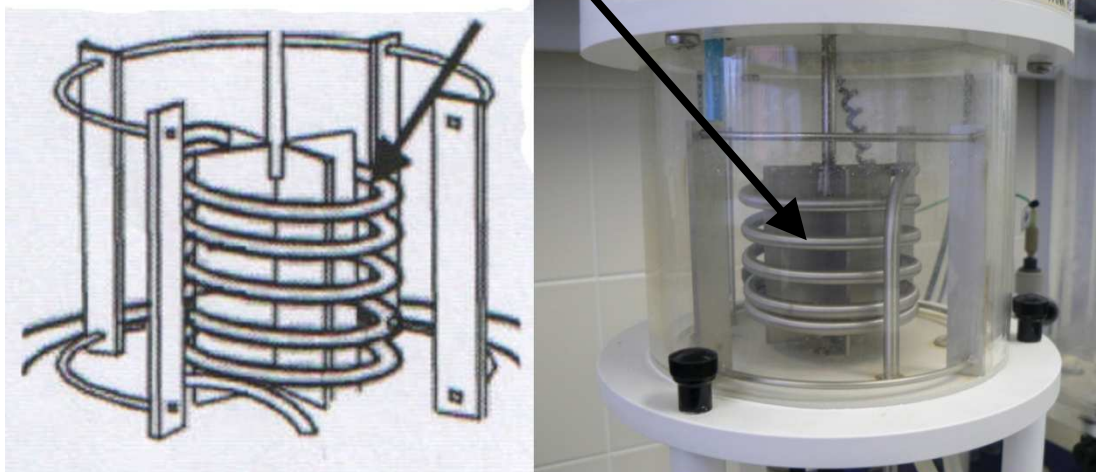


Obr. 19: Modul PCT 41

4.2.1 Spirála tepelného přenosu

Nerezová spirála v nádobě reaktoru poskytuje tepelný přenos pro vytápění nebo chlazení kapaliny v reaktoru (obr. 20).

spirála tepelného přenosu

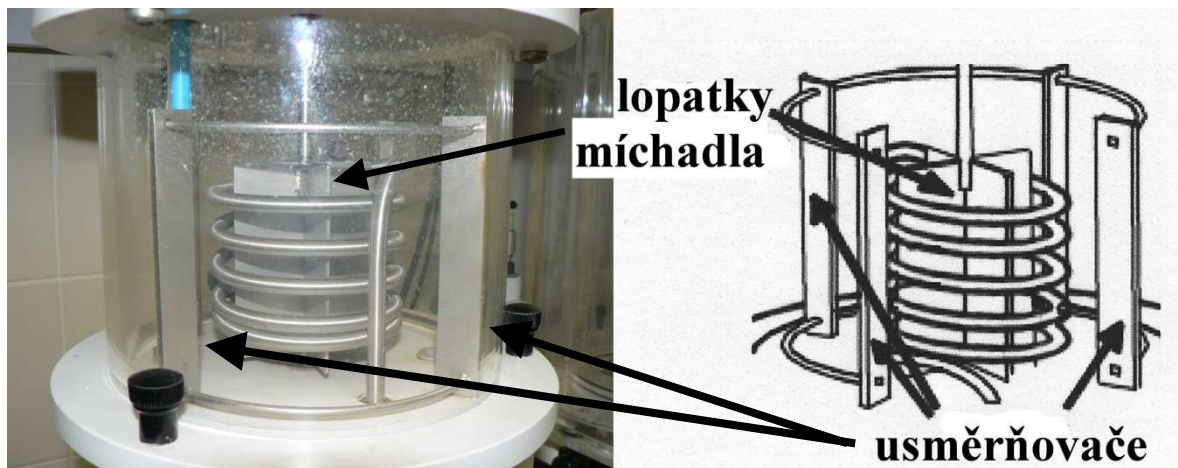


Obr. 20: Spirála tepelného přenosu

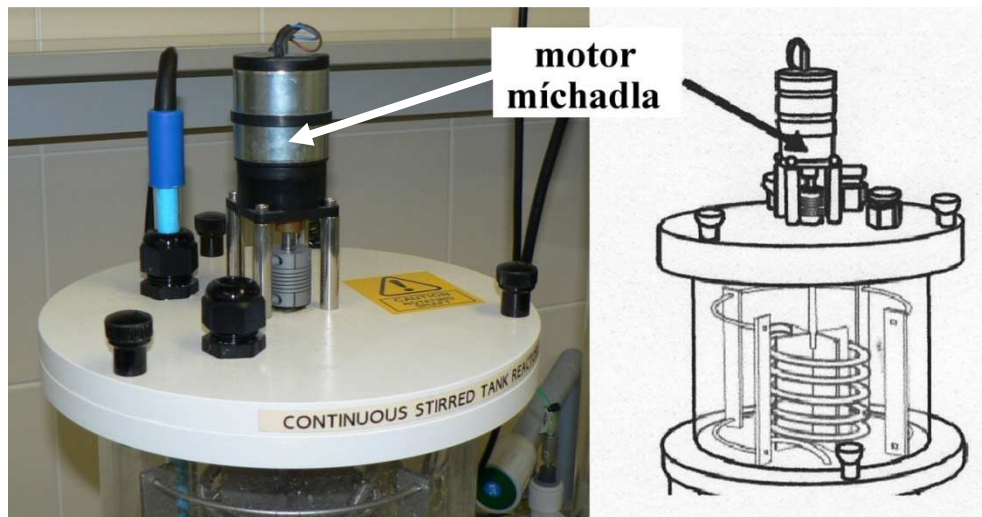
Při provádění statické a dynamické analýzy modelu průtočného směšovače nebyla tato spirála využita.

4.2.2 Míchadlo a tepelné usměrňovače

Míchadlo slouží k dokonalému promíchání různých kapalin. Je poháněno motorkem umístěným na víku nádoby reaktoru. Efektivitu promíchání kapalin a tepelného přenosu od spirály zajišťují vhodně rozestavené tepelné usměrňovače (obr. 21 a 22).



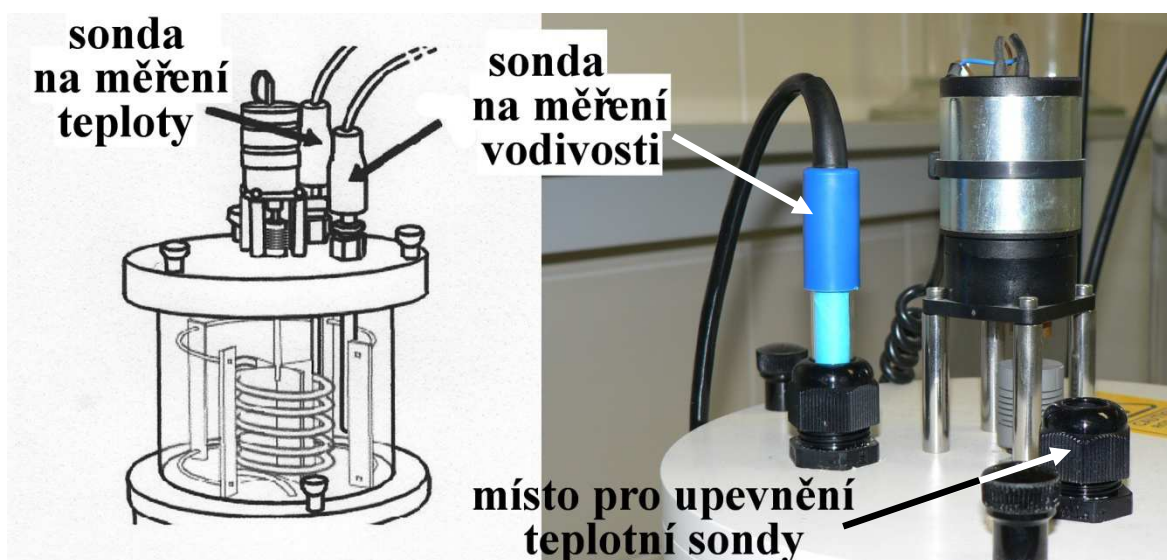
Obr. 21: Míchadlo a tepelné usměrňovače



Obr. 22: Motor míchadla

4.2.3 Volitelné měřící sondy

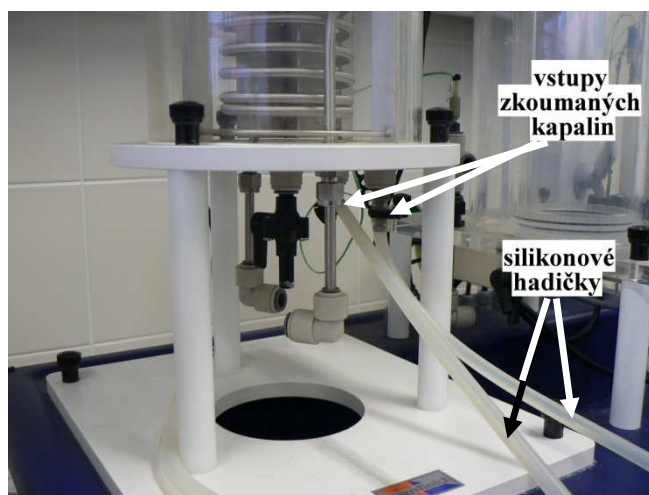
Sondy na měření teploty, vodivosti roztoku, popřípadě pH faktoru (obr. 23) se umisťují na připravená místa na víku nádoby reaktoru podle druhu prováděného měření. V tomto případě byla použita sonda na měření vodivosti roztoku. Sonda na měření teploty a pH sonda jako volitelný modul PCT 42 použity nebyly.



Obr. 23: Umístění vodivostní sondy

4.2.4 Vstupy zkoumaných kapalin

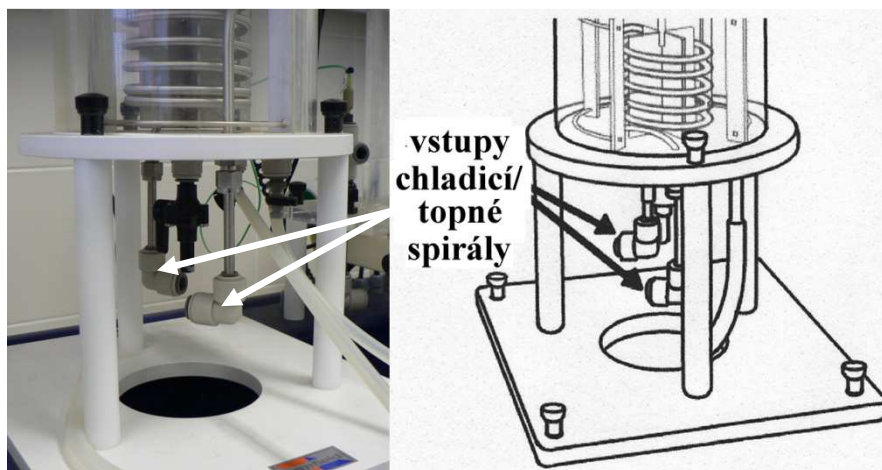
Vstupní přípojky slouží jako přívod používaných roztoků do nádoby reaktoru. Při jednotlivých demonstracích a měřeních jsou k přípojkám připevněny pružné silikonové hadičky s typizovanými koncovkami a pomocí peristaltických čerpadel A a B jsou jednotlivé chemické roztoky vháněny do nádoby, jak je znázorněno na obrázku (obr. 24).



