České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Podpora výuky v laboratoři K23

Praha, 2010 **Autor: David Charvát**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Jindřichovi Fukovi, za náměty, připomínky a rady týkající se vypracování práce a též za ochotu a vstřícnost. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu během studia.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo vypracování výukových materiálů pro laboratorní modely a programovatelné automaty, které se nachází v Laboratoři K23 (Allen-Bradley). Jedná se o modely Vodárny V1 - V4, Vodárny V5 a Vodní elektrárny E1. Byly pořízeny jejich fotografie a zhotoveny popisy, informace pro studenty a zadání pro laboratorní úlohy. Pro budoucí rozšíření byly pro ostatní modely pořízeny fotografie se stručným popisem. Dále byly v rámci práce vytvořeny materiály popisující historii laboratoře a její současné uspořádání. Vše je prezentováno na nově vytvořených webových stránkách laboratoře na serveru Katedry řídicí techniky. Stránky budou sloužit studentům při výuce teorie řízení nejen v základních kurzech bakalářského studia. Většina textů byla přeložena do anglického jazyka.

Abstract

The aim of this thesis is a development of education materials for laboratory models and programmable logic controllers, which are located in the K23 Laboratory (Allen-Bradley). These are models Coupled Tanks V1 - V4, V5 and Water Power Plant E1. Photos were taken and made their descriptions, informations for students and practical exercises instructions. For future extensions were taken photos of other models with a brief description. Furthermore, in the work were developed materials describing the history of the laboratory and its current configuration. Everything is presented in the newly created website on the server of the Department of Control Engineering. Site will serve students in the teaching of control theory, not only in basic courses of bachelor's degree. Most of texts were translated into English.

ČVUT FEL katedra řídicí techniky *Školní rok: 2009/2010*

Návrh zadání bakalářské práce

Pro studenta 3. ročníku: **David Charvát**

Obor: kybernetika a měření

E-mail + telefon: charvdav@fel.cvut.cz, dcharvat2003@quick.cz, 605 709 993

Název tématu (stručně): Podpora výuky v laboratoři K23

Název tématu anglicky: Support of Education in the K23 Laboratory

Práce bude vypracována v jazyce: **českém**

Klíčová slova (3-5): Modelování, fyzikální modely, řízení, Simulink, Matlab, webové stránky

Zásady pro vypracování:
1. Seznamte se s výukovými modely V1 až V5 typu Spojené nádoby – Vodárna jak s odstředivým tak i zubovým čerpadlem, modelem vodní elektrárny a s celkovým uspořádáním laboratoře.
2. Podílejte se na budování webových stránek laboratoře pro podporu výuky teorie řízení a modelování zpracováním popisů, návodů a zadání pro výše uvedené systémy.
3. Struktura stránek by měla umožňovat tři úrovně přístupu: návštěvník bez přihlášení, běžný student předmětu a učitel se speciálním přístupem.
4. Popište též celkové uspořádání laboratoře s umístěním i dalších modelů.
5. Základní popis zajistěte též v anglickém jazyce.

Doporučená literatura: dodá vedoucí práce
(uvádějte, prosím, jméno a příjmení autora, název literatury, místo a rok vydání)

Vedoucí bakalářské práce: ing. Jindřich Fuka

Oponent bakalářské práce: ing. Jana Nováková

…… ……..
podpis odpovědného pracovníka za katedru podpis zadávajícího

Obsah

Seznam obrázků **viii**

Seznam tabulek **ix**

1 Úvod **1**

2 Popis laboratoře K23 **2**

2.1 Laboratoř K23 2

2.2 Historie laboratoře 2

2.3 Plán laboratoře 6

2.4 Tvorba v GIMPu 8

3 Popisy k modelům **9**

3.1 Použití modelů 9

3.2 Vodárny V1 - V4 10

3.2.1 Úvod 10

3.2.2 Schema modelů 11

3.2.3 Popis modelů 13

3.2.4 Informace pro studenty 13

3.2.5 Informace pro učitele 15

3.3 Vodárna V5 17

3.3.1 Úvod 17

3.3.2 Konstrukce modelu 18

3.3.3 Informace pro studenty 19

3.4 Vodní elektrárna E1 20

3.4.1 Úvod 20

3.4.2 Schema modelu 22

3.4.3 Konstrukce modelu 24

3.4.4 Informace pro studenty 25
3.5 Stručný popis k ostatním modelům 26
3.6 Programovatelné automaty 28

4 Webová prezentace **31**
4.1 Základní popis 31
4.2 Systém MediaWiki 32
4.2.1 Příklady práce s MediaWiki 32

5 Závěr **35**

Literatura **37**

A Obsah přiloženého CD **I**

B Příklad zdrojových kódů textů MediaWiki **II**

C Příklad zadání pro laboratorní úlohy **IX**

Seznam obrázků

2.1 Přehledové schema laboratoře z roku 1998 4
2.2 Přehledové schema laboratoře z roku 2002 4
2.3 Plán laboratoře K23 7

3.1 Fotografie modelu Vodárna V1 10
3.2 Schema modelů Vodárna V1 - V4 12
3.3 Fotografie modelu Vodárna V5 18
3.4 Fotografie modelu Vodní elektrárna E1 21
3.5 Schema modelu Vodní elektrárna E1 23
3.6 Příklad z fotografií dalších modelů - Inverzní kyvadlo P1 27
3.7 Fotografie PLC CompactLogix 28

4.1 Ukázka výsledné stránky v MediaWiki - stránka „Vodárny V1 - V4“ . . . 34

Seznam tabulek

3.1 Technické parametry modelu 25

Kapitola 1

Úvod

Cílem této práce je podpořit výuku teorie řízení v laboratoři K23, která se nachází na Katedře řídicí techniky FEL ČVUT se sídlem na Karlově nám. v Praze. Vytvořené materiály jsou k dispozici online na podpůrném webu na adrese
http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Allen-Bradley_Lab .

Práce je rozčleněna do tří částí. První část se věnuje rozvržení laboratoře, popisu jejího vybavení a tvorbě materiálů s tím souvisejících. Laboratoř prošla v roce 2009 celkovou stavební rekonstrukcí, objevily se v ní nové modely a další vybavení. Původní webové stránky laboratoře [1] i další materiály tím pádem přestaly plnit svoji funkci. Vznikla tak potřeba zajistit pro výuku nové podpůrné materiály.

Druhá část obsahuje studijní materiály pro výukové modely V1 až V5 typu spojené nádoby s názvem Vodárna a model Vodní elektrárny E1. Modely V1 až V4 vznikly jako součást diplomové práce Jiřího Hanzlíka [2] jako model řízení výšky hladiny ve spojených nádržích s uzavřeným cyklem. Tyto modely pak důsledně identifikoval a řízení k nim navrhl Miroslav Konopa [3]. Model Vodárna V5 byl využívaný k výuce teorie řízení v laboratoři K23 již od roku 1991, v roce 2008 byla provedena jeho rekonstrukce v rámci bakalářské práce Jozefa Fetterika [4]. Model Vodní elektrárna představuje systém s výrazným a proměnným dopravním zpožděním. Současná verze je výsledkem modernizace staršího modelu Milanem Janečkem [5], kde byly použity stejné prvky jako u systémů Vodáren.

Třetí část tvoří práce souvisí s tvorbou a rozvržením webových stránek ve spolupráci s Michalem Pilným, který zajistil v rámci svojí bakalářské práce technické zázemí pro mnou vytvořené materiály pro prezentaci na internetu.

Kapitola 2

Popis laboratoře K23

2.1 Laboratoř K23

Moderní historii Laboratoře K23 lze datovat od její významné rekonstrukce v roce 1989. Laboratoř od té doby slouží pro výuku teorie řízení a programovatelných automatů. V laboratoři se nachází celá řada laboratorních modelů a programovatelných automatů od firmy Rockwell Automation, na kterých se studenti naučí aplikovat svoje teoretické znalosti a seznámí se s reálnými problémy při řízení. Laboratoř se nachází na Katedře řídicí techniky Fakulty elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze na Karlově náměstí 13 v přízemí budovy E, místnost KN:E-23 a jejím správcem je Ing. Jindřich Fuka.

2.2 Historie laboratoře

Od vzniku předchůdce Katedry řídicí techniky - Katedry měření a automatizace - v roce 1958 sloužila laboratoř pro výuku měřicí a automatizační techniky. Její vybavení odpovídalo době jejího vzniku a docházelo pouze k postupnému nákupu nových přístrojů, analogových počítačů a tvorbě poměrně jednoduchých výukových modelů, převážně servomechanismů. Jako začátek moderní historie laboratoře lze považovat rok 1989, kdy proběhla její kompletní rekonstrukce již pod vedením současného správce Ing. Jindřicha Fuky. Byly zavedeny nové elektrické rozvody, instalována zdvojená podlaha a v té době velmi moderní hliníkové obklady stěn. Zároveň byla vybavena novým nábytkem, který narozdíl od původního uspořádání dovoloval jak seminární, tak i bezpečnou laboratorní

výuku. Zvolená koncepce později umožnila i bezproblémové nasazení počítačů, datového projektoru a dalších zařízení. Laboratoř přežila ve funkční podobě rekonstrukci topení v roce 1993, přechod na třížilový rozvodný systém v roce 1998 a i výměnu oken v roce 2006. Problémy s čistotou hliníkového obložení a dožití zdvojené podlahy vedly k další velké rekonstrukci v roce 2009. Bylo odstraněno obložení, provedena rekonstrukce elektroinstalce, počítačové sítě, položena nová zdvojená podlaha a provedena výměna stolů a části nábytku. Byl též instalován širokoúhlý datový projektor a jako bonus klimatizační jednotka.

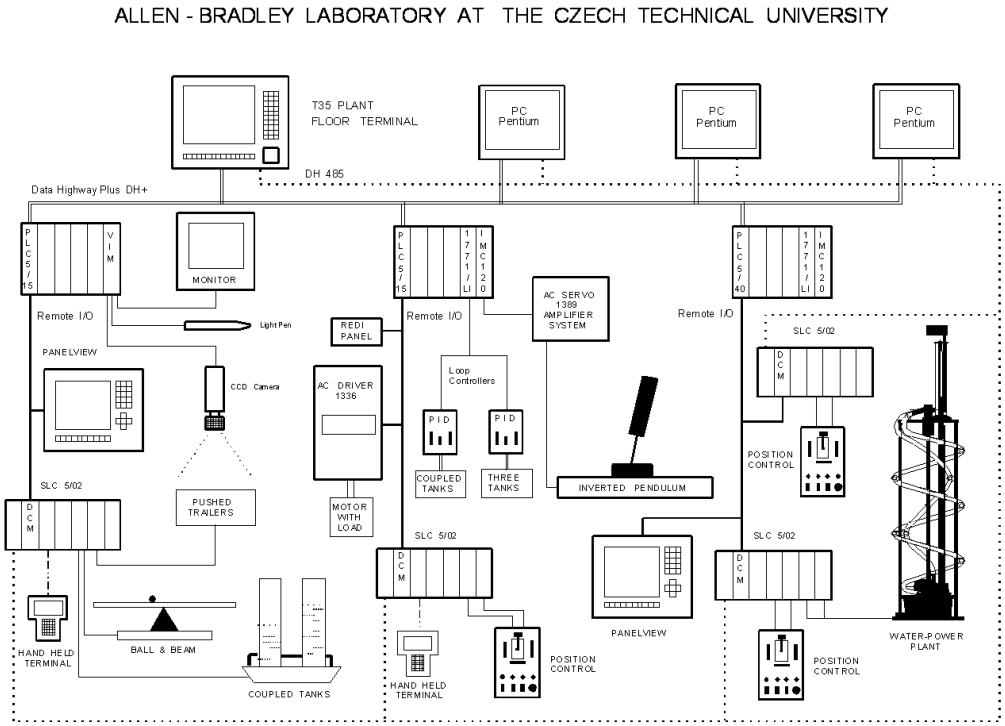
Po roce 1989 dochází též ke vzniku nových výukových laboratorních modelů fyzikálních systémů, jako byly Spojené nádoby (koncepce systému V5), Kulička na tyči a jednoduchých servomechanismů, které byly řízeny a modelovány pomocí analogových školních počítačů Meda50.

V roce 1991 dohodl prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc. spolupráci s americkou firmou Rockwell Automation, která darovala v tomto roce první průmyslové řídicí systémy. Pro svoji vybavenost fyzikálními modely a dobrý stav byla vybrána právě laboratoř K23. Na vlastní instalaci darovaného systému a dalším rozvoji laboratoře se též významně podílel Ing. Richard Šusta, Ph.D. Při slavnostním otevření byla laboratoř nazvána jako Laboratoř Allen-Bradley na ČVUT.

K prvním darovaným automatům kromě jednoduchých přípravků pro logické řízení byly připojeny tyto modely

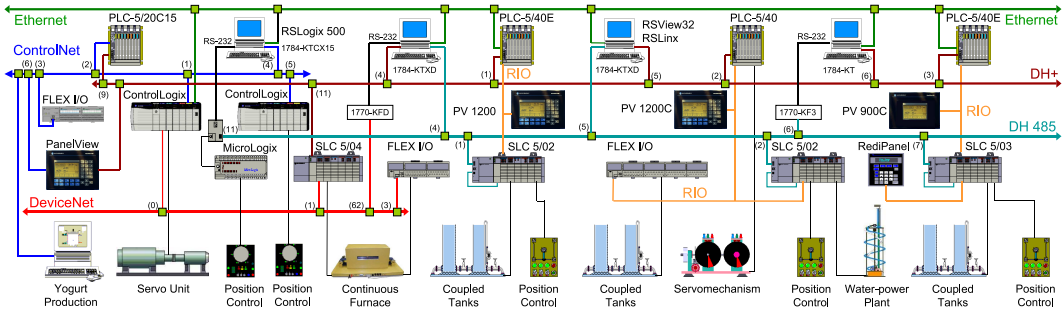
- PLC-5/15 s vizualizačním systémem - model Couvající vozíčky,
- PLC-5/15 se střídavým servosystémem - model Inverzní kyvadlo,
- SLC 500 řídicí systém Kulička na tyči a používaný jako vzdálené RIO vstupy a výstupy pro PLC s vizualizačním systémem,
- SLC 500 řídicí systémy spojených nádob - Vodáren,
- RediPanel, PanelView 1200, 2× číslicový PID regulátor,
- Klasické sítě RIO s DCM moduly v SLC, DH+ a DH 485.

V rámci spolupráce na projektech byla laboratoř vybavována dalšími modely, které byly postupně řízeny pomocí PC s A/D převodníky s využitím programu Matlab s Real Time Toolboxem. Také úspěšně pokračovala spolupráce s firmou Rockwell Automation. Řídicí systémy byly pravidelně přibližně v dvouleté periodě doplňovány.



Obrázek 2.1: Přehledové schema laboratoře z roku 1998

Významný vývojový skok nastal zavedením nových systému typu ControlLogix (3ks) a moderních sítí ControlNet a DeviceNet se vzdálenými vstupy a výstupy v roce 2000 a obměnou počítačového vybavení laboratoře. To umožnilo řídit i simulované modely v prostředí Matlab přímo z programovatelných automatů přes OPC.



Obrázek 2.2: Přehledové schema laboratoře z roku 2002

Do laboratoře byly průběžně přidávány nové modely, které je možné řídit pomocí PC, PLC i manuálně. V poslední době to byly tyto významnější modely:

- 2004 - Řízení modelu soustruhu - demonstrace analogového motion systému. Všechny nové laboratorní modely umožňují kromě ručního řízení i automatické přepínání mezi řízením pomocí PC s Matlabem a Simulinkem a řízením z programovatelného automatu.

- 2004 - Řízení modelu Vznášení s využitím internetu pomocí automatu PLC-5/40E s napojením na Word Wide Web přes RSSql server.

- 2007 - Model průmyslového systému s rychlými servopohony - řízení soustavy servomotorů pomocí servosystému Kinetix 6000 s nadřazeným automatem ControlLogix 5563. Automat dále řídí model inverzního kyvadla.

- 2008 - DCS čtyř modelů spojených nádrží - řízení čtyř modelů vodáren se spojenými nádržemi pomocí DCS systému složeného ze šesti samostatných automatů firmy Rockwell

- 2009 - Řízení modelu rekonstruované vodní elektrárny a modelu servomechanismu pomocí automatu CompactLogix L43

- 2010 - Řízení motorových modelů pomocí frekvenčních měničů, řízení modelu s asynchronním motorem a řízení modelu se servomotorem pomocí frekvenčních měničů PowerFlex 40 a PowerFlex 700S s nadřazeným automatem CompactLogix L32E.

Po celou dobu existence laboratoř těsně spolupracuje s průmyslem. Kromě Rockwell Automation Services s.r.o., Kolín také SPEL s.r.o., Kolín, ControlTech s.r.o., Kolín, ServisControl s.r.o., Kolín a další. V laboratoři se v letech 1995 až 2005 konala v průměru dvě až tři školení ročně, především na automaty PLC-5 a později ControlLogix.

Některá zajímavá a významná školení:

- 1995 - SLC 500 pro 20 učitelů středních škol - podpora aplikace daru

- 1998 - školení učitelů vysokých škol z ČLR v Praze

- 2001 - ControlLogix pro pracovníky Výzkumného střediska Rockwell Automation v Praze

- 2004 - ControlLogix s našimi automaty v Trnavě pro firmu PSA Slovensko

- 2005 - ControlLogix s našimi automaty na Žilinské universitě pro firmu KIA

Aktuálně je laboratoř vybavena patnácti počítači (14 pro studenty + 1 pro učitele) s veškerým potřebným programovým vybavením, čtrnácti laboratorními modely (viz 3), programovatelnými automaty Allen-Bradley řady Logix (viz 3.6) a dalším vybavením (viz 3.6).

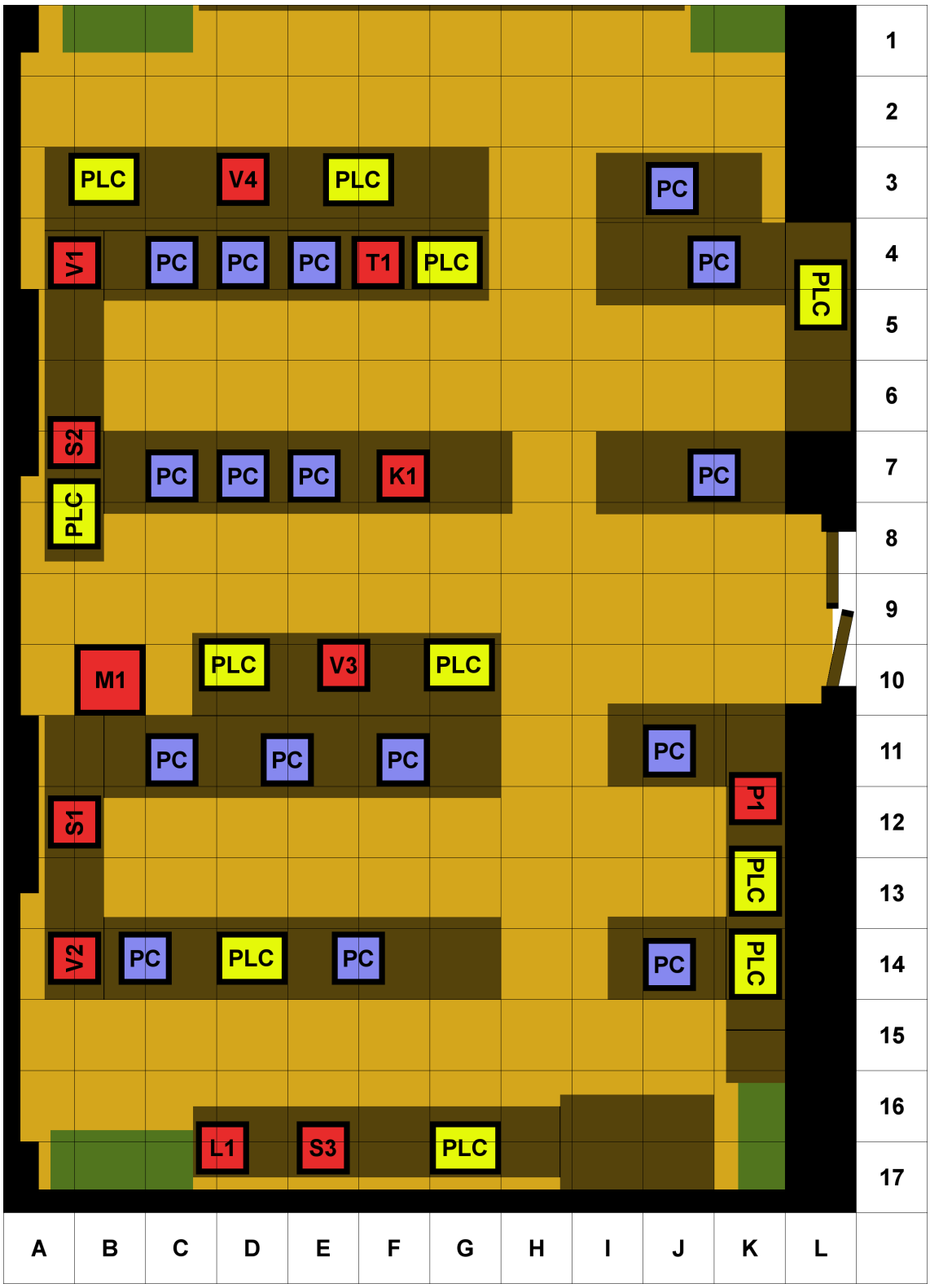
2.3 Plán laboratoře

Plán by měl zajistit orientaci studentů či jiných osob, které navštíví laboratoř. Dále bude využit při evidenci zařízení. Proto obsahuje také mřížku, jejíž sloupce jsou označeny zleva A-L a sloupce shora čísly 1-17. Délka hrany čtverce je 60 cm a odpovídá rozměrům desky podlahy.

Plán je v maximální možné míře vytvořen v měřítku. Veškeré rozměry stolů, skříní, tabule a jejich umístění je zobrazeno s přesností lepší než 10 cm. Pouze modely, počítače a programovatelné automaty jsou naznačeny obdélníkem s černým orámováním a textem. Důvodem je čitelnost plánu - v případě zobrazení v měřítku by nebylo možné tyto prvky adekvátně označit. V plánu nejsou zobrazeny židle u stolů, protože by to ubralo na přehlednosti a žádnou další důležitou informaci nepřidalo.

Popis jednotlivých prvků v plánu:

- PC - modrý blok - pracoviště s počítačem
- PLC - žlutý blok - programovatelný automat
- XY - červený blok - XY je alfanumerický kód každého laboratorního modelu
- tmavě hnědá plocha - pracovní stoly
- světle hnědá plocha - podlaha
- zelená plocha - nábytek
- černá plocha - obvodové zdi



Obrázek 2.3: Plán laboratoře K23

2.4 Tvorba v GIMPu

Celý plán, stejně jako i další grafika, byl vytvořen v programu GIMP - The GNU Image Manipulation Program [12], konkrétně ve verzi 2.6.2. Jedná se o multiplatformní program pro tvorbu a úpravy rastrové grafiky. GIMP je šířen pod licencí GNU GPL [13]. Narozdíl od svého konkurenta Adobe Photoshop je tedy zdarma, přesto nabízí velmi mnoho funkcí, nástrojů, skriptů a filtrů pro práci s grafikou.

Z široké palety funkcí programu jsem využil zejména možnost pracovat kromě standardních rastrových jednotek, pixelů (px), také s milimetry (mm). To bylo výhodné, protože jsem potřeboval zobrazovat většinu zařízení laboratoře v měřítku. Zvolil jsem měřítko 1 : 10, tj. 1 cm ve skutečnosti odpovídá 1 mm v obrázku při jeho rozlišení 72 DPI.

Další velmi užitečnou fukncí bylo zobrazení mřížky. GIMP umožňuje nastavit šířku a výšku rozestupu čar mřížky i posun v obou osách v několika jednotkách. Pomocí funkce „Uchytit k mřížce“ se vybraný objekt uchytí při pohybu v těsném okolí mřížky k ní. To usnadňuje vyrovnávání objektů do jedné linie.

Jedním z nejsilnějších nástrojů GIMPu jsou vrstvy. Ty umožňují nezávislou práci s jednotlivými částmi obrazu. Vrstvy jsou uspořádány nad sebou jako fólie, které jsou nativně průhledné. V případě plánu laboratoře (obr. 2.3) jsem celý obrázek rozčlenil do čtyř vrstev:

1. **Mřížka**, kde je vykreslená mřížka 60×60 cm přes celý obrázek.
2. **Zařízení**, kde jsou umístěna znázornění počítačů, laboratorních modelů a programovatelných automatů. To je jediná vrstva, která nemůže být v měřítku.
3. **Nábytek** obsahuje pracovní stoly, tabuli a skříně.
4. **Podlaha** je spodní vrstvou, která obsahuje kromě vlastní podlahy obvodové zdi s dveřmi a výklenky oken a také písmena a čísla pro určení lokace dle mřížky.

Takové rozčlenění umožní snadné editování obrázku například v případě manipulace s libovolným zařízením laboratoře v budoucnosti. Zdrojový soubor obrázku v nativním formátu XCF je spolu s instalací programu GIMP umístěn CD, které je součástí této bakalářské práce. Tento formát ale nelze na webových stránkách použít, je nutné obrázek uložit v jiném formátu. Formát GIF je zastaralý, JPG je určený zejména pro fotografie a tak je nejvhodnější použití formátu PNG, který je bezztrátový a obsahuje alfa-kanál (průhlednost).

Kapitola 3

Popisy k modelům

Všechny materiály k jednotlivým modelům jsou odkazovány na stránce „Laboratorní modely“. Na ní se nachází obecný úvod společný pro všechny modely, jejich stručný popis a fotografie. Stručný popis a fotografie jsem vytvořil ke všem modelům, které se nachází v laboratoři K23. K modelům Vodáren V1 - V4, Vodárny V5 a Vodní elektrárny E1 jsem pak napsal i detailní popis.

Pro popis modelů Vodáren V1 - V4 jsem použil informace z [3], pro Vodárnu V5 z [4] a Vodní elektrárnu E1 z [5]. Texty byly sestaveny a upraveny tak, aby byly vhodné k prezentaci na webových stránkách. Tyto texty jsou napsány ve značkovacím jazyce MediaWiki v kombinaci s HTML jazykem. Jsou umístěny na přiloženém CD a příloze B je uvedena jejich ukázka. Zadání laboratorních úloh byla vytvořena na základě dosud používaných zadání [16] a informací z výše citovaných prací. Použil jsem šablonu Jiřího Roubala z [11], aby všechna stávající i nová zadání měla jednotný vzhled.