Obr. 24: Vstupy zkoumaných kapalin

4.2.5 Vstup a výstup topné / chladicí spirály

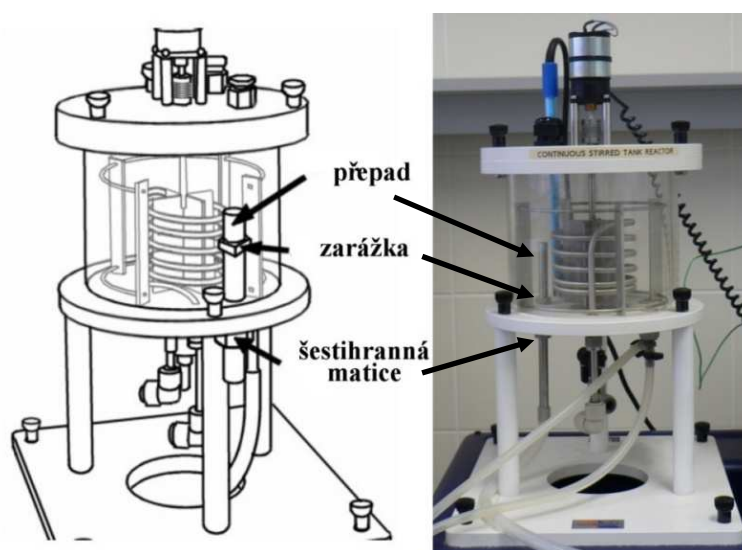
Slouží pro přívod chladicí, respektive topné kapaliny do spirály reaktoru. Přívod je, stejně jako v předešlém případě, realizován pomocí pružných silikonových hadiček připevněných na vstupy (obr. 25).



Obr. 25: Vstup a výstup topné / chladicí spirály

4.2.6 Přepad

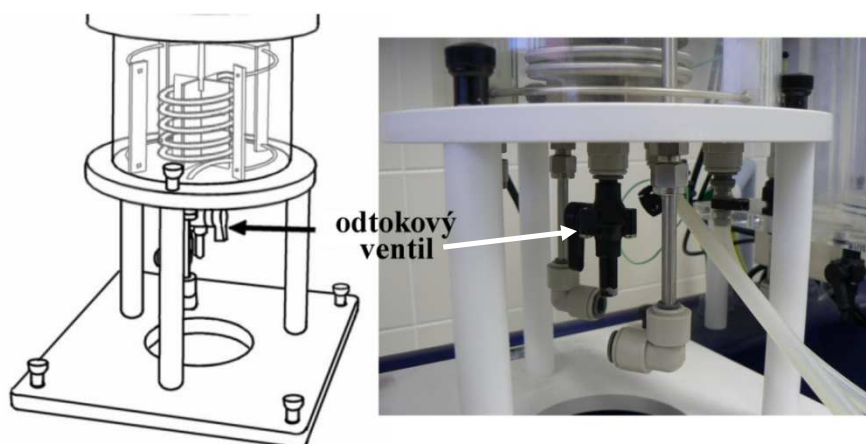
Slouží k nastavení maximální výšky kapaliny v nádobě reaktoru. Tuto výšku lze libovolně upravovat povolením šestihřanné matice na spodní straně dna nádoby a posunutím přepadové trubice do nové polohy. Úplnému vytažení zabraňuje zářezka umístěná na trubici (obr. 26).



Obr. 26: Přepadová trubice

4.2.7 Odtok

Pokud je potřeba nádobu reaktoru vyprázdnit, je možno použít vypouštěcí ventil na dně procesní nádoby, jak je znázorněno na obrázku (obr. 27).



Obr. 27: Odtokový ventil

V tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny technické parametry průtočného reaktoru.

Tab. 1: Technické parametry nádoby reaktoru

Parametr	Hodnota
Průměr nádoby reaktoru	0.153 m
Maximální hloubka nádoby reaktoru	0.108m
Maximální provozní objem	2 l
Minimální hloubka nádoby reaktoru	0.054 m
Minimální provozní objem	1l

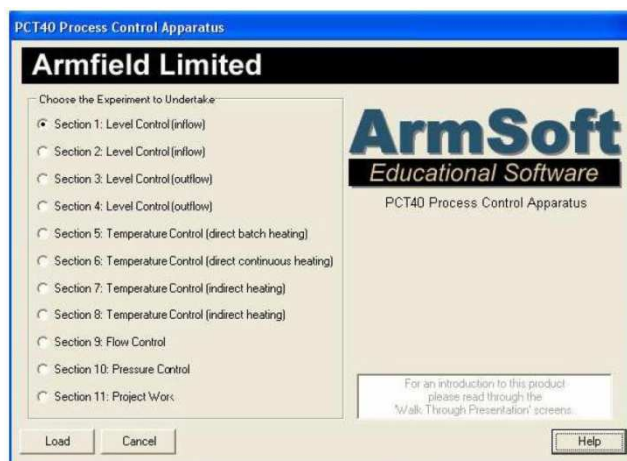
4.3 PCT 42

Modul PCT 42 je volitelným modulem přístroje PCT 40 a představuje snímač pH. Multifunkční stanici rozšířenou o tento modul lze využít k realizaci úloh modelujících chování koncentračních směšovačů a chemických reaktorů v chemických a biochemických výrobcích. Tento modul ovšem v této práci využit nebyl, proto nebude podrobněji rozebírán.

4.4 Software PCT 40

Součástí dodávky přístroje PCT 40 je vlastní software firmy Armfield Limited. Jedná se o simulační systém ArmSoft (Obr. 28). S pomocí tohoto programu lze pracovat buď s jednotlivými částmi přístroje prostřednictvím několika již vytvořených projektů, které jsou v nabídce nebo také s celým přístrojem.

Komunikace programu s přístrojem PCT 40 je zajištěna pomocí USB kabelu, který je rovněž součástí balení. Program umožňuje archivaci dat ve formátu XLS, kalibraci tlakových senzorů nebo výběr mezi manuálním a automatickým řízením. V případě automatického řízení dále umožňuje výběr mezi řízením pomocí PID nebo proporcionálního regulátoru. Nevýhodou tohoto programu je, že neumožňuje práci na nových, neodzkoušených projektech. Tento problém je vyřešen pomocí druhého typu připojení 60-ti pinového konektoru s technologickou kartou PCI v počítači, jejíž specifikace jsou dále. Toto propojení umožňuje plně programovat všechna cvičení pomocí nástrojů programu MATLAB a jeho nástavby Simulinku.



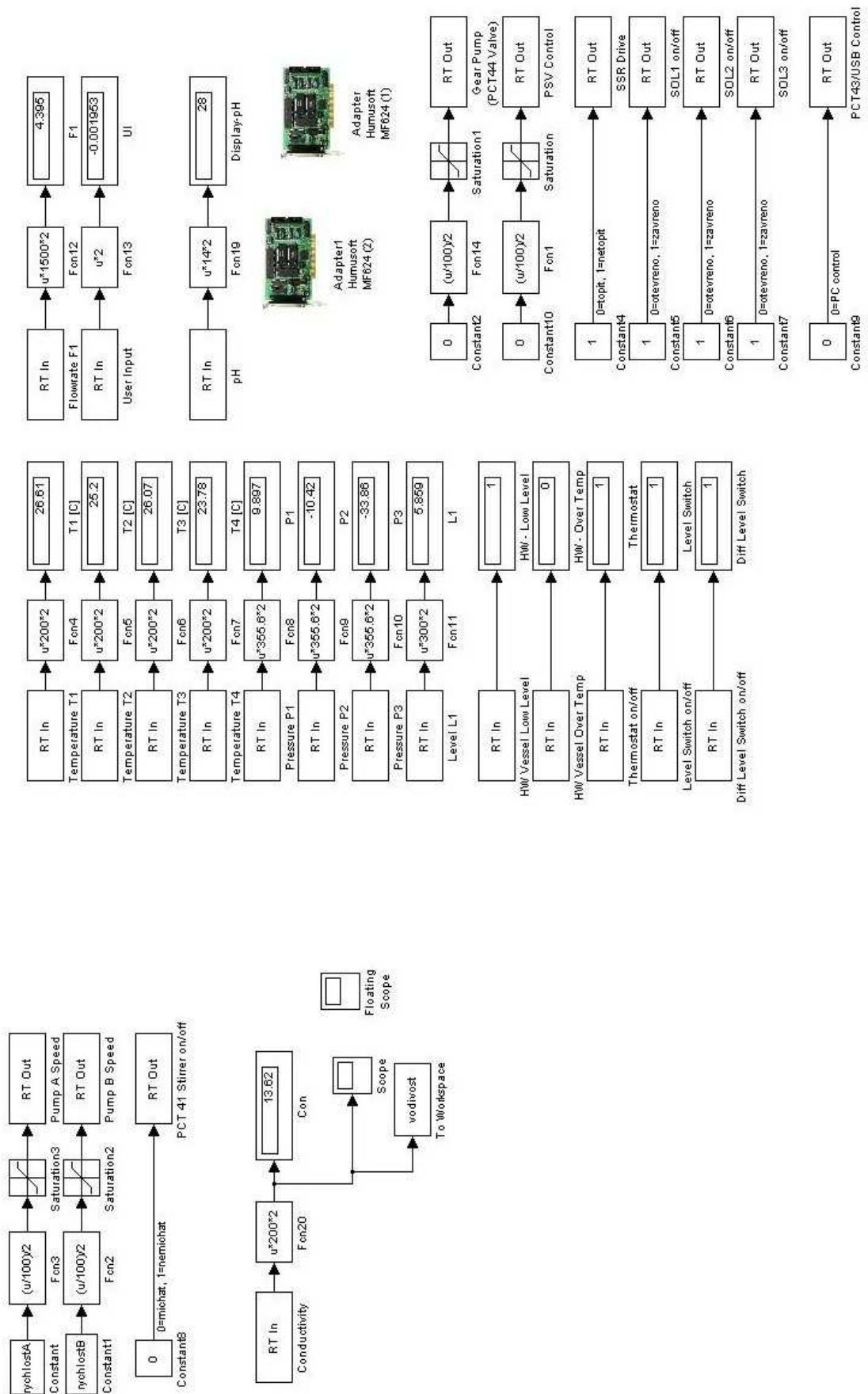
Obr. 28: Program ArmSoft pro ovládání PCT 40

V prostředí Simulink bylo vytvořeno i schéma pro řízení a komunikaci s přístrojem PCT 40. Tato komunikace je umožněna díky nástavbě Matlabu Real-time toolboxu, který umožňuje právě synchronizaci s reálným časem a komunikaci se zařízením z prostředí Simulink. Matlab Real-time toolbox nabízí nespočet vstupně-výstupních bloků, které umožňují přístup k měřicím technologickým kartám. Propojení je uskutečněno pomocí bloků *RT In* a *RT Out*. Aby mohl být definován ovladač technologické karty, musí daná aplikace Simulink obsahovat blok *Adapter*. Při měření se všechna data a veličiny přenášejí do programu pomocí standardního vstupního bloku *RT In Data* jsou poté zpracována podle daného blokového schématu a jednotlivé výsledky jsou pomocí výstupních bloků *RT Out* přenášeny na akční členy přístroje PCT40/41/42. Celkové Simulinkové schéma zobrazuje obrázek (Obr. 30).