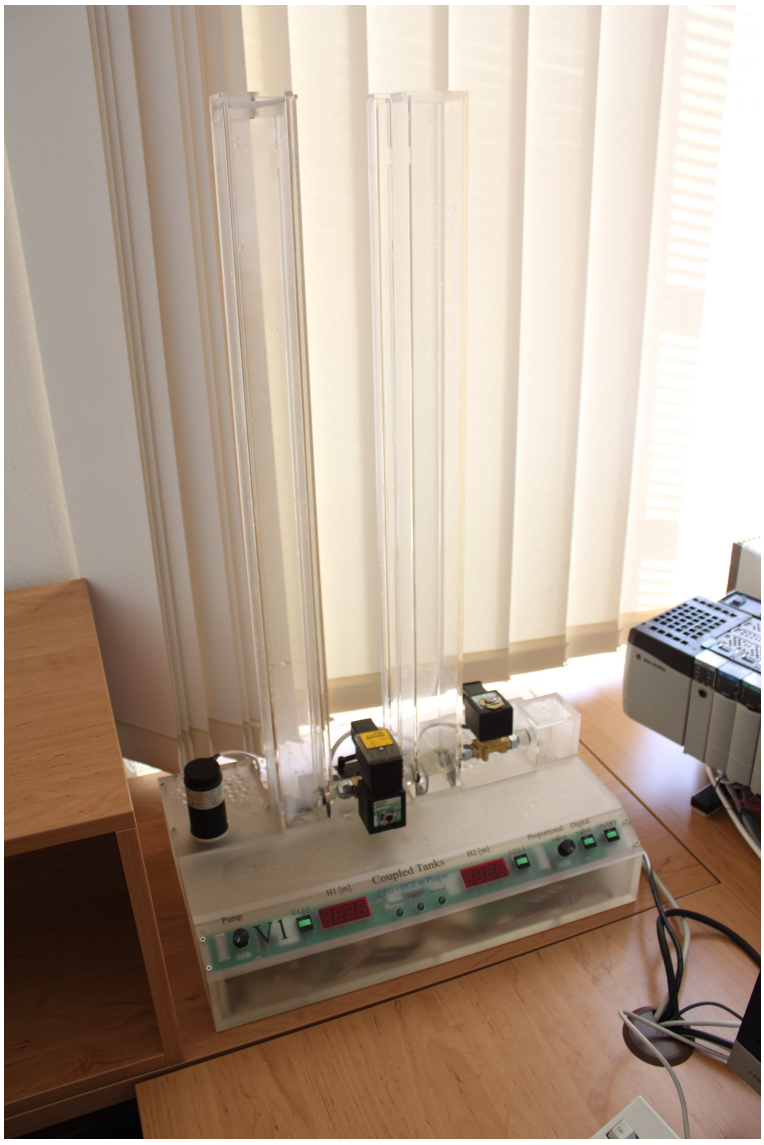
3.1 Použití modelů

Laboratorní modely slouží k podpoře výuky modelování a řízení dynamických systémů. Jsou použity jak v základních kurzech bakalářského studia pro výuku identifikace a řízení pomocí klasických regulátorů (PID, stavový regulátor), tak umožňují i demonstraci moderních metod řízení (např. LQ, LQG a MPC regulátory). Modely lze ovládat a řídit přímo z připravených simulinkových schemat s využitím programů Matlab, Simulink a Real Time Toolbox nebo pomocí programovatelných automatů Rockwell Automation.

3.2 Vodárny V1 - V4

3.2.1 Úvod

Laboratorní modely Vodárna V1 až V4 vznikly jako součást diplomové práce Jiřího Hanzlíka [2] v roce 2008 jako model řízení výšky hladiny ve spojených nádržích s uzavřeným cyklem. Modely simulují v praxi se nacházející systémy v petrochemickém, potravinářském i jiném průmyslu nebo ve vodním hospodářství.

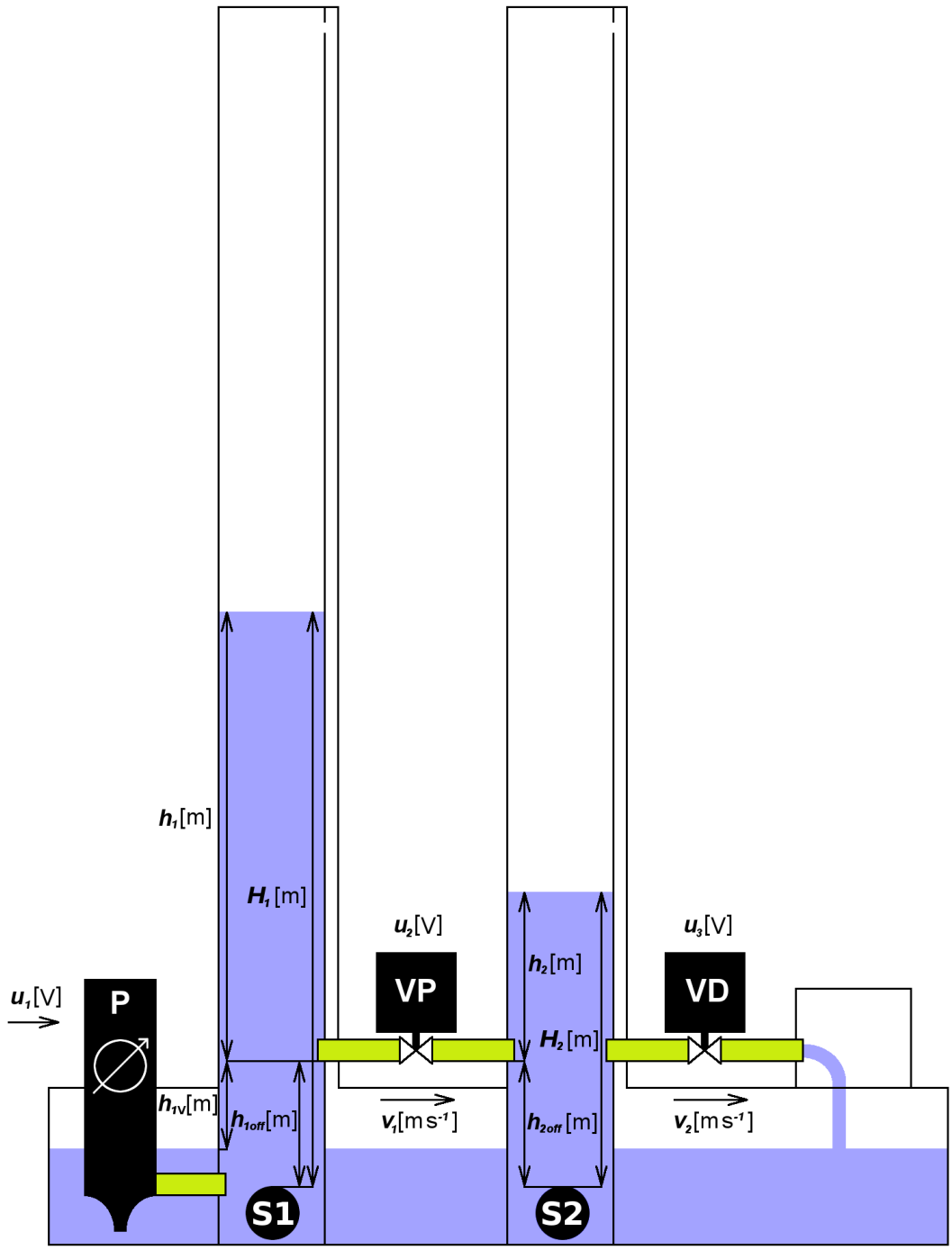


Obrázek 3.1: Fotografie modelu Vodárna V1

3.2.2 Schema modelů

Nově vytvořené schema Vodáren je nakresleno v měřítku, kromě výšky nádrží. Konfigurace ventilů (střední ventil mezi nádržemi proporcionální a výtokový ventil digitální) odpovídá modelům V1 a V2, u modelů V3 a V4 je to naopak. Studenti jsou na to upozorněni v sekci „Informace pro studenty“ na stránce popisující modely. Nyní následují vysvětlivky jednotlivých částí.

- P - čerpadlo (z angl. Pump)
- VP - ventil proporcionální
- VD - ventil digitální
- S1 a S2 - senzory výšky hladiny v jednotlivých nádržích
- u_1 [V] - vstupní napětí čerpadla
- u_2 [V] - míra otevření proporcionálního ventilu
- u_3 [V] - otevření/zavření digitálního (dvoupolohového) ventilu
- v_1 [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] - rychost proudění vody mezi nádržemi
- v_2 [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] - rychost proudění vody z pravé nádrže zpět do zásobníku
- H_1 [m] a H_2 [m] - výšky hladin v jednotlivých nádržích změřené tlakovými senzory
- h_1 [m] a h_2 [m] - výšky hladin v jednotlivých nádržích měřené od dna trubek ventilů
- h_{1off} [m] a h_{2off} [m] - výšky dna trubek ventilů nad senzory
- h_{1V} [m] - rozdíl mezi hladinou v zásobníku a výškou dna trubky ventilu



Obrázek 3.2: Schema modelů Vodárna V1 - V4

3.2.3 Popis modelů

Laboratorní model je složen z odstředivého čerpadla, dvou věží, dvou ventilů a spodního zásobníku vody. Je osazen řídicím panelem, který umožňuje manuální ovládání a zobrazuje na LCD displejích výšky hladin jednotlivých nádrží. Je na něm též signalizace zapnutí ovládání pomocí Matlabu se Simulinkem a Real Time Toolboxem nebo řízení programovatelným automatem (PLC).

Čerpadlo čerpá ze zásobníku vodu do první (levé) nádrže, odkud může téct dále přes střední ventil do druhé (pravé) nádrže. Za druhou nádrží se nachází výtokový ventil, přes který může voda téct zpět do zásobníku. Čerpadlo se chová jako zdroj tlaku a neumožňuje odčerpávání vody zpět do zásobníku (je tedy jednosměrné). Vstupní veličinou je vstupní napětí čerpadla u_1. Součástí modelu jsou tlakové senzory pro snímání výšky hladin h_1 a h_2, které jsou ve spodní části každé nádrže. Analogové signály jsou v rozsahu 0 až 10 V, pro použití v Matlabu/Simulinku jsou převedeny zásuvnou kartou v PC na bezrozměrná čísla v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$.

3.2.4 Informace pro studenty

- **Obecné informace**
  - Jedná se o nelineární systém se statickým charakterem chování.
  - Všechny čtyři modely mají shodné rozměry a jsou osazeny stejnými prvky, ale mají záměrně upravenou dynamiku tak, aby nebylo možné použít hodnoty naměřené na jednom modelu na jiném.
  - Konfigurace ventilů: modely V1 a V2 mají střední ventil mezi nádržemi proporcionální (VP) a výtokový ventil digitální (VD). U modelů V3 a V4 je to naopak.
  - Pro základní řízení (kurzy SAM/SRI a připravovaný ARI) jsou oba ventily při identifikaci i regulaci naplno otevřené.
  - Vodárny je možné řídit pomocí:
    1. Programovatelného automatu (PLC)
    2. Matlabu
    3. Manuálně

  - Pořadí vyjadřuje prioritu řízení, tj. nejnižší prioritu má manuální ovládání. Pokud je aktivováno řízení s vyšší prioritou, automaticky převezme kontrolu nad modelem.

- **Pokyny pro práci s modelem**

  - Čerpadlo nesmí běžet bez vody - hrozí nebezpečí zničení!
  - Pozor na případné přetečení válců - mají sice přepady, ale mohou se zahltit.
  - Po skončení měření pomocí ovládacího Simulinkového modelu by mělo dojít k zastavení čerpadel a vypnutí modelu. Pokud se tak nestane, vypněte napájení modelu nebo zkuste ještě jednou spustit model v Simulinku a znovu jej zastavit.

- **Vstupy**

  - Vstupní napětí čerpadla u_1 [V] - **řídicí veličina pro SISO model**
  - Míra otevření proporcionálního ventilu u_2 [V]
  - Otevření/zavření digitálního (dvoupolohového) ventilu u_3 [V]

- **Výstupy**

  - výška hladiny v první (levé) nádrži h_1 [m]
  - výška hladiny v druhé (pravé) nádrži h_2 [m] - **regulovaná veličina pro SISO model**

- **Užitečné vztahy**

  Závislost ideální výtokové rychlosti kapaliny v [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] na výšce hladiny h [m] je možné odvodit z Bernoulliho rovnice při uvažování laminárně stacionárního proudění a zanedbání ztrát jako

$$v(t) = \sqrt{2\,g\,h(t)}\ . \tag{3.1}$$

  Množství vytékající kapaliny je dáno průřezem otvoru S_c a průměrnou výtokovou rychlostí v_p, která závisí na tvaru otvoru a viskozitě kapaliny.

Tlak p [Pa] daný odstředivým čerpadlem je přímo úměrný kvadrátu jeho napětí u [V], čili

$$p(t) = k\,u^2(t)\ . \tag{3.2}$$

3.2.5 Informace pro učitele

Tato část je upravena z [3]. Výška hladiny h_1 [m] v 1. nádrži je měřena od dna trubek ventilů a získáme ji jako $h_1 = H_1 - h_{1off}$, kde H_1 [m] je výška udávaná senzorem a h_{1off} [m] je výška dna trubek změřená senzorem. Obdobně platí totéž pro h_2.

Vycházíme z Bernoulliho rovnice

$$\frac{1}{2}\,\rho v^2 + p + \rho g h = \text{konst.}\ [\mathrm{kg\,m^{-3}}, \mathrm{m\,s^{-1}}, \mathrm{Pa}, \mathrm{m\,s^{-2}}, \mathrm{m}] \tag{3.3}$$

kde ρ je hustota kapaliny, v je rychlost kapaliny, p je působící tlak, g je tíhové zrychlení kapaliny a h je výška hladiny.

- **Přítok 1. nádrže**

  Odstředivé čerpadlo se chová jako zdroj tlaku. Je nutné započítat mrtvé pásmo mezi nulovým napětím a napětím rozběhu čerpadla u_{off} [V], převodní konstantu vyjádříme pomocí koeficientu k_{1x} [$\mathrm{Pa\,V^{-2}}$] a ztráty dané viskozitou kapaliny jsou zahnuty v k_{z2} [−]. pak je

$$p(t) = k_{1x}\,\underline{1}(u(t) - u_{off})\,(u(t) - u_{off})^2\ . \tag{3.4}$$

  Ztráty zahrneme do koeficientu k_{z1}. Případ, kdy při snížení napětí na čerpadle se kapalina vrací zpět do nádrže přes čerpadlo až do vyrovnání tlaku, ošetříme pomocí funkce signum. Využitím vzorce pro průtok potrubím o známém průřezu S_c a rychlosti proudění kapaliny v ($q = S_c \cdot v$) získáme přítok 1. nádrže jako

$$q_{i1}(t) = k_{z1} S_c \operatorname{sign}\left(\frac{k_{1x}\,\underline{1}(u(t) - u_{off})\,(u(t) - u_{off})^2}{\rho} - g(h_1(t) + h_{1V})\right) \cdot \sqrt{\left|2\left(\frac{k_{1x}\,\underline{1}(u(t) - u_{off})\,(u(t) - u_{off})^2}{\rho} - g(h_1(t) + h_{1V})\right)\right|} \tag{3.5}$$

- **Výtok 1. nádrže** (totožný s přítokem 2. nádrže)

Studenti mají k dispozici vztah (3.1). Směr toku je určen tím, ve kterém válci je hladina kapaliny vyšší, to můžeme vyjádřit pomocí funkce signum. Dále je třeba ošetřit, že voda z první nádrže může vytékat, jen když je nad úrovní spodního okraje přepouštěcího ventilu. Na to použijeme Heavisideovu funkci $\underline{1}(t)$. Výtok z 1. nádrže a současně přítok do 2. nádrže bude tedy

$$q_{o1}(t) = q_{i2}(t) = k_{z3} S_p \,\mathrm{sign}\,(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{|2\,g\,(h_1(t)\underline{1}(h_1) - h_2(t))|}\;, \tag{3.6}$$

kde S_p je průřez potrubí mezi nádržemi.