Přístroj PCT 40 s modulem PCT 41 komunikuje se Simulinkovým programem přes technologickou kartu MF624 firmy Humusoft (Obr. 29). Jedná se o 14-bit analogovou kartu, která má osm vstupů v rozsahu $\pm 10V$ a osm výstupů o stejném rozsahu. Maximální proud činí 10 mA. Vzhledem k tomu, že přístroj PCT 40 má po rozšíření modulem PCT 41 více než osm vstupně-výstupních veličin, byly použity dvě karty MF624. To umožňuje plnou obsluhovatelnost modelu bez nutnosti neustálého přepínání mezi jednotlivými kanály. Propojení přístroje PCT 40/41 s oběma technologickými kartami je realizováno pomocí 60-pin sběrnice. [8]



Obr. 29: Technologická karta MF624 firmy Humusoft



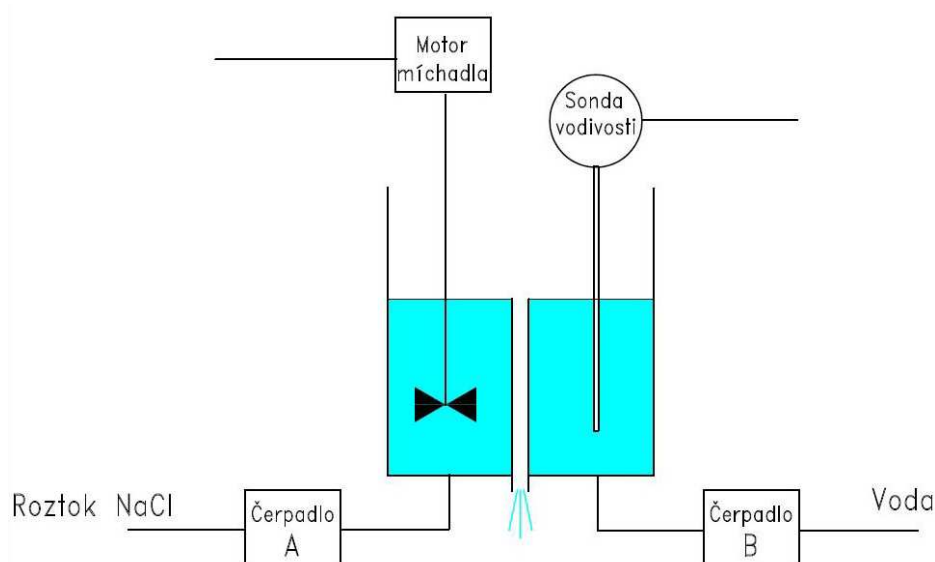
Obr. 30: Simulinkové schéma ovládání přístroje PCT 40

5 POPIS REAKTORU Z HLEDISKA MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Chemické reaktory jsou zařízení, ve kterých probíhají řízené chemické reakce. Uplatnění nacházejí v mnoha technologiích chemického i spotřebního průmyslu pro výrobu nejrůznějších chemických výrobků. Mezi základní typy reaktorů patří *vsádkový míchaný reaktor*, který pracuje v cyklech. Na začátku každého cyklu se reaktor naplní reakční směsí a po dosažení požadovaného stupně konverze se vyprázdní. Dalším typem je *průtočný míchaný reaktor*. Je podobný vsádkovému reaktoru, ale proces v něm probíhá nepřetržitě. Výchozí suroviny jsou do něj neustále přiváděny a produkty reakce odváděny. Výkon tohoto reaktoru je celkově větší, než v případě vsádkového, ale jeho řízení je složitější. Posledním typem je *trubkový reaktor*. Tento reaktor má podobu trubky umístěné v trubce, přičemž ve vnitřní trubce probíhá reakce a ve vnější trubce proudí chladicí/topné médium. Obecně je řízení procesů v chemických reaktorech důsledkem nelinearit celkem náročné.

Cílem této práce nebylo sestavení matematického modelu zkoumaného průtočného směšovače. Tato práce by vyžadovala velmi náročné výpočty a svým rozsahem by vydala na samostatnou práci. Zde bude tvorba modelu popsána pouze v obecné rovině.

Na obrázku (Obr. 31) je zobrazen průtočný chemický reaktor



Obr. 31: Průtočný chemický reaktor

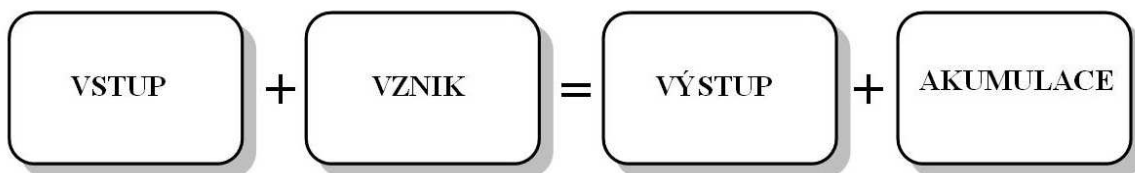
Úlohy tohoto typu se řeší pomocí bilančních rovnic. Nejprve je nutno provést definici veličin. V tomto případě jsou vstupními veličinami přítok 5 % roztoku NaCl a přítok čisté vody. Sledovanou veličinou je zde vodivost roztoku v reaktoru, tedy změna koncentrace

roztoku v závislosti na rychlosti čerpadel přivádějící jednotlivé roztoky do nádoby reaktoru.

Pro zjednodušení výpočtů je důležité zvolit zjednodušující předpoklady. Není nutné zabývat se nedůležitými detaily, ale zachovat důležité věci. V případě tohoto průtočného směšovače by těmito zjednodušujícími předpoklady mohly být:

- dokonalé promíchávání směsi,
- konstantní výkon čerpadel,
- konstantní teplota směsi i prostředí.

Obecná bilanční rovnice [4] je



Nyní již následuje dosazení jednotlivých sledovaných veličin na základě vzájemných vztahů a sestavení rovnice. Po výpočtu získáme matematický model v podobě nelineární diferenciální rovnice. Dále je možno získat model v ustáleném stavu položením derivace rovno nule, popřípadě odchylkový model a po linearizaci rovněž linearizovaný odchylkový model, který popisuje chování systému v určitém pracovním bodě a jeho okolí.

Tyto výpočty však zde nebudou z výše zmiňovaných důvodů prováděny.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 POPIS MĚŘENÍ

Cílem praktické části této diplomové práce bylo provedení statické a dynamické analýzy modelu průtočného směšovače, což je volitelný modul PCT 41 laboratorního modelu PCT 40 od firmy Armfield.

V návodu výrobce je pro tato měření doporučen hydrogenuhličitan draselný (KHCO_3) ředěný ve vodě. Vzhledem k vysoké ceně, která v případě 20 litrového roztoku KHCO_3 překračuje 1300 Kč, byla tato chemikálie při měřeních nahrazena obyčejným chloridem sodným NaCl. Náklady na 20 litrů roztoku chloridu sodného činily kolem 13 Kč, což představuje 100 násobně menší hodnotu. Při experimentech byl používán 5 % roztok NaCl. To znamená, že 20 litrů této směsi tvořil 1 Kg suché soli ředěný v 19,5 litrech vody.

Při experimentu byl pomocí dvou peristaltických čerpadel do reaktoru čerpán solný roztok a voda, které byly neustále promíchávány pomocí míchadla v reaktoru. Obě peristaltická čerpadla umožňují nastavení svého objemového průtoku teoreticky v rozmezí 0 – 100%. Pro účely tohoto experimentu však byla minimální hodnota výkonu čerpadel nastavena na 30 %. Při nižších hodnotách výkonu již čerpadla nebyla schopna dostatečně čerpat kapalinu z kanystrů. Vzhledem k tomu, že pro každé čerpadlo je možno individuálně nastavit hodnotu průtoku, je nutno před vlastním měřením na reaktoru nastavit a změřit průtoky obou čerpadel. Přepočet výkonu (rychlosti) čerpadel A a B na průtok $l \cdot \text{min}^{-1}$ zobrazuje tabulka (Tab. 2).

Tab. 2: Rychlost čerpadel A a B v % přepočítána na průtok $l \cdot \text{min}^{-1}$

čerpadlo / výkon	100%	80%	60%	50%	40%	30%
Pumpa A	980 ml	715 ml	505 ml	400 ml	290 ml	185 ml
Pumpa B	915 ml	695 ml	500 ml	390 ml	280 ml	175 ml

Experiment spočíval v několika sériích měření, přičemž při každé sérii bylo vždy čerpadlo B nastaveno na konstantní výkon a pro jednotlivá měření byl měněn výkon čerpadla A. Po ukončení 1. série měření byl změněn výkon čerpadla B a opět provedena měření pro jednotlivá nastavení čerpadla A. Výkony čerpadel byly nastavovány na hodnoty patrné z tabulky (Tab. 2). Výsledky jednotlivých měření byly uloženy.

Aby byly u jednotlivých měření zajištěny stejné výchozí podmínky, bylo nutno dodržovat některé společné zásady:

- Solný roztok byl čerpán pomocí čerpadla A a voda pomocí čerpadla B,
- Přívodní hadičky musely být před měřením odvzdušněny,
- Nádoba reaktoru a měřicí sonda musely být před každým měřením očištěny čistou vodou,
- Přepad uvnitř reaktoru byl nastaven na minimální pozici, což znamená, že objem reaktoru byl minimální, tedy 1 litr.

V průběhu experimentu byla jako čistá voda používána obyčejná studená voda ze standardní distribuce. Ačkoliv reaktor disponuje topnou/chladicí spirálou, tato není v tomto experimentu použita.

7 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA

Statická charakteristika zobrazuje ustálené hodnoty vodivosti po odeznění přechodových dějů. V každé sérii byl nejprve pevně nastaven výkon čerpadla B (voda) a poté měřeny hodnoty vodivosti pro různé hodnoty výkonu čerpadla A (5 % roztok NaCl). Pro účely tohoto měření byly zvoleny výkony čerpadel 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 80 % a 100 %, tak aby bylo přibližně pokryto celé spektrum výkonů čerpadel. Hodnoty pod 30 % nebyly do měření zahrnuty, neboť při výkonech pod 30 % již nebyla čerpadla schopna čerpat kapalinu s kanystrů. Výběr sledovaných výkonů čerpadel byl intuitivní. Větší škála sledovaných výkonů by sice zpřesnila analýzu, ale vzhledem k délce jednotlivých experimentů zahrnujících jak samotné měření, tak přípravu zařízení a zpracování dat, by byl celkový experiment časově velmi náročný. Délka jednotlivých měření byla nastavena na 600 s, perioda vzorkování byla 1 s.

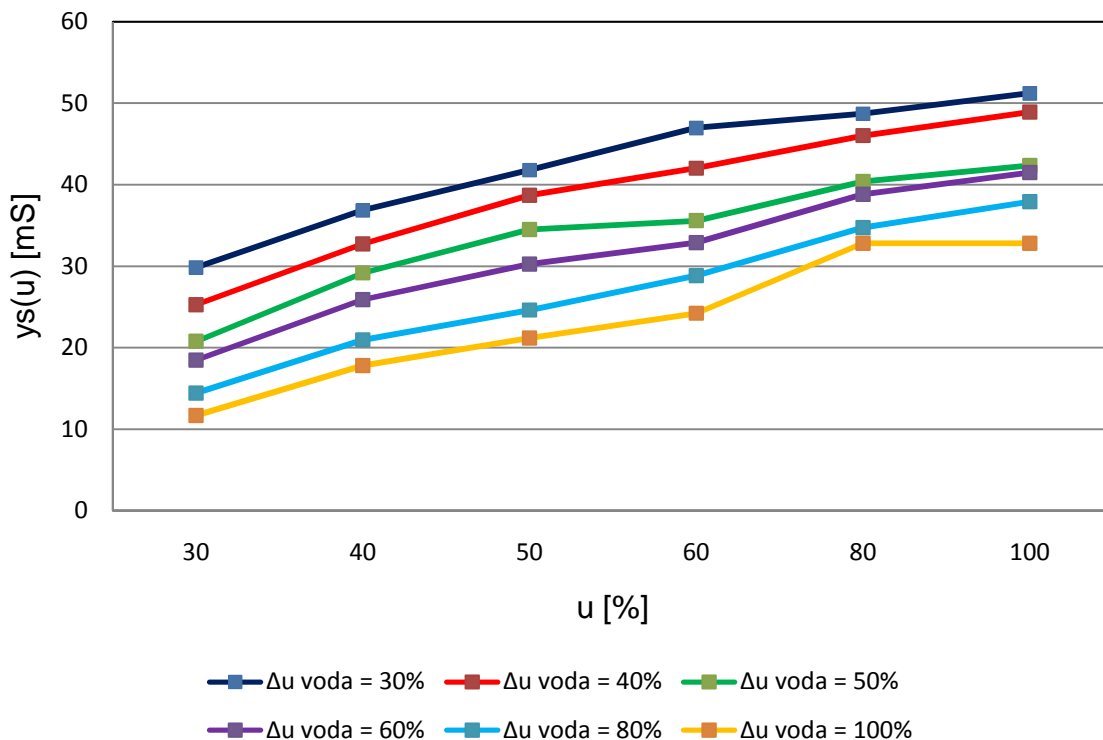
7.1 Výsledky měření

Statické charakteristiky byly vypracovány pro jednotlivé průtoky čerpadla B s čistou vodou, při různých nastaveních čerpadla A (5 % NaCl). Jejich hodnoty jsou zobrazeny v tabulce (Tab. 3). Hodnoty v tabulce odpovídají průměrné hodnotě vodivosti pro jednotlivé průtoky. Pro výpočet průměru byly vzaty hodnoty vodivosti v čase 300 s – 600 s, kdy u všech měření tyto hodnoty vykazovaly ustálený stav.

Tab. 3: Ustálené hodnoty vodivosti pro jednotlivé průtoky

sůl/voda	30%	40%	50%	60%	80%	100%
30%	29,804	25,239	20,746	18,441	14,402	11,659
40%	36,832	32,710	29,141	25,864	20,943	17,780
50%	41,785	38,675	34,479	30,246	24,597	21,159
60%	46,955	42,007	35,568	32,870	28,819	24,199
80%	48,691	46,011	40,387	38,809	34,706	32,784
100%	51,199	48,903	42,347	41,481	37,898	32,784

Statická charakteristika je zobrazena na obrázku (Obr. 32).



Obr. 32: Statické charakteristiky modelu průtočného směšovače

7.2 Vyhodnocení výsledků

S přihlédnutím na určité chyby měření lze konstatovat, že jednotlivé statické charakteristiky pro různá nastavení čerpadla B mají podobný průběh. Při hodnotách průtoku čerpadla A 30 % - 60 % je tento průběh lineární, pro hodnoty průtoku čerpadla A 60 % - 100 % jsou tyto průběhy nelineární.

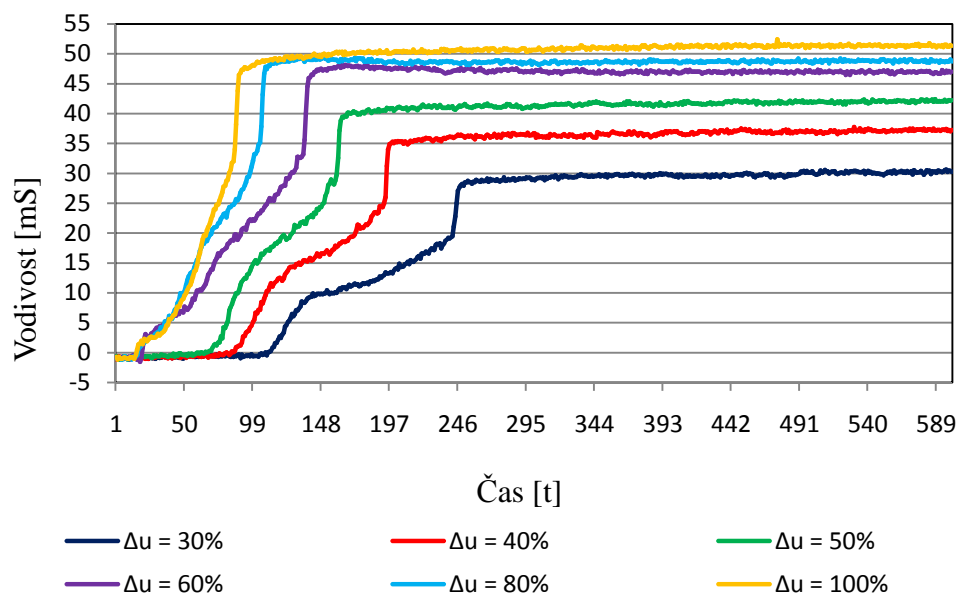
Větší počet měření by zajistil kvalitnější a přesnější výsledky, ale vzhledem k časové náročnosti jednotlivých experimentů byl zvolen daný počet měření.

8 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA

Dynamická charakteristika byla získána v šesti sériích měření, každá po šesti jednotlivých měřeních. Pro jednotlivá měření byly voleny různá nastavení průtoků čerpadel A a B. Zvoleny byly hodnoty 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 80 % a 100 %. Pomocí čerpadla A byl z kanystru čerpán 5 % roztok Chloridu sodného (NaCl) a pomocí čerpadla B čistá voda. Pro každou sérii byl jako konstantní brán výkon čerpadla B a měření provedena pro různé hodnoty výkonu čerpadla A. Doba trvání všech experimentů byla 600 s a perioda vzorkování 1 s. Získaná data byl převedena do formátu XLS a zpracována do grafické podoby.

8.1 Výsledky měření

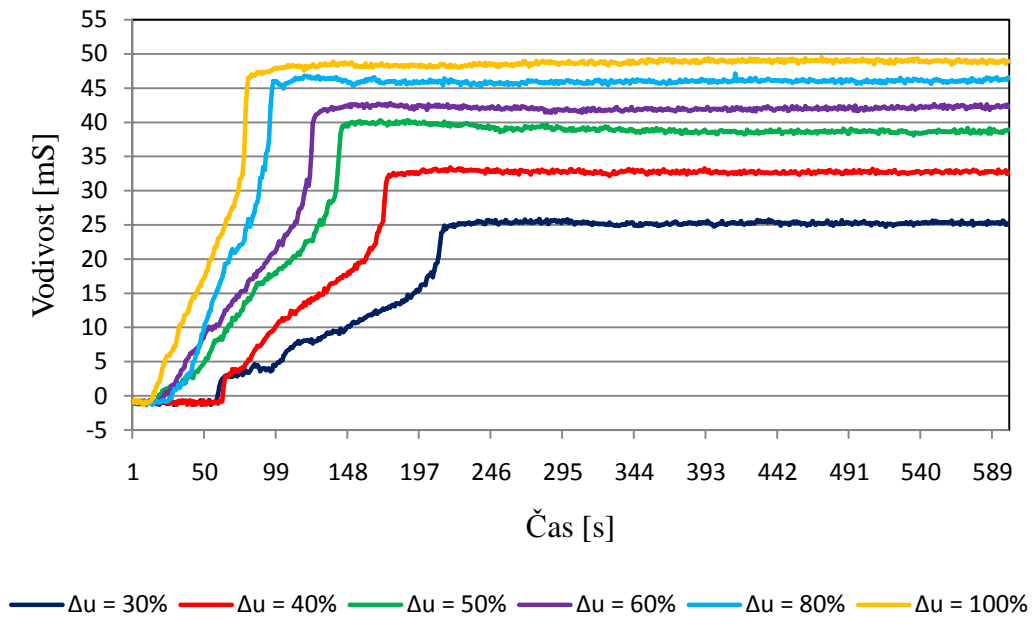
V první sérii měření byl tety výkon čerpadla B (voda) nastaven na hodnotu výkonu 30 %. Bylo provedeno celkem 6 měření. Při každém měření byl měněn výkon čerpadla A v rozsahu 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 80 % a 100 %. Výsledné průběhy zobrazuje obrázek (Obr. 33).