- **Výtok z 2. nádrže**

  Využijeme opět rovnici (3.1) a získáme

$$q_{o2}(t) = k_{z4} S_v \sqrt{2\,g\,h_2(t)}\;. \tag{3.7}$$

- **Diferenciální rovnice**

  Objem první nádrže V_1 [m^3] lze vyjádřit jako $V_1 = S_1\,h_1$, kde S_1 [m^2] je průřez nádrže. Potom změna objemu kapaliny v nádrži dV je dána rozdílem mezi přítokem kapaliny a jejím výtokem.

$$\frac{\mathrm{d}V_1}{\mathrm{d}t} = S_1 \frac{\mathrm{d}h_1}{\mathrm{d}t} = q_{i1}(t) - q_{o1}(t)\;. \tag{3.8}$$

  Pro získání diferenciální rovnice druhé nádrže postupujeme obdobně. Do těchto rovnic dosadíme hodnoty průtoků (3.5), (3.6) a (3.7) a získáme soustavu dvou diferenciálních rovnic popisujících celý systém:

$$\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}h_1}{\mathrm{d}t} &= k_0 \,\mathrm{sign}\left(k_1\,\underline{1}(u(t) - u_{off})\,(u(t) - u_{off})^2 - (h_1(t) + h_{1V})\right) \cdot \\
&\cdot \sqrt{|k_1\,\underline{1}(u(t) - u_{off})\,(u(t) - u_{off})^2 - (h_1(t) + h_{1V})|} - \\
&- k_{px}\,\mathrm{sign}\,(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{|h_1(t)\underline{1}(h_1) - h_2(t)|}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\frac{\mathrm{d}h_2}{\mathrm{d}t} = k_{px}\,\mathrm{sign}\,(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{|h_1(t)\underline{1}(h_1) - h_2(t)|} - k_{vx}\sqrt{h_2(t)}\;, \tag{3.10}$$

kde

$$k_0 = k_{z1} \frac{S_c}{S_1} \sqrt{2g} \tag{3.11}$$

$$k_1 = k_{z2} \frac{k_{1x}}{\rho g} \tag{3.12}$$

$$k_{px} = k_{z3} \frac{S_p}{S_1} \sqrt{2g} \tag{3.13}$$

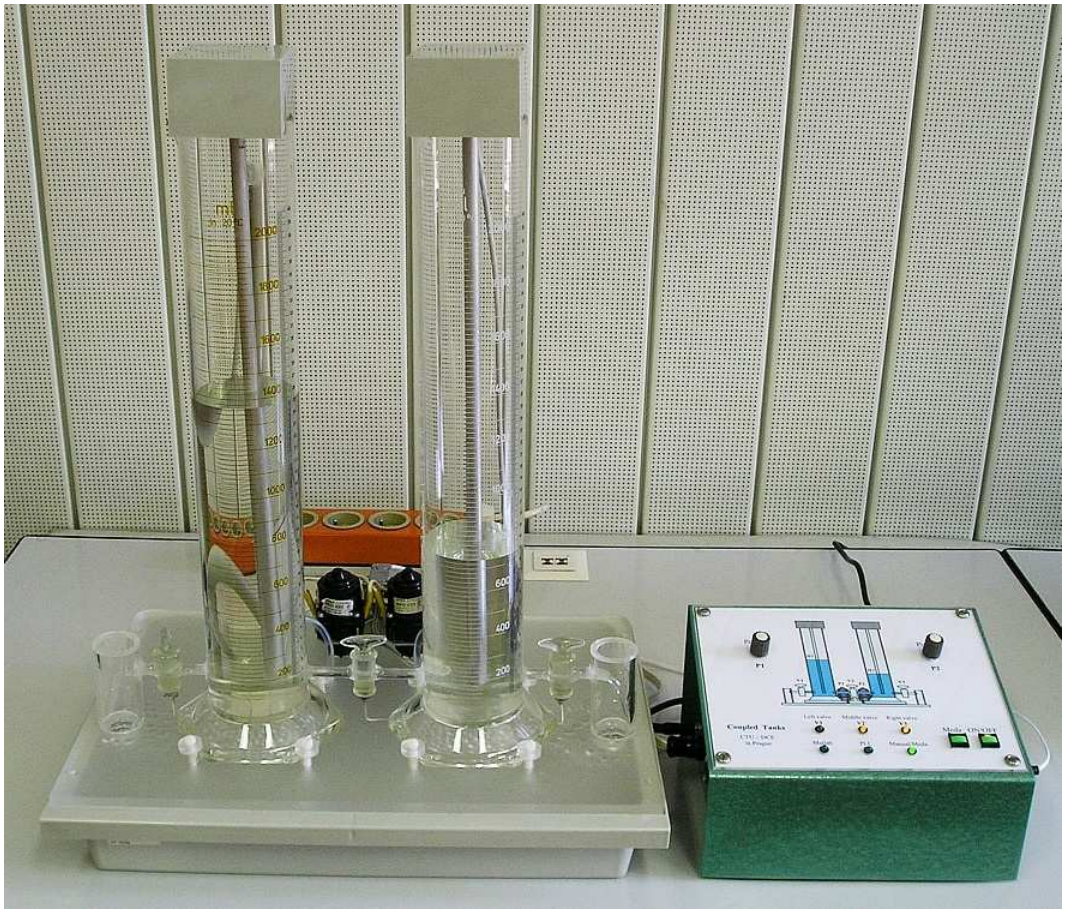
$$k_{vx} = k_{z4} \frac{S_v}{S_1} \sqrt{2g} \tag{3.14}$$

Koeficienty k_{z1} až k_{z4} jsou ztrátové činitele.

3.3 Vodárna V5

3.3.1 Úvod

Laboratorní model Vodárna V5 byl využívaný k výuce teorie řízení v laboratoři K23 od roku 1991. V roce 2008 byla provedena jeho rekonstrukce v rámci bakalářské práce Jozefa Fetterika [4]. Model je tvořen dvěma nádržemi navzájem propojenými ventilem. Ke každé nádrži je připojeno jedno zubové čerpadlo, výpustní ventil z nádrže do rezervoáru a senzor na měření výšky hladiny. K řízení bylo možné využít PC, programovatelný automat, analogový počítač Meda nebo manuální ovládání.



Obrázek 3.3: Fotografie modelu Vodárna V5

3.3.2 Konstrukce modelu

- **Hlavní část konstrukce**

  Jako nádrže jsou použity odměrné válce s průměrem 85 mm a objemem cca 2 litry. Ty jsou přichyceny šroubem k desce z plexiskla a ta je připevněna k rezervoáru vody. Rezervoár je vytvořen z plastové vaničky o objemu cca 6 litrů a je na něm postaven celý model. Jako pracovní kapalina se používá destilovaná voda, která je snadno dostupná, není agresivní a nepoškozuje model tvorbou usazenin.

- **Ventily a čerpadla**

  Použité ventily jsou skleněné manuální pro chemické laboratoře. Jeden ventil je umístěn mezi nádržemi, další dva slouží jako výpustní ventily z nádrží. Ventily jsou

vybaveny jazýčkovými kontakty od firmy Meder, které slouží k indikaci, zda je ventil otevřen nebo uzavřen.

Pro dopravu vody z rezervoáru do nádrží jsou použity zubová čerpadla firmy Tesla Litovel. Každá nádrž je vybavena vlastním čerpadlem. Napájecí napětí čerpadla je 12V, příkon 50W.

- **Senzory a řídicí jednotka**

  K určení výšky hladiny jsou použity kapacitní sondy. Jejich elektronika je umístěna v plastových pouzdrech na odměrných válcích. K ní je připojen vlastní koaxiální kondenzátor uvnitř válců. Řídicí jednotka umožňuje volbu mezi řízením z Matlabu, PLC, analogovým počítačem Meda a manuálním ovládáním. Pomocí ovládacího panelu se model zapíná a vypíná, lze ho ovládat manuálně pomocí potenciometrů a dále panel slouží k indikaci stavu modelu.

3.3.3 Informace pro studenty

Výšky hladin h_1 [m] a h_2 [m] měřené kapacitními sondami jsou pro použití v Matlabu a Simulinku převedeny na bezrozměrná čísla v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, stejně tak vstupní napětí čerpadel u_1 [V] a u_2 [V]. Čerpadla mohou jen čerpat do nádrží a neumožňují odčerpávání. Při odvození fyzikálního popisu můžeme zanedbat dynamiku čerpadla, předpokládáme jeho dokonalou těsnost a že velikost přítoku nezávisí na výšce hladiny vody v nádrži. Pásmo necitlivosti ale v úvahu brát musíme.

Při identifikaci systém uvažujeme jako SISO, kde vstupem je napětí u_1 a výstupem výška hladiny h_2. Vypouštěcí ventil z levé nádrže je zavřený, zbylé dva naplno otevřené. Množství vody tekoucí z levé do pravé nádrže je úměrné odmocnině rozdílu výšek hladin. Množství vytékající kapaliny je dáno průřezem otvoru S a průměrnou výtokovou rychlostí v_p, která závisí na tvaru otvoru a viskozitě kapaliny.

- **Vstupy**
  - Vstupní napětí 1. čerpadla u_1 [V]
  - Vstupní napětí 2. čerpadla u_2 [V]
  - Míra otevření ventilu V1 u_{V1} [−]
  - Míra otevření ventilu V2 u_{V2} [−]
  - Míra otevření ventilu V3 u_{V3} [−]

- **Výstupy**
  - výška hladiny v první (levé) nádrži h_1 [m]
  - výška hladiny v druhé (pravé) nádrži h_2 [m]
- **Užitečné vztahy**

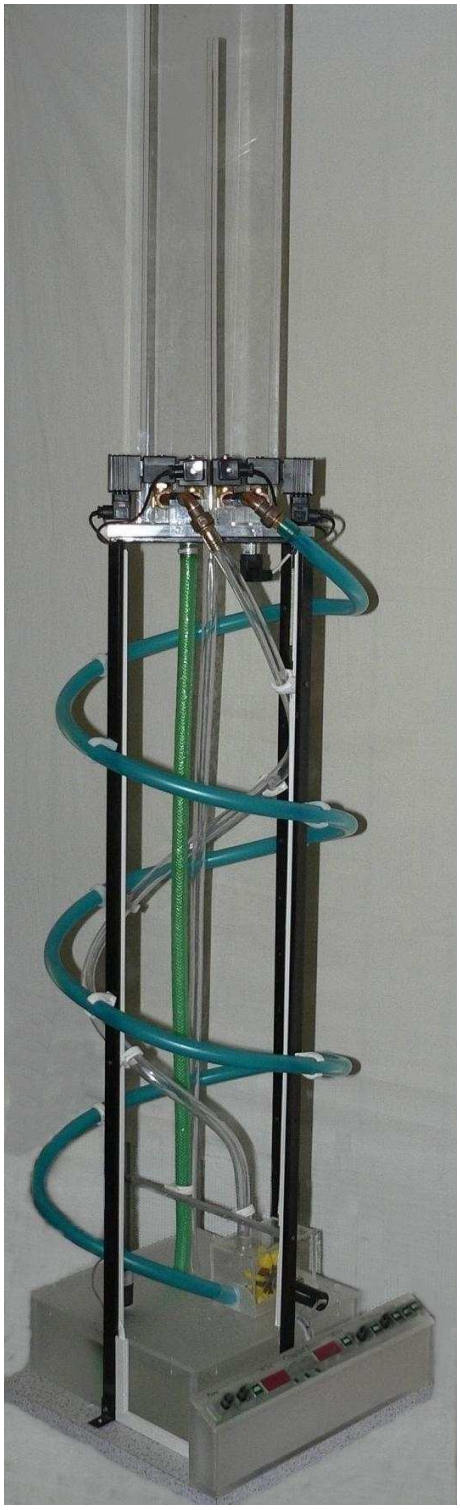
  Ideální rychlost výtoku kapaliny v [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] na výšce hladiny h [m] je možné odvodit z Bernoulliho rovnice při uvažování laminárně stacionárního proudění a zanedbání ztrát jako (3.1). Množství vytékající kapaliny je dáno průřezem otvoru S a průměrnou výtokovou rychlostí v_p, která závisí na tvaru otvoru a viskozitě kapaliny. Průtok q [$\mathrm{m^3\,s^{-1}}$] daný zubovým čerpadlem je přímo úměrný jeho napětí u [V], čili

$$q(t) = k\,u(t)\ . \tag{3.15}$$

3.4 Vodní elektrárna E1

3.4.1 Úvod

Model Vodní elektrárna vznikl jako model systému s výrazným a proměnným dopravním zpožděním modernizací staršího modelu Milanem Janečkem v roce 2007 [5].