Obr. 33: Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 30 %

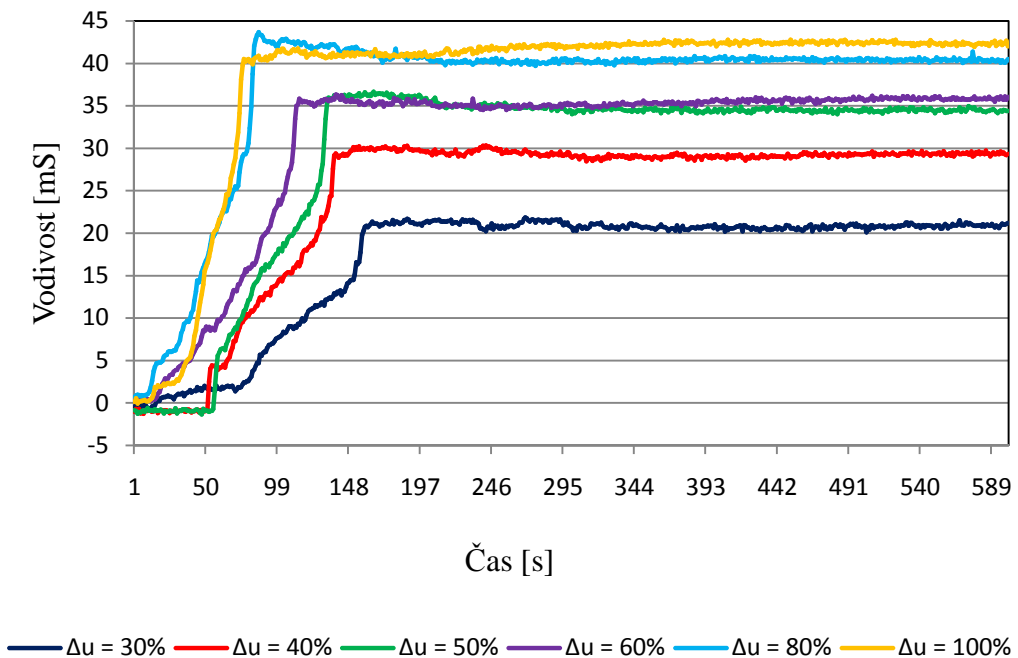
Ve druhé sérii měření byl výkon čerpadla B (voda) změněn na 40 %. Následovalo opět 6 měření pro různá nastavení čerpadla A (5 % roztok NaCl) v rozsahu 30 % - 100 %.

Výsledné průběhy měření zobrazuje obrázek (Obr. 34).



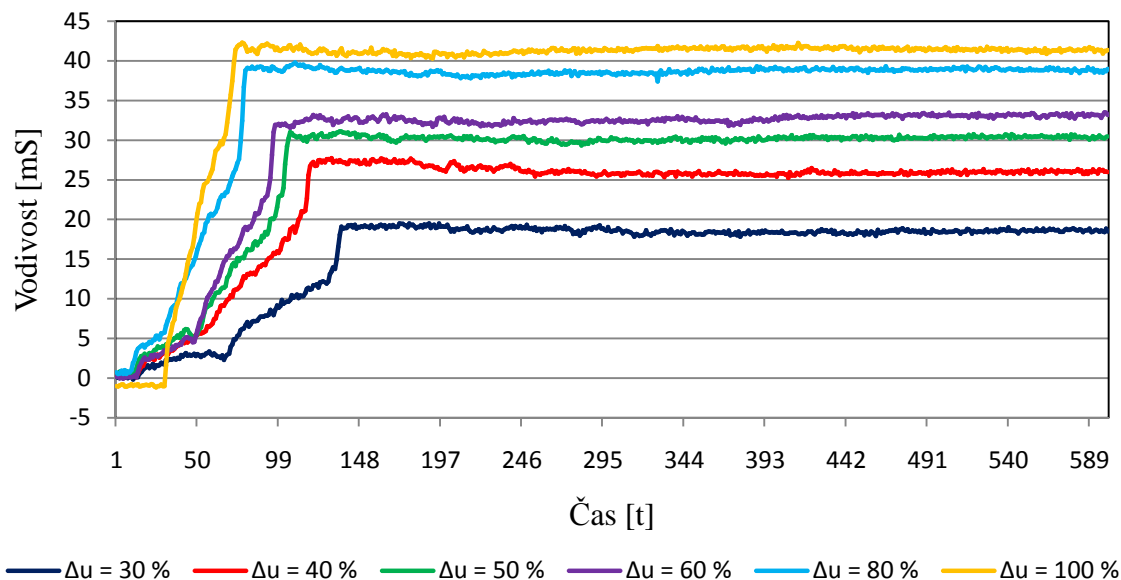
Obr. 34: Dynamická charakteristika pro výkon čerpadla $B = 40\%$

Ve třetí sérii měření byl výkon čerpadla B nastaven na hodnotu 50 %. Výkony čerpadla A byly opět měněny v rozsahu 30 % - 100 %. Výsledné průběhy jsou na obrázku (Obr. 35).



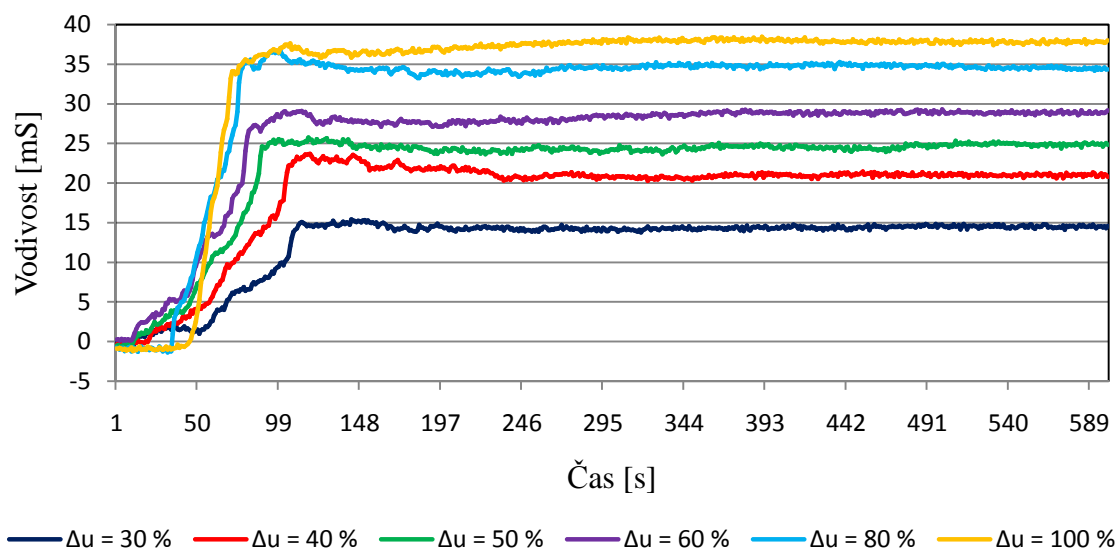
Obr. 35: Dynamická charakteristika pro výkon čerpadla $B = 50\%$

Pro čtvrtou sérii měření bylo zvoleno nastavení výkonu čerpadla B 60 %. Nastavení čerpadla A byla měněna pro jednotlivá měření v rozsahu 30 % - 100 %. Výsledné průběhy jsou na obrázku (Obr. 36).



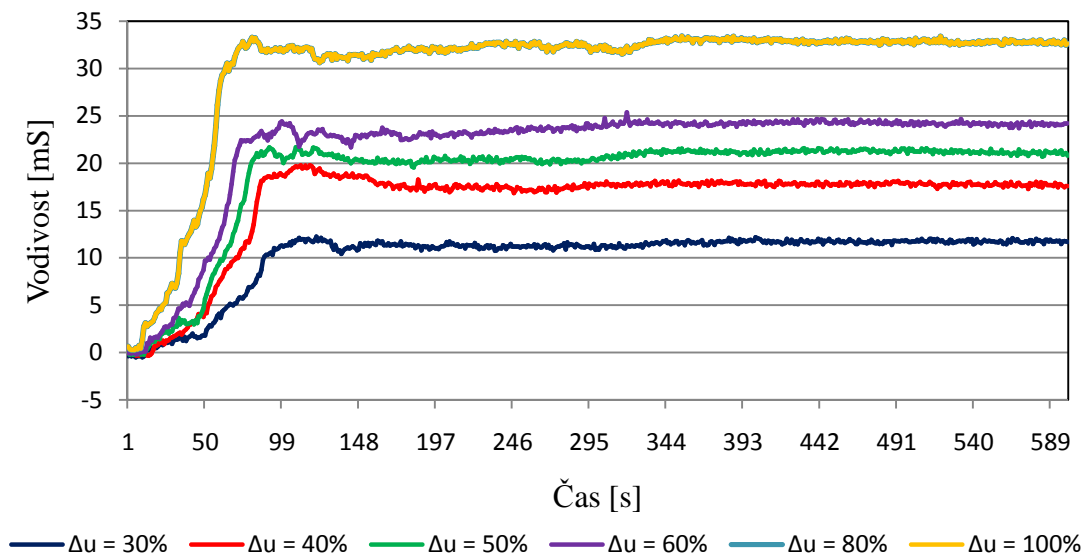
Obr. 36: Dynamická charakteristika pro výkon čerpadla B = 60 %

V páté sérii byl výkon čerpadla B nastaven na 80 %. Výkon čerpadla A bylo pro jednotlivá měření opět postupně nastavován na hodnoty 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 80 % a 100 %. Výsledné hodnoty v grafické podobě znázorňuje obrázek (Obr. 37).



Obr. 37: Dynamická charakteristika pro výkon čerpadla B = 80 %

V poslední 6. Sérii měření byl výkon čerpadla B nastaven na hodnoty výkonu 100 %. Výkon čerpadla A by opět v jednotlivých krocích nastavován dříve zmiňované hodnoty v rozmezí 30 % - 100 %. Výsledné hodnoty v grafické podobě jsou na obrázku (Obr. 38).



Obr. 38: Dynamická charakteristika pro výkon čerpadla B = 100 %

8.2 Výsledky měření

Z naměřených dynamických charakteristik lze usoudit, že průběhy v rámci jednotlivých sérií měření jsou podobné. Jednotlivé charakteristiky se liší hlavně ve dvou parametrech. Tím prvním je maximální dosažená hodnota vodivosti, která závisí na výsledné koncentraci solného roztoku. Ten je dán nastavením maximálního průtoku čerpadla A (roztok NaCl) při každém jednotlivém měření.

Dalším parametrem, ve kterém se jednotlivé charakteristiky liší, je náběh. Ten je dán poměrem výkonů jednotlivých čerpadel při každém měření. Čím větší je výkon čerpadla A (roztok NaCl) na úkor čerpadla B (voda), tím je náběh strmější.

Měřený systém má stochastický charakter a vykazuje nelineární chování. Pro řízení těchto systémů nejsou příliš vhodné regulátory s pevným nastavením, protože nejsou schopny včas a správně reagovat na změny v systému a může tak dojít k nestabilitě tohoto systému.

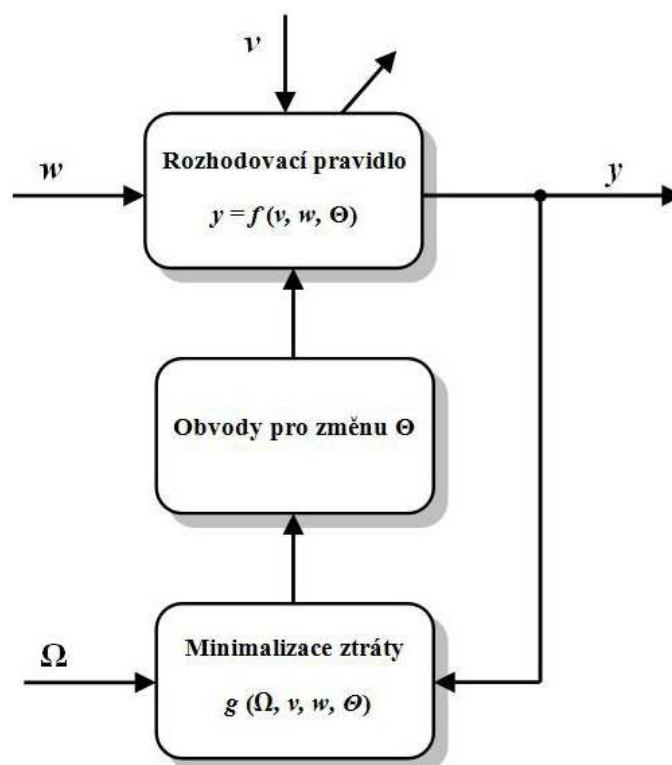
9 NÁVRH METODY ŘÍZENÍ

9.1 Návrh řídicí metody

Jednou z možností zvýšení kvality řízení nelineárních systémů stochastického charakteru je použití adaptivních řídicích systémů. Pro adaptivní systémy musí platit jedno z následujících pravidel:

- systém může změnit stav nebo strukturu,
- můžeme ovlivňovat stav nebo výstup systému.

Adaptivní systém má tři vstupy a jeden výstup. Na systém působí prostředí, které tvoří dvě veličiny – řídicí veličina w a porucha v . Dále na systém působí veličina Ω , která nese informaci, jak se má systém chovat.



Obr. 39: Struktura adaptivního systému [7]

Výstup tvoří chování systému

$$y = f(w, v, \theta) \quad (21)$$

kteří přiřazuje každému projevu prostředí w a v jediný výstup y . Změna chování se uskutečňuje pomocí parametrů Θ .

Adaptivní řídicí systémy přizpůsobují parametry nebo strukturu regulátoru změnám parametrů nebo struktury regulované soustavy tak, aby celý systém měl co nejoptimálnější chování podle zadaného kritéria nezávisle na změnách, které nastaly. Adaptaci lze uskutečnit změnou nastavitelných parametrů regulátoru, změnou struktury regulátoru nebo generováním vhodného přídavného vstupního signálu.[7]

Adaptivní systémy lze rozdělit podle druhu adaptace do několika skupin. V tomto případě budeme uvažovat samočinně se nastavující regulátor (STC) založený na přímé identifikaci.

9.2 Návrh identifikační metody

Pro odhadování parametrů modelu se nejlépe osvědčila metoda nejmenších čtverců. Je založená na minimalizaci sumy kvadratických chyb.

$$J_k = \sum_{i=1}^k (y_i - \theta_k^T \Phi_i)^2 \quad (22)$$

kde y_i je výstup v i -tém kroku a $\theta_k^T \Phi_i$ předpovídá výstup procesu. Řešení této rovnice vede k rekurzivní verzi této metody, kde je vektor parametrů odhadů aktualizovaný v každém kroku podle rovnice

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{C_{k-1} \Phi_k}{1 + \Phi_k^T C_{k-1} \Phi_k} (y_k - \theta_k^T \Phi_k) \quad (23)$$

Matice kovariance je aktualizována v každém kroku a je definována rovnicí

$$C_k = C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \Phi_k C_{k-1} \Phi_k^T}{1 + \Phi_k^T C_{k-1} \Phi_k} \quad (24)$$

Počáteční hodnota matice C určí vliv identifikace počátečních parametrů soustavy.

Nevýhodou této metody je nedostatek signálního zatížení. Každý vstup i výstup ovlivňují výsledek parametrů stejnou váhou. Problém řeší použití zapomínající metody se zapomínajícím koeficientem φ , který snižuje váhy dat z předešlých kroků. Váhy φ^{k-i} jsou přiřazeny k hodnotám y_i, u_i .

Odhady parametrů jsou vypočteny dle následných rovnic

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{C_{k-1}\Phi_k}{\varphi + \Phi_k^T C_{k-1} \Phi_k} (y_k - \theta_k^T \Phi_k) \quad (25)$$

$$C_k = \frac{1}{\varphi} \left(C_{k-1} - \frac{C_{k-1}\Phi_k C_{k-1}\Phi_k^T}{\varphi + \Phi_k^T C_{k-1} \Phi_k} \right) \quad (26)$$

Navržené metody se používají k identifikaci parametrů soustavy, ke kterým se navrhuje požadované nastavení regulátoru.

Zde budeme uvažovat výstup parametrů soustavy druhého řádu z identifikačního cyklu. Soustava, k níž budou v každém časovém okamžiku T_0 přepočítány parametry regulátoru má tvar

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (27)$$

Parametry a_1, a_2, b_1, b_2 budou použity pro výpočet jednotlivých složek regulátoru.

VLASTNÍ IDENTIFIKACE

Pro experimentální identifikaci byla v tomto případě použita jednorázová metoda nejmenších čtverců, kdy je soubor naměřených dat zpracován v jednom výpočtu. Nejprve bylo nutno naplnit matici dat \mathbf{F} , která má obecně rozměr $(N-n; 2n)$ a tvar

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -y(n) & -y(n-1) \dots & -y(1) & u(n) & u(n-1) \dots & u(1) \\ -y(n+1) & -y(n) \dots & -y(2) & u(n+1) & u(n) \dots & u(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(N-1) & -y(N-2) \dots & -y(N-n) & u(N-1) & u(N-2) \dots & u(N-n) \end{bmatrix} \quad (28)$$

a vektor vstupů \mathbf{y}

$$\mathbf{y}_i^T = [y_i(3); \dots y_i(N)] \quad (29)$$

kde N je počet souborů naměřených dat.

Výpočet parametrů byl proveden pomocí rovnice

$$\theta = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y}_2 \quad (30)$$

Výpočet těchto parametrů byl proveden v Matlabu pomocí vytvořeného programu *vyhodnot_nove.m*, viz. příloha (Příloha PI). Naměřená data se ukládají do proměnné

data.mat a zároveň se hodnoty parametrů vypisují na obrazovku. Vzhledem k velkému počtu měření při zjišťování dynamických charakteristik byly pro přehlednost jako vstupní data použity pouze hodnoty z vybraných měření z jednotlivých sériích, aby byla zastoupena měření při různém nastavení výkonu čerpadel A i B. Výsledné hodnoty parametrů pro jednotlivá nastavení výkonu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4).

Tab. 4: Parametry přenosu pro různé výkony čerpadel A a B

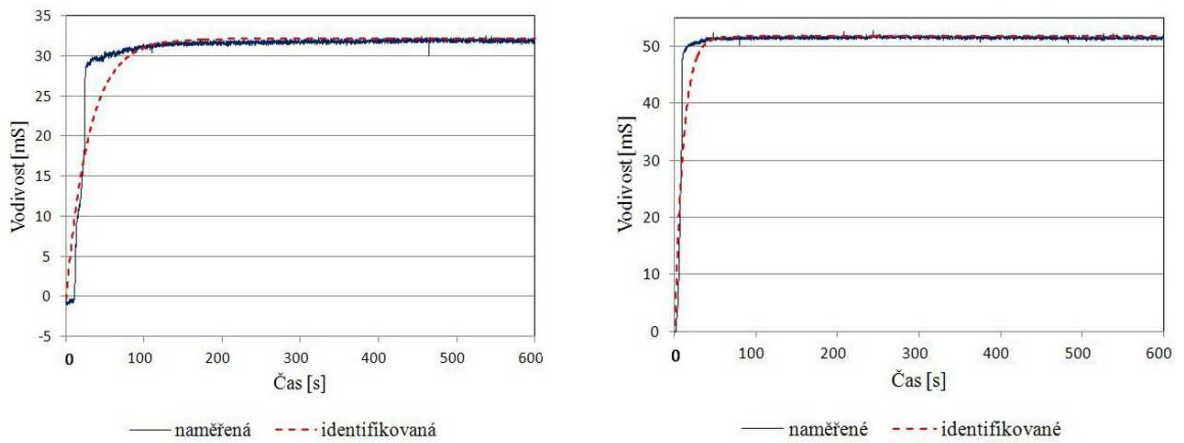
Výkony čerpadla B na A / parametry	a_1	a_2	b_1	b_2
B 30% na A 30 %	- 1,0649	0, 0055	0,0980	0,0290
30% na 100 %	- 1,1140	0,0012	0,2142	0,1712
40% na 40 %	- 1,2618	0,0027	0,3054	0,0332
40% na 100 %	- 1,0035	0, 0001	0,1472	0,1752
50% na 30 %	- 0, 9724	- 0,0051	0,0415	0,0339
50% na 80 %	- 1,2379	0,0073	0,3549	0,0852
60 % na 40 %	- 1,1104	0,0028	0,2017	0,0354
60 % na 100 %	- 1,4412	0,0072	0,5484	0,0654
80 % na 50 %	- 1,1215	0,0057	0,2369	0,0291
80 % na 100 %	- 1,4031	0,0008	0,5047	0,0466
100 % na 30 %	- 0,7718	- 0,0009	- 0,0790	0,0175
100 % na 60 %	- 0,9915	0,0019	0,1425	0,0333

Pomocí programu *vyhodnot_nove.m* je zároveň provedeno i ověření výsledků na základě rovnice

$$y_{id}(i) = -a_1 y_{id}(i-1) a_0 y_{id}(i-2) + b_1 u_{id}(i-1) + b_0(i-2) \quad (31)$$

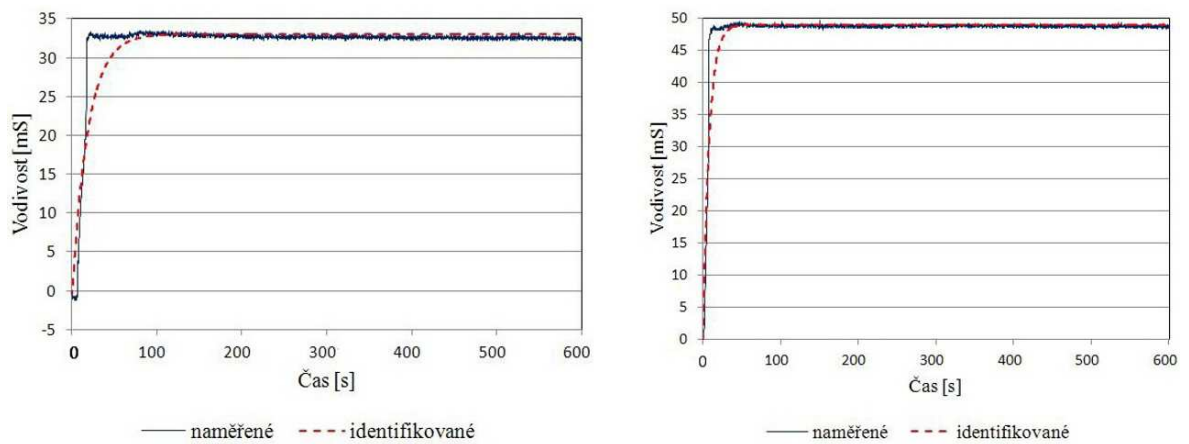
pro $i = 3, \dots, n$

Výsledné hodnoty se ukládají do proměnné *data.xls*, aby mohla být pomocí Excelu zpracována do grafické podoby. Na následujícím obrázku (Obr. 40) je porovnání průběhů naměřených a identifikovaných hodnot při výkonu čerpadla B = 30 % a čerpadla A = 30 % a 100 %.