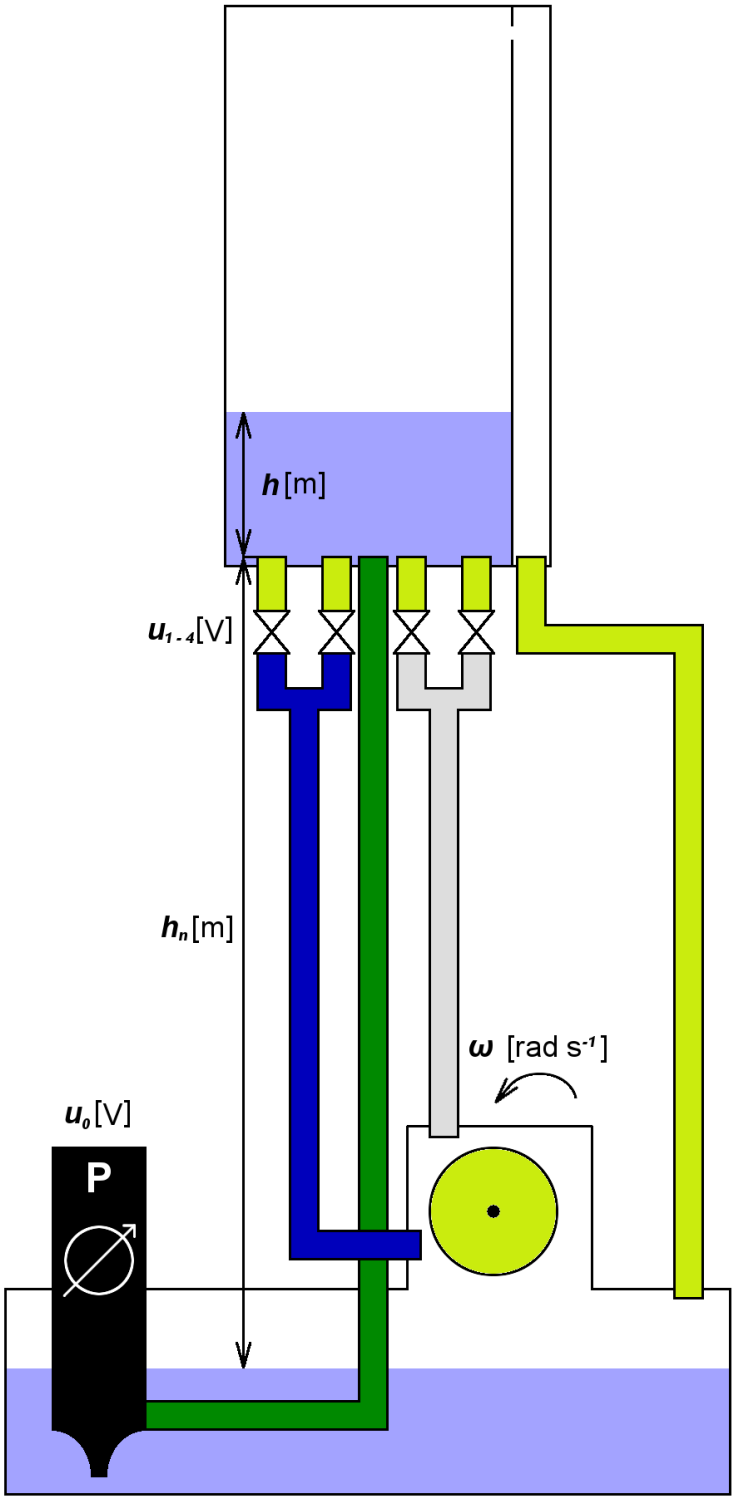


Obrázek 3.4: Fotografie modelu Vodní elektrárna E1

3.4.2 Schema modelu

Nově vytvořené schema respektuje skutečný vzhled modelu, ale pro názornost je zjednodušeno kvůli přehlednosti. Nyní následují vysvětlivky jednotlivých částí.

- u_0 [V] - vstupní napětí čerpadla
- u_1 a u_2 [V] - míra otevření proporcionálního ventilu
- u_3 a u_4 [V] - otevření/zavření digitálního (dvoupolohového) ventilu
- ω [rad s^{-1}] - úhlová rychlost turbínky
- h [m] - výška hladiny v horní nádrži
- h_n [m] - výškový rozdíl mezi úrovní hladiny v dolní nádrži a dnem trubek ventilů v horní nádrži



Obrázek 3.5: Schema modelu Vodní elektrárna E1

3.4.3 Konstrukce modelu

- **Hlavní část konstrukce**

  Tělo modelu tvoří spodní deska z imitace mramoru a kostra z ocelových jeklů. Na spodní desce je umístěn rezervoár s objemem 16 l, na něm odstředivé čerpadlo, které čerpá vodu do horní nádrže a soustrojí turbínka - tachodynamo, které slouží jako model Peltonovy turbíny. Vpředu je osazen řídicím panelem, který umožňuje manuální ovládání a signalizuje zapnutí ovládání pomocí Matlabu se Simulinkem a Real Time Toolboxem nebo programovatelným automatem (PLC). Ke spodní desce je také připevněna plastová krabička, která obsahuje elektroniku modelu.

  Na ocelové kostře je upevněno osvětlení, tvořené LED modulem a hadice. Uprostřed vede zelená hadice, která slouží pro čerpání vody do horní nádrže a průhledná, která vede z přepadu horní nádrže. Na bočních jeklech jsou upevněny dvě výtokové hadice vedoucí vodu z horní nádrže na turbínku. Modrá je dlouhá, bílá je kratší.

  V horní části je umístěna nádrž o objemu 10 l. Voda se může dostat zpět do dolní nádrže přímo přepadem nebo přes čtveřici ventilů, dva jsou digitální a dva proporcionální. Každá dvojice ventilů (jeden digitální a jeden proporcionální) vede do jedné z výtokových hadic. Ve spodní části horní nádrže je umístěn tlakový snímač výšky hladiny. Celková výška modelu je 2,3 m.

- **Čerpadlo**

  Čerpadlo slouží k transportu vody ze spodního rezervoáru do horní nádrže. Čerpadlo je odstředivé a chová se jako zdroj tlaku. Tlak daný odstředivým čerpadlem je přímo úměrný kvadrátu jeho napětí.

- **Soustrojí turbínka-tachodynamo**

  Soustrojí turbínka-tachodynamo simuluje soustrojí turbína-generátor v reálné vodní elektrárně. V případě turbínky se jedná o napodobení Peltonovy turbíny. Stejnosměrné dynamo neslouží pro výrobu elektrické energie jako v realitě, ale k měření otáček turbínky.

- **Řízení a elektronika**

  Elektrická část pracuje s bezpečným napájením 24 V. Model lze ovládat prioritně třemi způsoby. Nejvyšší prioritu má programovatelný automat, pak PC a nejmenší manuální ovládání. Pokud je aktivováno řízení s vyšší prioritou, tak automaticky převezme kontrolu nad modelem.

Manuální ovládání je možné z řídicího panelu, u kterého je umístěn LED displej, který zobrazuje výkon čerpadla a výšku hladiny v horní nádrži a dále bargrafy pro orientační informaci o míře otevření proporcionálních ventilů.

Všechny ovládací signály zpracovává řídicí jednotka, jejíž základ tvoří procesor PIC.

3.4.4 Informace pro studenty

- **Parametry modelu**

Napájecí zdroj	XP Power 24 V
Celková výška modelu	2,3 m
Objem dolní nádrže	16 l
Objem horní nádrže	10 l
Výška horní nádrže	0,9 m
Výška spádu	1,25 m
Výška výtoku nad hladinou zásobníku h_n	1,35 m
Délka modré hadice	4,7 m
Délka bílé hadice	1,6 m
Výtokový průměr proporcionálního ventilu	7 mm
Výtokový průměr digitálního ventilu	5,6 mm
Konstanta tachodynama	2 V/1000 ot/min
Časové konstanty filtru	$2, 20, 200, 2000$ ms

Tabulka 3.1: Technické parametry modelu

- **Vstupy**
  - Vstupní napětí čerpadla u_0 [V] - **řídicí veličina pro SISO model**
  - Míra otevření proporcionálních ventilů u_1, u_3 [V]
  - Míra otevření digitálních ventilů u_2, u_4 [V]
- **Výstupy**
  - Výška hladiny v horní nádrži h [m]
  - Napětí na svorkách tachodynama u_t [V]

- **Užitečné vztahy** Závislost ideální rychlosti výtoku kapaliny v [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] na výšce hladiny h [m] je možné odvodit z Bernoulliho rovnice při uvažování laminárně stacionárního proudění a zanedbání ztrát jako

$$v(t) = \sqrt{2\,g\,h(t)}\ . \tag{3.16}$$

Množství vytékající kapaliny je dáno průřezem otvoru S a průměrnou výtokovou rychlostí v_p, která závisí na tvaru otvoru a viskozitě kapaliny.

U ventilů uvažujte, že kapalina vyplňuje celý jejich průřez, narozdíl od přívodních hadic, kde proudí volně ve spodní části hadice. Předpokládejte, ze voda se v potrubí pohybuje rovnoměrně zrychleným přímočarým pohybem. Závislost dopravního zpoždění kapaliny v potrubí na vstupní rychlosti aproximujte polynomem 2. řádu.

Napětí na tachodynamu je přímo úměrné jeho úhlové rychlosti. Kvůli většímu kolísání otáček je připojen filtr 1. řádu se zesilovačem, který zajišťuje filtrování prudkých změn napětí na turbínce.

Na turbínku se lze dívat jako na Peltonovu turbínu. Za předpokladu, že nebudeme uvažovat tíhu kapaliny a tření, můžeme moment působící na rotor stanovit z věty o změně momentu hybnostního toku k ose rotace o. Na velikosti momentů se podílejí pouze průměty absolutních rychlostí do směru obvodové rychlosti.

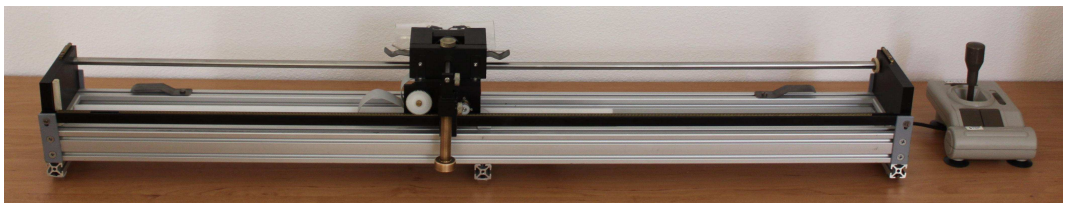
Momentová rovnice pro celé točivé soustrojí turbínka tachodynamo je dána

$$M(t) = J\,\frac{\mathrm{d}\omega(t)}{\mathrm{d}t}\ + B\omega(t) + M_m\ , \tag{3.17}$$

kde B [$\mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}$] je tlumení soustrojí, J [$\mathrm{kg\,m^2}$] moment setrvačnosti celého soustrojí, M_m [Nm] pasivní moment soustrojí způsobený třením a jinými ztrátami.

3.5 Stručný popis k ostatním modelům

Ke zbývajícím modelům a programovatelným automatům jsou připraveny fotografie se stručným popisem. Předpokládá se další rozšíření obsahu. Na webových stránkách je pro to již vytvořena struktura.



Obrázek 3.6: Příklad z fotografií dalších modelů - Inverzní kyvadlo P1

- **Vznášení L1**

  Model Vznášení L1 demonstruje pneumatickou dopravu materiálu. Základem je 2 m dlouhá plastová průhledná trubka, do které se umístí vhodné těleso. Ve spodní části je umístěn ventilátor, který funguje jako zdroj proudu vzduchu. Změnou jeho otáček můžeme pohybovat tělesem nahoru a dolů.

- **Tepelná soustava T1**

  Tepelná soustava T1 je tvořena dvěma samostatnými systémy s různými časovými konstantami, které jsou představovány rezistory s odlišně provedenou izolací. Tyto rezistory jsou umístěny uprostřed chladičů pro procesory PC, jejich teplota je měřena pomocí polovodičových prvků.

- **Servomechanismus Amira S1**

  Servomechanismus Amira S1 tvoří dva identické motory pevně spojené hřídelí (neuvažujeme pružnost hřídele). První motor simuluje proměnný zatěžovací moment. Druhý motor budíme signálem z regulátoru.

- **Servomechanismus S2**

  Servomechanismus S2 je využíván pro ruční řízení rychlosti a úhlu natočení servomechanismu. Na začátek hřídele je možno nasadit jeden ze tří výměnných disků, kterými se mění moment setrvačnosti.

- **Soustruh S3**

  Model Soustruh S3 funguje jako demonstrace analogového dvouosého servosystému.

- **Kulička na tyči K1**

  Kulička na tyči K1 je fyzikální systém složený ze servomotoru (vnitřní servosmyčka), z mechanické převodovky a tyče s kuličkou. Jedná se o nelineární astatický systém.

- **Inverzní kyvadlo P1**

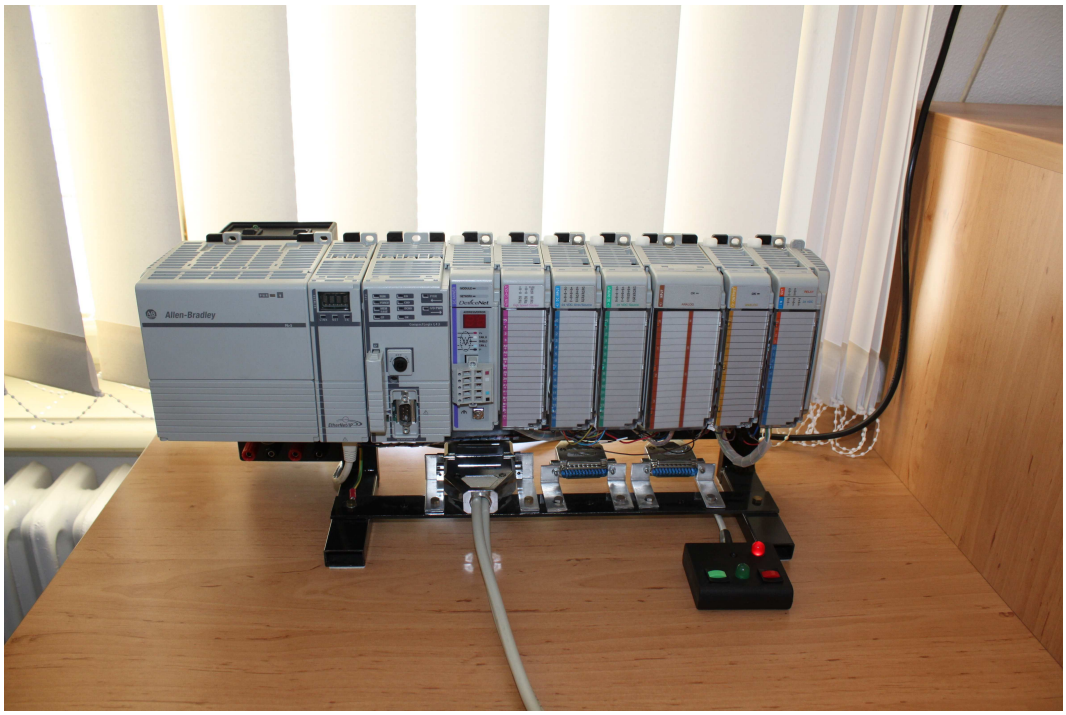
  Inverzní kyvadlo P1 je nelineární astatický systém složený z lineárně se pohybujícího pohonu a na něm volně uchyceného kyvadla.