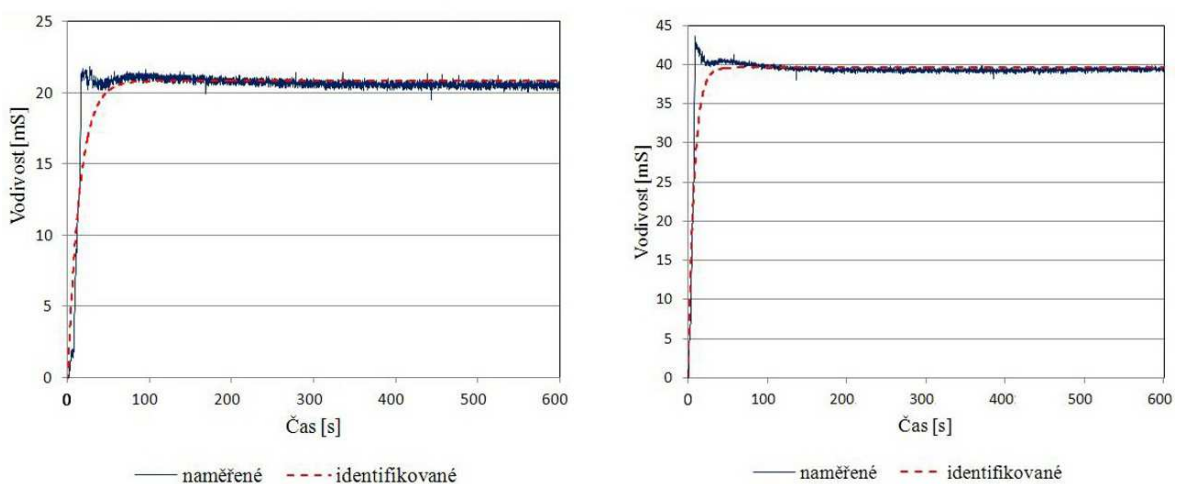
Obr. 40: Identifikovaná data pro $B = 30\%$; $A = 30\%$, resp. 100%

Další obrázek (Obr. 41) zobrazuje průběhy při výkonu čerpadla $B = 40\%$ a výkonu čerpadla $A = 40\%$, respektive 100% .



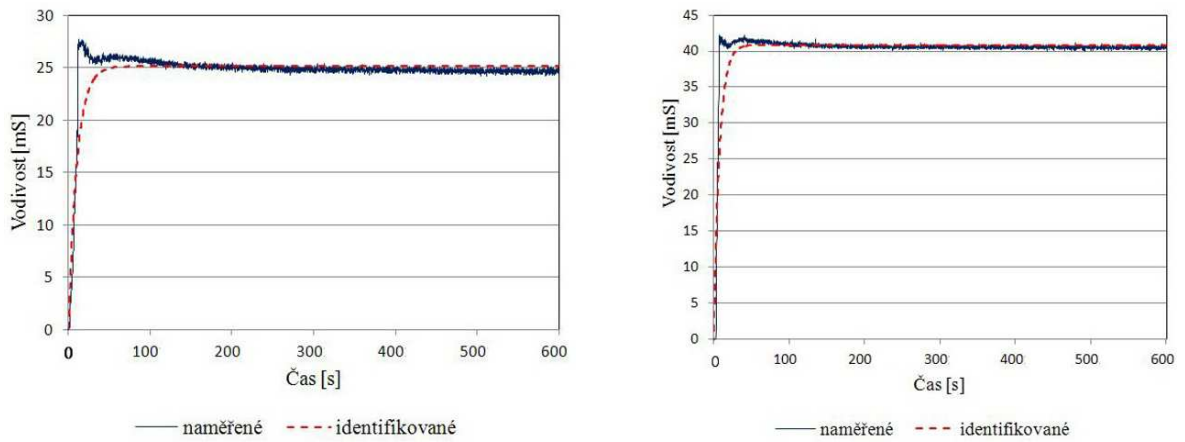
Obr. 41: Identifikovaná data pro $B = 40\%$; $A = 40\%$, resp. 100%

Další zobrazené průběhy (Obr. 42) platí pro výkon $B = 50\%$ a výkon $A = 30\%$ a 80% .



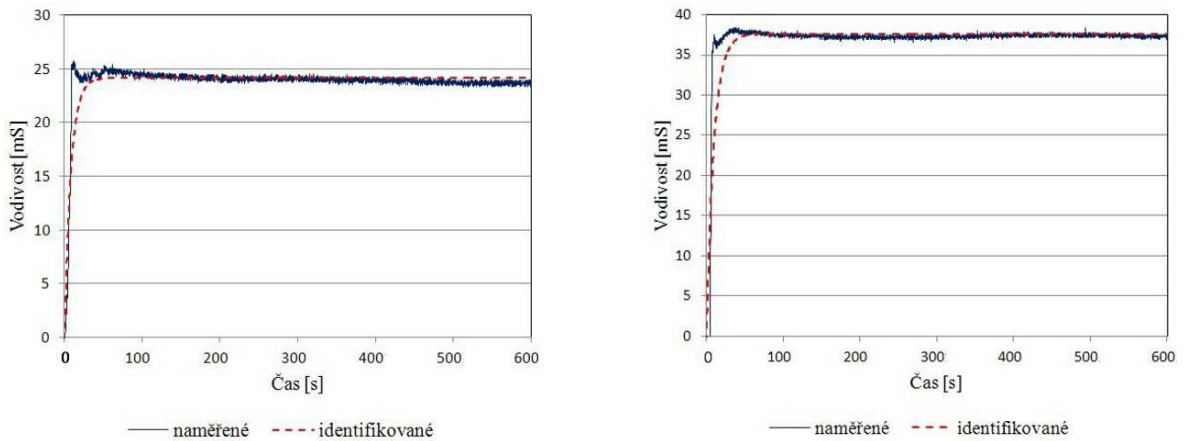
Obr. 42: Identifikovaná data pro $B = 50\%$; $A = 30\%$, resp. 80%

Obrázek (Obr. 43) zobrazuje hodnoty pro výkon čerpadla $B = 60\%$ a výkony čerpadla $A = 40\%$, resp. 100% .



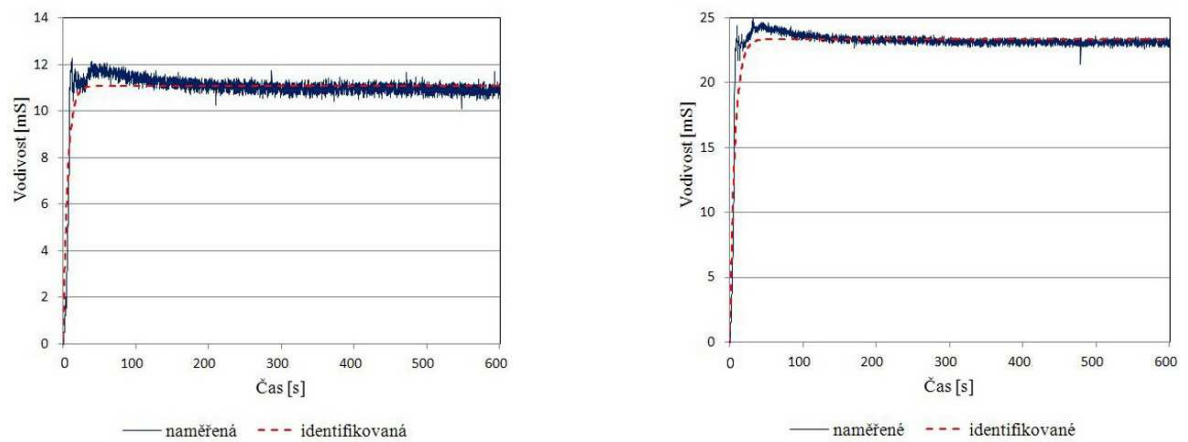
Obr. 43: Identifikovaná data pro $B = 60\%$; $A = 40\%$, resp. 100% .

Pro nastavení výkonu čerpadla $B = 80\%$ a výkonu čerpadla $A = 50\%$, respektive 100% jsou průběhy na obrázku (Obr. 44).



Obr. 44: Identifikovaná data pro $B = 80\%$; $A = 50\%$, resp. 100%

Obrázek (Obr. 45) znázorňuje průběhy pro nastavený výkon čerpadla $B = 100\%$ a pro výkony čerpadla $A = 30\%$ a 60% .



Obr. 45: Identifikovaná data pro $B = 100\%$; $A = 30\%$, resp. 60%

Z uvedených grafů (Obr. 40 – 45) je patrné, že až na drobné odchylky v počátcích charakteristik přibližně kopírují identifikovaná data naměřené hodnoty.

Výsledný přenos byl identifikován jako systém druhého řádu.

Po identifikaci soustavy je nyní možno navrhnout regulátor, což ovšem není cílem této práce.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provedení statické a dynamické analýzy modelu průtočného směšovače PCT 40. V teoretické části jsou objasněny a popsány pojmy modelování a simulace systémů, včetně postupu, některých metod a používaného softwaru. Další část je věnována způsobům popisu dynamických systémů.

Většinu teoretické části tvoří popis samotného laboratorního modulu PCT 40 a zejména jeho modulů PCT 41 a PCT 42 představující model průtočného směšovače společně s pH sondou. Jsou zde podrobně popsány jednotlivé části přístroje, jejich funkce a zapojení. Zmíněno je i samotné propojení s počítačem a softwarové vybavení umožňující ovládání modelu a jednotlivá měření a experimenty.

Praktická část se zabývá popisem způsobu získání statických a dynamických charakteristik zkoumaného modelu průtočného reaktoru. Nejdříve je popsána příprava měření a nastavení přístroje. Hlavní částí je samotné měření. V průběhu měření byl do nádoby reaktoru pomocí dvou peristaltických čerpadel s nastavitelným průtokem čerpán pětiprocentní roztok chloridu sodného a čisté vody. Směs byla nepřetržitě promíchávána a pomocí sondy byla měřena její vodivost. Bylo provedeno celkem šest sérií měření. V každé sérii bylo učiněno šest měření pro konstantní nastavení průtoku čerpadla B a pro různá nastavení průtoků čerpadla A.