- **Rychlé pohony M1**

  Rychlé pohony M1 jsou fyzikální model, který umožňuje řízení jednoho motoru v závislosti na rychlosti druhého motoru a měnícím se převodovém poměru.

3.6 Programovatelné automaty

V laboratoři jsou umístěny programovatelné automaty od firmy Allen-Bradley řady Logix, pro kterou je charakteristická společná instrukční sada a jednotný vývojový software RSLogix5000.



Obrázek 3.7: Fotografie PLC CompactLogix

- **RSLogix 5000**

  „*Vývojový software RSLogix5000 nabízí více než 180 instrukcí a zápis aplikačního programu může být proveden v příčkovém (ladder) diagramu, funkčních blocích, sekvenčním funkčním diagramu nebo strukturovaném textu. Programování v režimu on-line je samozřejmostí, stejně jako přidávání nových proměnných za chodu procesoru. Proměnné jsou pojmenovány slovně a programátor může vytvářet vlastní datové typy - struktury nebo vícerozměrné pole. Kromě vlastních datových typů může programátor vytvářet i vlastní „nové“ instrukce*“ [ControlTech, 2010 [17]].

- **ControlLogix**

  Allen-Bradley ControlLogix je modulární programovatelný automat, nejvýkonnější z řady Logix.

- **CompactLogix**

  Allen-Bradley CompactLogix je programovatelný automat určený pro malé a střední aplikace.

- **Small Logix Controller**

  Allen-Bradley SLC 500 je malý modulární programovatelný automat, předchůdce řady Logix.

- **Podavač 1 (hnědý)**

  Podavač 1 (hnědý) je tvořen motorkem s převodovkou, na jejíž hřídeli je upevněno rameno s magnetem na konci. Magnet spíná při dosažení příslušné polohy jazýčkový kontakt. Dále je na modelu ruční černé tlačítko, které spouští motorek jedním směrem bez ohledu na stav vstupů modelu (slouží k ověření funkčnosti modelu a pomáhá při ladění řídicích programů). Pravá červená LED dioda svítí, pokud se motorek točí. Tři přepínače neovládají přímo model, slouží jako vstupy pro program v automatu. Tři dvoubarevné LED diody slouží jako signalizační výstupy.

- **Podavač 2 (černý)**

  Podavač 2 (černý) je tvořen servomotorkem, na který je upevněn rotační plíšek. Rotační část modelu je osazena šesti snímači polohy pracujícími na optickém principu. Detekce polohy je signalizována také signalizační LED diodou. Dále je model

osazen sedmisegmentovým displejem, tlačítkem pro přepínání analogového a digitálního řízení a tlačítkem manuálního ovládání motorku. Všechny ostatní tlačítka, spínače a signalizační diody jsou volně použitelné pro programové účely.

- **Ostatní vybavení**
  - dvě bílé tabule na psaní fixy
  - projektor Panasonic PT-FW300E, rozlišení 1280×800 $(16 : 10)$

Kapitola 4

Webová prezentace

4.1 Základní popis

Nedílnou součástí studijních materiálů je forma jejich prezentace. Internetové stránky jsou velmi výhodnou možností prezentování. Vytvořit design a související technické zázemí bylo hlavním úkolem bakalářské práce Michala Pilného. S mojí prací to ale úzce souviselo, protože mým cílem bylo zajistit obsah stránek. Proto jsem se podílel na volbě technologie, rozvržení struktury stránek a konzultovali jsme spolu jednotlivé dílčí stránky. S webdesignem jsem se z vlastní iniciativy seznámil už během studia střední školy [7], [8] a mám za sebou tvorbu několika stránek. Z toho důvodu jsem přesvědčen, že moje rady a připomínky byly užitečné.

Nejprve bylo nutné zvolit vhodnou technologii, na které bude celá webová prezentace postavena. K dispozici jsme měli místo na serveru s technologiemi PHP [9] a MySQL [10]. Nabízelo se několik řešení. První bylo napsání celého webu „na zelené louce“, druhou možností bylo využití zdrojových kódů sesterské laboratoře K26 [11].

Vzhledem k požadavku na snadné vkládání a editaci obsahu i člověkem bez znalosti (X)HTML a CSS by to znamenalo naprogramování de facto celého vlastního systému pro správu obsahu. Další možností bylo využití některého z frameworků pro PHP. Takto se tvoří nejnáročnější serverové aplikace, jsou to systémy velmi rozsáhlé a na seznámení s nimi potřebuje programátor několik týdnů i měsíců pro odvedení kvalitní práce. Dále bylo možné použití některého ze systému pro správu obsahu (Content Management System, CMS). Ty už jsou daleko výhodnější, programátor se zaměří pouze na tvorbu layoutu a propojení s CMS. Nakonec jsme se rozhodli pro systém MediaWiki [6], na kterém je postavený i hlavní podpůrný web Katedry řídicí techniky [15].

4.2 Systém MediaWiki

MediaWiki je svobodný software, který byl původně vytvořen pro webovou encyklopedii Wikipedia. Je napsán v jazyce PHP a využívá MySQL databázi. Jeho licence umožňuje šířit a upravovat systém, je však nutné uvést autora a zachovat původní licenci i po vlastních úpravách. Celá licence je k dispozici na http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/. Použití MediaWiki je výhodné z celé řady důvodů:

- kvalitně vytvořená správa celého systému;
- využití uživatelských práv a uživatelských skupin;
- hierarchická struktura článků;
- správa obrázků a souborů obecně;
- celá řada užitečných rozšíření (viz [6] sekce Extensions);
- formátování textu pomocí vlastního značkovacího jazyka, ale umožňuje i použití HTML;
- psaní matematických vzorců sázecím systémem LaTeX;
- za vývojem stojí nezisková nadace Wikimedia Foundation, která zajišťuje podporu a rozvoj projektu;
- na serveru Katedry řídicí techniky je již systém nainstalovaný včetně některých rozšíření, tyto materiály se do něj dají dobře zapracovat.

MediaWiki používá vlastní značkovací jazyk, tzv. „wiki značky“. To umožňuje jednoduchou tvorbu kvalitně zformátovaných textů i pro uživatele, kteří neznají HTML jazyk.

4.2.1 Příklady práce s MediaWiki

Veškeré detailní informace o tvorbě textů jsou dostupné na podpůrném webu Katedry řídicí techniky [15] na stránce „Nápověda:Jak_editovat_stránku“. Zde jsou uvedeny příklady nejčastěji používaných operací v prostředí MediaWiki. Předpokládá se, že uživatel je přihlášen a má práva k vykonání těchto operací. Všechny operace lze provádět přes libovolný internetový prohlížeč.

- **Vytvoření nové stránky**

  Máme dvě základní možnosti. Odkazy na existující stránky jsou zobrazeny modře, odkazy na neexistující červeně. Klikneme-li na červený odkaz, tak MediaWiki nabídne vytvoření nové stránky s tímto názvem. Druhou možností je navštívení URL adresy s názvem nové stránky. Například pro vytvoření stránky `Nová_stránka` přejdeme na adresu `.../mediawiki/index.php/Nová_stránka`. Obě cesty vedou k tomu, že se zobrazí textové pole pro napsání obsahu s tlačítky pro náhled a uložení stránky.

- **Editace stávající stránky**

  Přejděte na stránku, kterou si přejete editovat a v horním horizontálním menu klikněte na položku `editovat`.

- **Nahrání obrázku i jiného souboru**

  Přejděte na stránku `Speciální:Načíst_soubor`, například z vertikálního menu. MediaWiki nabídne možnost nahrání souboru a dále důležité informace, jako např. maximální dovolená velikost souboru a zakázané formáty souborů. Je doporučeno vyplnit popis souboru a zvolit vhodné cílové jméno souboru.

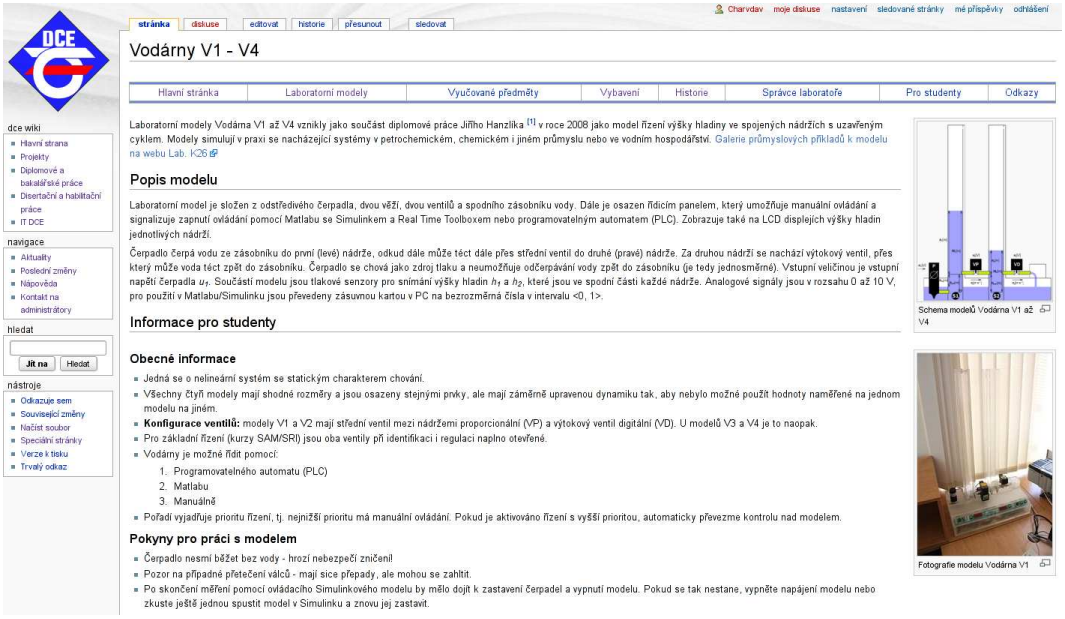
- **Začlenění obrázku do stránky**

  Mějme nahraný obrázek `Image.jpg`. Jednotlivý obrázek začleníme do textu pomocí konstruce `[[Soubor:Image.jpg|thumb|right|Popis]]`. Tím říkáme, že MediaWiki má vykreslit náhled obrázku (parametr `thumb`) vpravo (`right`) s popisem `Popis`. Jednotlivé parametry oddělujeme svislítkem `|` a jsou nepovinné.

- **Základní prvky stránky**

  - `== Nadpis 2. řádu ==` - počet znaků „rovnítko“ vyjadřuje řád nadpisu. Nadpis 1. řádu je na stránce pouze jeden, její název, a není vhodné ho používat v textu.
  - `'''tučný text'''` - tři apostrofy
  - `''kurzíva''` - dva apostrofy
  - `[[Hlavní strana]]` - dvojitá hranatá závorka, odkaz v rámci MediaWiki
  - `[http://www.fel.cvut.cz/]` - hranatá závorka, odkaz mimo MediaWiki
  - `* položka nečíslovaného seznamu`

- `** nečíslovaný seznam, 2. úroveň`
- `# číslovaný seznam 1. úrovně`
- `## číslovaný seznam 2. úrovně`
- seznamy lze vnořovat a kombinovat, např. je možná konstrukce `*#* text`



Obrázek 4.1: Ukázka výsledné stránky v MediaWiki - stránka „Vodárny V1 - V4“

Kapitola 5

Závěr

V první části jsem popsal účel laboratoře, shrnul její historii a zakreslil její plán, který bude sloužit jak pro orientaci studentů i jiných návštěvníků laboratoře, tak i pro evidenci v ní umístěného zařízení. Dále jsem nakreslil schema modelů Vodárny V1 - V4 a Vodní elektrárna E1, které budou využity při výuce v laboratoři.

Vypracoval jsem detailní popisy, návody a zadání pro modely Vodárny V1 - V4, Vodárna V5 a Vodní elektrárna E1. K ostatním modelům a ostatnímu vybavení jsem sepsal krátký úvod. Návody pro práci v laboratoři jsou ve formátu PDF, ostatní textové materiály jsou ve formátu značkovacího jazyka systému MediaWiki. Vše je umístěno na podpůrném webu na serveru Katedry řídicí techniky. Většinu textů, kromě detailních popisů, návodů na cvičení a historie, jsem přeložil do anglického jazyka.

V poslední části jsem se věnoval výběru řešení internetové prezentace obsahu. Stručně jsem popsal zvolený systém MediaWiki a uvedl příklady tvorby obsahu v něm. Struktura stránek je navržena tak, aby umožňovala snadnou úpravu a rozšiřitelnost do budoucna.

Literatura

[1] NEKVINDA, Josef. *Laboratoř Allen-Bradley* [online]. 2004 [cit. 2010-04-10]. Dostupné z WWW: ⟨http://dce.felk.cvut.cz/ab/⟩.

[2] HANZLÍK, Jiří. *Distribuovaný řídicí systém s automaty Rockwell Automation.* Praha, 2008. xvi, 56 s. Diplomová práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.

[3] KONOPA, Miroslav. *Řízení výukových modelů typu Spojené nádoby.* Praha, 2009. vii, 40 s. Bakalářská práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.

[4] FETTERIK, Jozef. *PLC riadenie modelu technologického procesu.* Praha, 2008. xi, 35 s. Bakalářská práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.

[5] JANEČEK, Milan. *Model systému s dopravním zpožděním.* Praha, 2007. 26 s. Bakalářská práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.

[6] Wikimedia Foundation. *MediaWiki* [online]. 2009 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.mediawiki.org⟩.

[7] JANOVSKÝ, Dušan. *Jak psát web* [online]. 2003, poslední změna 1. 4. 2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ¡http://www.mediawiki.org¿. ISSN 1801-0458.

[8] *The World Wide Web Consortium (W3C)* [online]. c2009 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.w3.org⟩.

[9] The PHP Group. *PHP: Hypertext Preprocessor* [online]. c2001, last updated: 26th April 2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.php.net⟩.

[10] Oracle Corporation. *MySQL cluster* [online]. c2001 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.mysql.com/⟩.

[11] ROUBAL, Jiří. *Laboratoř teorie automatického řízení* [online]. 2009 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26⟩.

[12] The GIMP Team. GIMP - *The GNU Image Manipulation Program* [online]. c2001-2009 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.gimp.org⟩.

[13] Free Software Foundation, Inc. *The GNU Operating System* [online]. 29 June 2007 [cit. 2010-05-01]. The GNU General Public License. Dostupné z WWW: ⟨http://www.gnu.org/licenses/gpl.html⟩.

[14] FUKA, Jindřich; JOHN, Jan; KUTIL, Michal. *Učebnice SAM / SRI* [online]. 2005 [cit. 2010-05-02]. Dostupné z WWW: ⟨http://dce.felk.cvut.cz/sari/⟩.

[15] *DCEwiki* [online]. 2008 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz⟩.

[16] Katedra řídicí techniky. *Stránky předmětů Katedry řídicí techniky FEL ČVUT : Moodle* [online]. 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/⟩.

[17] ControlTech. *ControlTech* [online]. c2010 [cit. 2010-06-03]. Dostupné z WWW: ⟨http://www.controltech.cz/index.php⟩.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- Adresář BP2010: Vlastní bakalářská práce ve formátu PDF
- Adresář MediaWiki: Texty, obrázky a fotografie pro webové stránky
- Adresář Zadani: Zadání pro identifikaci a řízení modelů ve formátu PDF

Příloha B

Příklad zdrojových kódů textů MediaWiki

Zde je uveden příklad zdrojového kódu stránky „Vodárny V1 - V4“. Všechny ostatní zdrojové kódy jsou umístěny na CD, které je součástí této bakalářské práce.

```
[[Soubor:Vodarna-v1-v4.png|thumb|Schema modelů Vodárna V1 až
V4 ]]
Laboratorní modely Vodárna V1 až V4 vznikly jako součást
diplomové práce Jiřího Hanzlíka <ref name="dp-hanzlik">
HANZLÍK, Jiří. ''Distribuovaný řídicí systém s automaty
Rockwell Automation.'' Praha, 2008. xvi, 56 s. Diplomová
práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí techniky. Vedoucí práce Ing.
Jindřich Fuka.</ref> v roce 2008 jako model řízení výšky
hladiny ve spojených
nádržích s uzavřeným cyklem. Modely simulují v praxi se
nacházející systémy v petrochemickém, chemickém i jiném
průmyslu nebo ve vodním
hospodářství.
[http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26/index.php?page=
photogallery&dir=./photogallery/images/ModelsAndReality/Tanks
/ Galerie průmyslových příkladů k modelu na webu Lab. K26]

== Popis modelu ==
```

```
[[Soubor:Vodarna_v1_foto.jpg|thumb|Fotografie modelu Vodárna
V1]]
Laboratorní model je složen z odstředivého čerpadla, dvou
věží, dvou ventilů a spodního zásobníku vody. Dále je osazen
řídicím panelem, který umožňuje manuální ovládání a
signalizuje zapnutí ovládání pomocí Matlabu se Simulinkem a
Real Time Toolboxem nebo programovatelným automatem (PLC).
Zobrazuje také na LCD displejích výšky hladin jednotlivých
nádrží.

Čerpadlo čerpá vodu ze zásobníku do první (levé) nádrže,
odkud dále může téct dále přes střední ventil do druhé (pravé
) nádrže. Za druhou nádrží se nachází výtokový ventil, přes
který může voda téct zpět do zásobníku. Čerpadlo se chová
jako zdroj tlaku a neumožňuje odčerpávání vody zpět do
zásobníku (je tedy jednosměrné). Vstupní veličinou
je vstupní napětí čerpadla <em>u<sub>1</sub></em>. Součástí
modelu jsou tlakové senzory pro snímání výšky hladin <em>h<
sub>1</sub></em> a <em>h<sub>2</sub></em>, které jsou ve
spodní části každé nádrže. Analogové signály jsou v rozsahu 0
 až 10 V, pro použití v Matlabu/Simulinku jsou převedeny
zásuvnou kartou v PC na bezrozměrná čísla v intervalu &lt;0,
1&gt;.

== Informace pro studenty ==

=== Obecné informace <ref name="bp-konopa">KONOPA, Miroslav.
''Řízení výukových modelů typu Spojené nádoby.'' Praha, 2009.
 vii, 40 s. Bakalářská práce. ČVUT-FEL, Katedra řídicí
techniky. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fuka.</ref>  ===

*Jedná se o nelineární systém se statickým charakterem
chování.
*Všechny čtyři modely mají shodné rozměry a jsou osazeny
stejnými prvky, ale mají záměrně upravenou dynamiku tak, aby
```

```
nebylo možné použít hodnoty naměřené na jednom modelu na
jiném.
*'''Konfigurace ventilů:''' modely V1 a V2 mají střední
ventil mezi nádržemi proporcionální (VP) a výtokový ventil
digitální (VD). U modelů V3 a V4 je to naopak.
*Pro základní řízení (kurzy SAM/SRI) jsou oba ventily při
identifikaci i regulaci naplno otevřené.
*Vodárny je možné řídit pomocí:
*#Programovatelného automatu (PLC)
*#Matlabu
*#Manuálně
*Pořadí vyjadřuje prioritu řízení, tj. nejnižší prioritu má
manuální ovládání. Pokud je aktivováno řízení s vyšší
prioritou, automaticky převezme kontrolu nad modelem.

=== Pokyny pro práci s modelem ===

*Čerpadlo nesmí běžet bez vody - hrozí nebezpečí zničení!
*Pozor na případné přetečení válců - mají sice přepady, ale
mohou se zahltit.
*Po skončení měření pomocí ovládacího Simulinkového modelu by
 mělo dojít k zastavení čerpadel a vypnutí modelu. Pokud se
tak nestane, vypněte napájení modelu nebo zkuste ještě jednou
 spustit model v Simulinku a znovu jej zastavit.

=== Vstupy ===

*Vstupní napětí čerpadla <em>u<sub>1</sub></em> [V] - '''
řídicí veličina'''
*Míra otevření proporcionálního ventilu <em>u<sub>2</sub></em
> [V]
*Otevření/zavření digitálního (dvoupolohového) ventilu <em>u<
sub>3</sub></em> [V]

=== Výstupy ===
```

```
*výška hladiny v první (levé) nádrži <em>h<sub>1</sub></em> [
m]
*výška hladiny v druhé (pravé) nádrži <em>h<sub>2</sub></em>
[m] - '''regulovaná veličina'''

=== Užitečné vztahy ===

Závislost ideální rychlosti výtoku kapaliny  <em>v</em> [m s<
sup>-1</sup>] na výšce hladiny <em>h</em> [m]
je možné odvodit z Bernoulliho rovnice při uvažování
laminárně stacionárního proudění a
zanedbání ztrát jako

<math>v(t)=\sqrt{2 \, g \, h(t)}~\text{.}</math>

Množství vytékající kapaliny je dáno průřezem otvoru <em>S</
em> a průměrnou výtokovou rychlostí <em>v<sub>p</sub></em>,
která závisí na tvaru otvoru a viskozitě kapaliny.

Tlak <em>p</em> [Pa] daný odstředivým čerpadlem je přímo
úměrný kvadrátu jeho napětí <em>u</em> [V], čili

<math>p(t)=k \, u^2(t)~\text{.}</math>

== Soubory ==

*[[Soubor:V1-V4-id.pdf]] - zadání k identifikaci
*[[Soubor:V1-V4-reg.pdf]] - zadání k řízení
*[[Soubor:Vx_K23_id.zip]] - simulinkový model pro
identifikaci
*[[Soubor:Vx_K23_reg.zip]] - simulinkový model pro řízení

== Literatura ==
<references/>
```

```
== Vodárny V1 - V4 - pro učitele ==

Vycházíme z Bernoulliho rovnice

<math>\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho g h = \mathrm{konst.~[
kg \cdot m^{-3},m \cdot s^{-1},Pa,m \cdot s^{-2},m]}</math>

kde &rho; je hustota kapaliny, <em>v</em> je rychlost
kapaliny, <em>p</em> je působící tlak, <em>g</em> je tíhové
zrychlení kapaliny a <em>h</em> je výška hladiny.

=== Přítok 1. nádrže ===

Odstředivé čerpadlo se chová jako zdroj tlaku. Je nutné
započítat necitlivost <em>u<sub>off</sub></em>, pak je

<math>p(t)=k_{1x} \, (u(t)-u_{off})^2~\text{.}</math>

Je nutné brát v úvahu offset hladiny kapaliny <em>h<sub>off</
sub></em> a také případ, kdy při snížení napětí na
čerpadle se kapalina vrací zpět do nádrže přes čerpadlo až do
 vyrovnání tlaku - to ošetříme s pomocí funkce signum.
S využitím vzorce pro průtok potrubím o známém průřezu <em>S<
sub>c</sub></em> a rychlosti proudění kapaliny <em>v</em>
<math>q=S_c \cdot v</math> získáme přítok 1. nádrže jako

<math>q_{i1}(t)=S_c \, \mathrm{sign} \left( \frac{k_{1x} (u(t
)-u_{off})^2}{\rho} - g (h_1(t)-h_{off}) \right) \sqrt{ \left
| 2 \left( \frac{k_{1x} (u(t)-u_{off})^2}{\rho} - g (h_1(t)-
h_{off}) \right) \right| }</math>

=== Výtok 1. nádrže (totožný s přítokem 2. nádrže) ===

Studenti mají k dispozici vztah pro ideální rychlost výtoku
kapaliny  <em>v</em> [m s<sup>-1</sup>]
```

```
na výšce hladiny <em>h</em> [m] odvozený z Bernoulliho
rovnice při uvažování laminárně stacionárního proudění a
zanedbání ztrát

<math>v(t)=\sqrt{2 \, g \, h(t)}~\text{.}</math>

Směr toku je určen tím, ve kterém válci je hladina kapaliny
vyšší, to můžeme vyjádřit pomocí funkce signum.
Dále je třeba ošetřit, že voda z první nádrže může vytékat,
jen když je nad úrovní spodního okraje
přepouštěcího ventilu. Na to použijeme Heavisideovu funkci <
math>\underline{1}(t)</math>.
Výtok z 1. nádrže a současně přítok do 2. nádrže bude tedy

<math>q_{o1}(t)=q_{i2}(t)=S_p \, \text{sign} \left( h_1(t)-
h_2(t) \right) \sqrt{|2 \, g \, (h_1(t) \underline{1}(h_1) -
h_2(t))|}~\text{,}</math>

kde <em>S<sub>p</sub></em> je průřez potrubí mezi nádržemi.

=== Výtok z 2. nádrže ===

Využijeme opět rovnici pro rychlost výtoku kapaliny odvozenou
 z Bernoulliho rovnice a také vzorec o průtoku
potrubím o známém průřezu a rychlosti proudění kapaliny.

<math>q_{o2}(t)=S_v \sqrt{2 \, g \, h_2(t)}~\text{.}</math>

=== Diferenciální rovnice ===

Objem první nádrže <math>V_1~[\mathrm{m^3}]</math> lze
vyjádřit jako <math>V_1=S_1 \, h_1</math>, kde <math>S_1~[\
mathrm{m^2}]</math> je průřez nádrže.
Potom změna objemu kapaliny v nádrži <math>\mathrm{d}V</math>
 je dána rozdílem mezi přítokem kapaliny
```

```
a jejím výtokem.

<math>\frac{\mathrm{d}V_1}{\mathrm{d}t}=S_1 \frac{\mathrm{d}
h_1}{\mathrm{d}t} = q_{i1}(t) - q_{o1}(t)~\text{.}</math>

Pro získání diferenciální rovnice druhé nádrže postupujeme
obdobně. Do těchto rovnic dosadíme hodnoty průtoků (viz výše)
a získáme soustavu dvou diferenciálních rovnic popisujících
celý systém:

<math>\frac{\mathrm{d}h_1}{\mathrm{d}t} = k_0 \, \mathrm{sign
} \left ( k_{1x} (u(t)-u_{off})^2 - (h_1(t)-h_{off}) \right )
 \cdot \sqrt{|k_{1x} (u(t)-u_{off})^2 - (h_1(t)-h_{off})|} -
k_{px} \, \mathrm{sign} \left ( h_1(t)-h_2(t) \right ) \cdot
\sqrt{|h_1(t) \underline{1}(h_1) - h_2(t)|}</math>

<math>\frac{\mathrm{d}h_2}{\mathrm{d}t} = k_{px} \, \mathrm{
sign} \left ( h_1(t)-h_2(t) \right ) \cdot \sqrt{|h_1(t) \
underline{1}(h_1) - h_2(t)|} - k_{vx} \, \sqrt{h_2(t)}~\text
{,}</math>

kde

<math>k_0=k_{z1} \, \frac{S_c}{S_1} \sqrt{2g}</math>

<math>k_1=k_{z2} \, \frac{k_{1x}}{\rho g}</math>

<math>k_{px}=k_{z3} \, \frac{S_p}{S_1} \sqrt{2g}</math>

<math>k_{vx}=k_{z4} \, \frac{S_v}{S_1} \sqrt{2g}</math>

Koeficienty <math>k_{z1}</math> až <math>k_{z4}</math> jsou
ztrátové činitele.

Detailní odvození lze najít v <ref name="bp-konopa" />.
```

Příloha C

Příklad zadání pro laboratorní úlohy

Zde je uveden příklad zadání pro laboratorní úlohy „Vodárny V1 - V4“ jak pro identifikaci, tak i pro řízení laboratorního modelu. Všechny ostatní zadání jsou umístěny na CD, které je součástí této bakalářské práce.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky

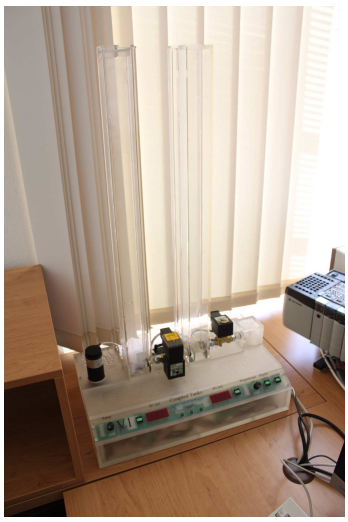
Systémy a modely

VODÁRNY V1 - V4

Identifikace laboratorního modelu

1 Zadání

Laboratorní modely Vodárny V1 - V4 (obr. 1) představují systémy řízení výšky hladiny ve spojených nádržích s uzavřeným cyklem. Více se o těchto modelech dozvíte na stránkách Laboratoře K23 [1].