Následovalo provedení statické analýzy a vyhodnocení statistické charakteristiky pro jednotlivá nastavení čerpadla B (voda) při různých skokových změnách výkonu čerpadla A (roztok NaCl). Následně byla provedena dynamická analýza. Grafické znázornění jednotlivých průběhů zkoumané veličiny bylo opět vztaženo k výkonu čerpadla B. Jednotlivé grafy znázorňují průběhy při konstantním výkonu čerpadla B, a pro různé výkony čerpadla A.

Výsledná data z několika náhodně vybraných dynamických charakteristik byla použita k identifikaci systému jednorázovou metodou nejmenších čtverců. Identifikovaná data byla následně porovnána s naměřenými hodnotami. Systém byl identifikován jako soustava 2. řádu. Po identifikaci systému je možno navrhnout regulátor. To ovšem nebylo cílem této práce.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this thesis was to perform static and dynamic analyses of continuous mixer laboratory model PCT 40. In the theoretical part are explained and described in terms of modeling and simulation systems, including procedures, some of the methods and software used. Another section is devoted to the description of methods of dynamical systems. Most of the theoretical part, a description of the actual laboratory module PCT 40 and in particular its modules PCT 41 and PCT 42 representing a model of continuous mixer with pH probe. Are described in detail each of the instruments, their functions and connections. Mentioned is itself connected to a computer and software for controlling the model and the measurements and experiments. The practical part describes how to obtain the static and dynamic characteristics of the studied model CSTR. First is described the preparation and measurement setup. The main part is the actual measurement. During the measurements were in the reactor vessel by means of two peristaltic pumps with adjustable flow pumped five percent sodium chloride and pure water. The mixture was continuously stirred using a probe measured the conductivity. A total of six series of measurements. In each series of six measurements were made for a constant flow pump set B and for various settings of the pump flow A.

The resulting data from several randomly selected dynamic characteristics of the system has been used to identify a method of least squares. Identified data was then compared with the measured values. The system was identified as a set of 2. of the order. After the identification of the system it is possible to design a controller. However, this was not the aim of this work.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů* Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-722-5030-2.
- [2] KUNEŠ, Josef, FRANTA, Václav, VAVROCH, Otakar. *Základy modelování*. 1. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1989, 263 s. ISBN 80-03-00147-1.
- [3] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [4] DOSTÁL, Petr. *Matematické modely vybraných technologických procesů: studijní materiál do předmětu Analýza a simulace technologických procesů*. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011.
- [5] DOSTÁL, Petr, MATUŠŮ, Radek. *Stavová a algebraická teorie řízení*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 91 s. ISBN 978-80-7318-991-4.
- [6] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 664 s. ISBN 80-7300-148-9.
- [7] BOBÁL, Vladimír. *Adaptivní a prediktivní řízení*. 1. Vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 136 s. ISBN 978-80-7318-662-3.
- [8] BRÁZDIL, Michal. *Identifikace a řízení tepelného průtokového výměníku*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Prof. Ing. Bobál Vladimír, CSc.
- [9] Manuály k modelu PCT40 od firmy Armfield

Internetové zdroje:

- [10] KUPKA, Libor. *Frekvenční charakteristiky*. [online]. [cit. 2013-3-29]. Dostupné z: http://www.fm.tul.cz/~libor.kupka/Frekvencni_charakteristiky.pdf.
- [11] Humusoft. *Počítačová simulace diskrétních událostí – článek*. [online]. [cit.2013-5-10]. Dostupné z:<http://www2.humusoft.cz/www/archived/pub/fitness/9910/manlig.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

KHCO_3	Hydrogenuhličitan draselný
NaCl	Chlorid sodný
STC	Self-tunning contrllers – samočinně se nastavující regulátory
ODR	Obyčejné diferenciální rovnice
PCT 40	Process kontrol teaching 40
PC	Personalcomputer.
USB	Universal seriál bus
PID	Proporcionálně – integračně - derivační.
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor – průtočný reaktor
a_i	Koeficienty levé strany lineární diferenciální rovnice.
$A(\omega)$	Modul (amplituda) kmitočtového přenosu.
C	Kovarianční matice
b_i	Koeficienty pravé strany diferenciální rovnice
\mathbf{x}	Vektor stavových veličin.
\mathbf{u}	Vektor vstupních veličin.
\mathbf{y}	Vektor výstupních veličin.
DC	Direct current (ang.) = stejnosměrný proud.
e	Regulační odchylka, základ přirozených logaritmů
f	Obecná funkce.
F	Průřez zásobníku na kapalinu.
$g(t)$	Impulsní funkce.
$G(s)$	Přenos regulované soustavy.
$G(j\omega)$	Kmitočtový přenos.
$h(t)$	Přechodová funkce; výška hladiny v zásobníku na kapalinu.

f,g	Nelineární vektorové funkce.
mS	miliSiemens.
E_m	Aktivační energie.
$j=\sqrt{-1}$	Imaginární jednotka.
k	Konstanta ventilu.
kg	Kilogram.
K	Kovarianční funkce.
Kč	Koruna česká.
l	Litr.
M	Stupeň mnohočlenu v čitateli přenosu; metr
mA	Miliampér.
ml	Mililitr.
N	Stupeň mnohočlenu ve jmenovateli přenosu, řád diferenciální rovnice, náhodná porucha.
Min	Minuta
$P(\omega)=\text{Re } G(j\omega)$	Reálná část kmitočtového přenosu.
Q	Objemový průtok kapaliny.
Q_v	Objemový přítok kapaliny.
$Q(\omega)=\text{Im } G(j\omega)$	Imaginární část kmitočtového přenosu.
R	Množina reálných čísel.
S	Sekunda.
S	System.
T	(spojitý) čas.
T	Reálná čtvercová matice.
T_i	Časová konstanta.
U	Akční veličina, vstupní veličina (vstup).

U_m	Vstupní signál modelu.
U_0	Konstantní amplituda.
U	Horní trojúhelníková matice.
V	Volt (elektrické napětí)
v	Porucha.
w	Řídicí veličina.
\hat{x}	Jednoduchý kořen funkce f .
x	Vektor stavových veličin
y	Regulovaná veličina, výstupní veličina (výstup), proměnná v soustavě rovnic.
Y_0	Amplituda výstupního signálu.
θ	Parametr chování systému
ρ	Hustota
$\delta(t)$	Diracův jednotkový impuls.
$\eta(t)$	Heavisideův jednotkový skok.
A	Koeficient přestupu tepla
φ	Fázové posunutí; zapomínající koeficient
$\varphi(\omega)$	Argument (fáze) kmitočtového přenosu.
Ω	Úhlový kmitočet, informace o chování systému
a_1, a_2, b_1, b_2	Parametry přenosu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Postup modelování systému	13
Obr. 2 Experimentální způsob modelování	14
Obr. 3 Analytický způsob modelování	14
Obr. 4 Bilanční rovnice	15
Obr. 5 Princip simulace	17
Obr. 6 Bloková knihovna skulinku	18
Obr. 7 Jednotkový (Heavisideův) skok	21
Obr. 8 Jednotkový (Diracův) impuls	22
Obr. 9 Frekvenční přenos v komplexní rovině	23
Obr. 10 Příklad frekvenční charakteristiky v komplexní rovině	24
Obr. 11 Příklad logaritmické amplitudové a fázové charakteristiky	25
Obr. 12 Laboratorní model PCT 40 s modulem PCT 41	26
Obr. 13 Lisovaný podstavec s vypouštěcím ventilem	27
Obr. 14 Osazení zadního panelu	28
Obr. 15 Osazení předního panelu	28
Obr. 16 Princip peristaltického čerpadla	29
Obr. 17 Peristaltická čerpadla A a B	30
Obr. 18 Propojovací hadice s různými koncovkami	30
Obr. 19 Umístění modulu PCT 41	31
Obr. 20 Nerezová spirála tepelného přenosu	31
Obr. 21 Detail lopatek míchadla a usměřovačů	32
Obr. 22 Detail umístění motoru míchadla	32
Obr. 23 Umístění vodivostní sondy	33
Obr. 24 Vstupy zkoumaných kapalin	33
Obr. 25 Vstup a výstup topné/chladicí spirály	34

Obr. 26 Přepad nádoby reaktoru	34
Obr. 27 Odtok nádoby reaktoru	35
Obr. 28 Program ArmSoft pro ovládání PCT 40	36
Obr. 29 Technologická karta MF624 firmy Humusoft	37
Obr. 30 Simulinkové schéma ovládání přístroje PCT 40	38
Obr. 31 Průtočný chemický reaktor	39
Obr. 32 Statické charakteristiky modelu průtočného směšovače	45
Obr. 33 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 30 %	46
Obr. 34 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 40 %	47
Obr. 35 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 50 %	47
Obr. 36 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 60 %	48
Obr. 37 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 80 %	48
Obr. 38 Dynamická charakteristika pro průtok čerpadla B = 100 %	49
Obr. 39 Struktura adaptivního systému	50
Obr. 40 Identifikovaná data pro výkon B = 30 %; A = 30 %, resp. 100 %	54
Obr. 41 Identifikovaná data pro výkon B = 40 %; A = 30 %, resp. 80 %	54
Obr. 42 Identifikovaná data pro výkon B = 50 %; A = 30 %, resp. 80 %	54
Obr. 43 Identifikovaná data pro výkon B = 60 %; A = 40 %, resp. 100 %	55
Obr. 44 Identifikovaná data pro výkon B = 80 %; A = 50 %, resp. 100 %	55
Obr. 45 Identifikovaná data pro výkon B = 100 %; A = 30 %, resp. 60 %	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technické parametry nádoby reaktoru	35
Tab. 2 Rychlost čerpadel A a B v % přepočítána na průtok $l.min^{-1}$	42
Tab. 3 Ustálené hodnoty vodivosti pro jednotlivé průtoky	44
Tab. 4 Parametry přenosu pro různé výkony čerpadel A a B	53

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Program „vyhodnot_nove.m“

Příloha P II: CD-ROM s elektronickou verzí této práce ve formátu PDF, zdrojová data

PŘÍLOHA PI: PROGRAM „VYHODNOT_NOVE.M“

```
% nova identifikace
clear all
close all
clc

T0 = 1;

load vodivost80na30.mat
y = vodivost;
t = 0:0.1:600;
u = ones(length(y),1)*30;

u=[0;0;u];
y=[0;0;y];
N=length(u);
F=[-y(2:N-1) -y(1:N-2) u(2:N-1) u(1:N-2)];
param=inv(F'*F)*F'*y(3:N);

yid(1:2)=y(1:2);
for i=3:N
    yid(i)=-param(1)*yid(i-1) - param(2)*yid(i-2) + param(3)*u(i-1) + param(4)*u(i-2);
end

figure
t1=[t t(length(t))+T0 t(length(t))+2*T0];
plot(t1,y)
hold on
plot(t1,yid,'k--','LineWidth',2), legend('namerene','originalni',0)
xlabel('x [s]'); ylabel('y [mS]')

data30 = [t1' u y yid'];

save data30.xls data30 -ascii -tabs
```