Obrázek 1: Vodárna V1

Cílem této úlohy je identifikovat laboratorní model (získat nelineární matematický model včetně jeho konstant a provést linearizaci tohoto modelu ve zvoleném pracovním bodě) a porovnat nalezený model s laboratorním modelem. Matematický model hledáme proto, abychom pomocí něho mohli navrhnout regulátor pro laboratorní model.

POZOR Z důvodu zašumění měřených hladin jsou v simulinkovém prostředí Matlabu za výstupy senzorů výšek hladin umístěny Butterworthovy filtry druhého řádu se zlomovou frekvencí 2 $\mathrm{rad\,s^{-1}}$ s přenosem

$$G_{\mathrm{f}}(s) = \frac{4}{s^2 + 2{,}82\,s + 4}\ ,$$

které představují další zpoždění systému. Nezapomeňte tyto filtry přidat do svých modelů!

Úkoly:

1. *Matematický model laboratorního modelu* **3 body**
   Před prvním laboratorním cvičením odvoďte matematický model laboratorního modelu na základě popisu na stránkách [1]. Pro tento popis systém uvažujte jako MIMO, kde vstupní vektor $\boldsymbol{u}^T = [u_1\, u_2]$, výstupní vektor $\boldsymbol{y}^T = [y_1\, y_2] = [h_1\, h_2]$ a stavový $\boldsymbol{x}^T = [x_1\, x_2] = [h_1\, h_2]$.

2. *Seznámení s modelem a statické charakteristiky* **3 body**
   Seznamte se s připojením a ovládáním laboratorního modelu: ručním pomocí čelního

panelu a počítačovým s využitím připraveného Simulinkového ovládacího modelu, který naleznete na stránkách [1] nebo na disku v adresáři `X:\vyuka\tar\SAM\lab\V1_V2_V3_V4`. V tomto souboru je přednastaveno, že se data z bločku `Scope` přehrávají do pracovního prostoru Matlabu do proměnné `ty`, kterou můžete po skončení měření uložit příkazem `save nazev_experimentu ty` do souboru pro pozdější zpracování. Tlakové senzory pro měření výšek hladin jsou z výroby kalibrovány v metrech, takže bezrozměrné výšky hladin H_1 [−] a H_2 [−] v Matlabu přímo odpovídají výškám hladin v metrech.

Z hlediska modelování je vhodné určovat výšky hladin v nádržích od dna trubek ventilů, které jsou ve stejné výši. Takže podle schema bude platit, že $h_1 = H_1 - h_{1off}$. Je tedy nutné změřit senzorem výšky h_{1off} a h_{2off} dna trubek ventilů.

Změřte statickou charakteristiku u_1 [-] $\rightarrow h_1$ [m] pro čerpadlo včetně případného mrtvého pásma a hystereze jak pro čerpání, tak i upouštění vody nejméně pro 10 hodnot napětí. Postup měření si zvolte sami. Nezapomeňte, že čerpadlo musí kromě měřené výšky h_1 ještě překonat rozdíl h_{1V} mezi hladinou v zásobníku a výškou dna trubky ventilu. Pro běžné měření považujte výšku hladiny v zásobníku za konstantní.

Z naměřených hodnot určete rozdíl hladin mezi hladinou v zásobníku a výškou dna trubky ventilu h_{1V}, offsetové napětí čerpadla u_{off} a zesílení čerpadla k_1.

3. *Redukce matematického modelu* **3 body**

   Na laboratorní měření si připravte redukovaný tvar nelineárního stavového modelu systému do tvaru SISO podle skutečnosti a výše uvedených doporučení. Připravte si nelineární simulinkové schéma systému s úplným nelineárním modelem chování čerpadla (tj. modelem při zavřených ventilech). Proveďte obecně linearizaci celkového systému pro obecný pracovní bod a určete stavové matice $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{D}$ lineárního systému.

4. *Měření přechodových charakteristik* **3 body**

   Změřte přechodovou charakteristiku (ve velkém) nelineárního systému z prázdných nádrží. Pro měření použijte příslušný simulinkový model `Vx.mdl`, kde je již přednastaveno vhodné vstupní napětí pro model. Nechte systém dobře ustálit - výška hladiny v levém tanku by měla dosahovat maximálně 50 % celkové výšky nádrže a v pravém by neměla klesnout pod 10 % jeho celkové výšky. Z ustáleného stavu změřte zvýšením vstupního napětí maximálně o 10 % přechodovou charakteristiku v malém. Po ustálení změřte stejným způsobem další charakteristiku pro zvýšení vstupu o stejnou hodnotu a na závěr ještě jednou pro snížení. Z nejméně čtyř rovnovážných stavů určete a zaneste do tabulky hodnoty neznámých konstant ventilů k_P a k_D pro příslušné hodnoty vstupního napětí a výšky hladin.

5. *Nelineární a lineární model* **3 body**

   Změřené parametry použijte pro vytvoření dvou nelineárních stavových popisů - jeden ve fyzikálních veličinách, tj. vstupní napětí [V] a výška hladin v [m], druhý pak bezrozměrný

ve strojových jednotkách RT Toolboxu Matlabu. Na připraveném simulinkovém modelu proveďte simulaci systému pro oba popisy a porovnejte s naměřenými hodnotami v jednom grafu. Dále již pracujte pouze s bezrozměrnými modely.
Pro dva rovnovážné stavy získané v předchozím bodě proveďte linearizaci systému dosazením do připravených rovnic a napište jejich přírůstkové stavové rovnice. Porovnejte odezvu linearizovaného systému na stejný skok vstupního napětí s příslušnou odezvou fyzikálního modelu. Nezapomeňte z důvodu porovnání umístit odchylkový linearizovaný model do požadovaného pracovního bodu.

6. *Identifikace z přechodových charakteristik v malém, přenos* **2 body**
   Ze dvou přechodových charakteristik v malém odečtěte pomocí doby průtahu a náběhu náhradní přenosy systému a porovnejte je se získanými přenosy z lineárních modelů. Srovnání proveďte též graficky s původním systémem. Zobrazte frekvenční charakteristiku systému v logaritmických souřadnicích. Jakou byste nyní volili frekvenci vzorkování?

7. *Protokol o identifikaci laboratorního modelu* **5 bodů**
   Do vašeho sešitu vlepte toto zadání a pište si do něj podrobné poznámky o měření. Vypracujte protokol o této identifikaci dle požadavků na [2].

Reference

[1] CHARVÁT, David; PILNÝ, Michal. *Webové stránky Laboratoře Allen - Bradley (K23)* [online]. 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř_Allen-Bradley⟩

[2] Katedra řídicí techniky. *Stránky předmětů Katedry řídicí techniky FEL ČVUT : Moodle* [online]. 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/⟩.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky

Systémy a řízení

VODÁRNY V1 - V4

Řízení laboratorního modelu

1 Zadání

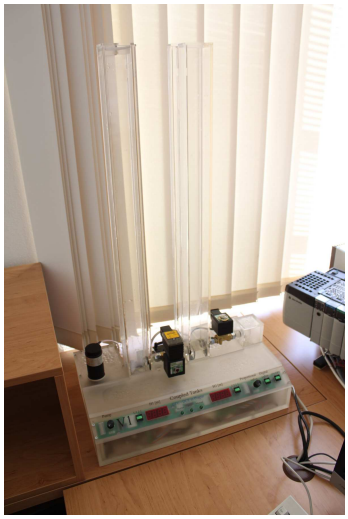
Laboratorní modely Vodárny V1 - V4 (obr. 1) představují systémy řízení výšky hladiny ve spojených nádržích s uzavřeným cyklem. Více se o těchto modelech dozvíte na stránkách Laboratoře K23 [1].

Cílem této úlohy je řídit výšku hladiny v pravém válci změnou čerpání vody do levého válce.

POZOR Z důvodu zašumění měřených hladin jsou v simulinkovém prostředí Matlabu za výstupy senzorů výšek hladin umístěny Butterworthovy filtry druhého řádu se zlomovou frekvencí 2 $\mathrm{rad\,s^{-1}}$ s přenosem

$$G_{\mathrm{f}}(s) = \frac{4}{s^2 + 2{,}82\,s + 4}\ ,$$

které představují další zpoždění systému. Nezapomeňte tyto filtry přidat do svých modelů!



Obrázek 1: Vodárna V1

Požadavky na řízení:

1. Navrhněte a odzkoušejte vhodné typy realizovatelných regulátorů pro obě následující podmínky:
   - je povolena odchylka do 5% v ustáleném stavu na skok řídicí veličiny,
   - je požadována nulová regulační odchylka v ustáleném stavu na skok řídicí veličiny.
2. Navrhněte regulátor vždy tak, aby doba regulace pro pásmo ± 5% byla co nejkratší při maximálním povoleném překmitu 30%.

Metody návrhu řízení:

Návrh regulátorů proveďte (vyberte a vyzkoušejte různé typy regulátorů):

1. Empirickými metodami:
   - „ručně“ metodou cyklické optimalizace konstant regulátoru
   - podle Zieglera-Nicholse
2. Frekvenčními metodami:
   - pomocí kompenzací lead, lag a lead-lag
   - regulátory typu P, PI, PD a PID
3. Metodou umístění pólů uzavřené regulační smyčky:
   - pomocí geometrického místa kořenů
   - výpočtem polohy dominantních pólů

Návrh proveďte jak pro ideální varianty PID regulátoru, tak i pro jeho realizovatelnou podobu, která má omezen zisk derivační složky na vyšších frekvencích na hodnotu $k_P N$:

$$k_D s \rightarrow \frac{k_D s}{\frac{k_D}{k_P N} s + 1}$$

Filtr při návrhu aplikujte na celý přenos regulátoru, i když při realizaci jím bude ovlivněna pouze derivační složka.

Doporučený postup:

1. Ověřte jednoduchým experimentem přenos systému ve zvoleném pracovním bodě.
2. Nejprve navrhněte všechny požadované regulátory jako ideální a pak teprve přidejte filtraci v případě, kdy je nutná. Nezapomeňte na dodržení vzorkovacího teorému pro filtr.
3. Odzkoušejte regulátory na nelineárním modelu v Simulinku na skok řídicí veličiny z nuly do pracovního bodu a v pracovním bodě při změně žádané hodnoty o 10%. Ověřte též na lineárním modelu v Simulinku. Uvažujte přitom omezení akčních veličin a případně použijte antiwindup, pokud je potřeba.
4. Pro jeden zvolený regulátor vyzkoušejte na laboratorním modelu regulaci z prázdných nádob do pracovního bodu. Dále vyzkoušejte dva nejvhodnější regulátory pro velikost odchylky podle Požadavků na řízení (tj. celkem 4 regulátory) v okolí pracovního bodu (vyzkoušejte skok žádané hodnoty v obou směrech).

Zpracování výsledků:

1. Prezentujte ověření platnosti přenosu systému. **1 bod**

2. Pro každý navržený regulátor do tabulky přehledně zaznamenejte: typ regulátoru, konstanty regulátoru, fázovou a amplitudovou bezpečnost, velikost překmitu přechodové charakteristiky, ustálenou regulační odchylku odezvy na skokovou změnu požadované hodnoty, dobu regulace pro pásmo regulace $\pm$ 5 % od ustálené hodnoty při uvažování omezení akčních veličin. **5 bodů**

3. Zvolte si dva typy regulátorů s nulovou regulační odchylkou na skok řídicí veličiny, které jste nastavili třemi různými metodami (tj. celkem 6 regulátorů). Přechodové charakteristiky těchto regulačních obvodů zobrazte do jednoho grafu a popište je, do jednoho grafu také vykreslete frekvenční charakteristiky uzavřené smyčky a polohy pólů uzavřené smyčky. Diskutujte rozdíly v kvalitě regulace v souvislosti s použitým typem regulátoru a metodou návrhu. **2 body**

4. Pro velikost odchylky podle Požadavků na řízení vyberte vždy jeden regulátor, který se nejlépe choval na fyzikálním modelu, a porovnejte v jednom obrázku jeho naměřenou přechodovou charakteristiku se simulovanou na lineárním i nelineárním modelu. **5 bodů**

5. Porovnejte kvalitu a čas regulace z prázdných nádob do pracovního bodu oproti regulaci v lineárním rozsahu. **2 body**

Jestliže se nepodařilo některý typ regulátoru navrhnout nebo splnit některý z požadavků, zdůvodněte to.

Formální zpracování a prezentace:

Pokyny a požadavky na formální zpracování výsledků (**5 bodů**) a tvorbu prezentace (**2 body**) jsou uvedeny na webových stránkách předmětu na [2]. Za odevzdání laboratorní zprávy v angličtině můžete získat až **4 body** navíc. Pokud je to možné, vynášejte do grafů veličiny ve skutečných jednotkách (např. volty, centimetry apod.).

Reference

[1] CHARVÁT, David; PILNÝ, Michal. *Webové stránky Laboratoře Allen - Bradley (K23)* [online]. 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř_Allen-Bradley⟩

[2] Katedra řídicí techniky. *Stránky předmětů Katedry řídicí techniky FEL ČVUT : Moodle* [online]. 2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/⟩.