ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

BAKALÁRSKA PRÁCA

PLC riadenie modelu technologického procesu

Praha, 2008

Autor: Jozef Fetterik

Vyhlásenie

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne a použil som iba podklady (literatúru, projekty, SW atď.) uvedené v priloženom zozname.

V Prahe, dňa 11. 7. 2008

Felderik

podpis

Poďakovanie

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval všetkým, ktorí sa podieľali na tejto bakalárskej práci, predovšetkým vedúcemu práce Ing. Jidřichovi Fukovi, bez jeho pomoci, rád a odborných pripomienok by nemohla táto práca vzniknúť. Ďalej by som chcel poďakovať Jiřímu Hanzlíkovi za cenné rady a pomoc pri riešení elektrickej časti modelu, pánovi Ladislavovi Čmelíkovi za pomoc pri konštrukcii modelu a všetkým (predovšetkým rodine), ktorí ma po celú dobu štúdia podporujú.

Abstrakt

Hlavnou témou tejto bakalárskej práce je rekonštrukcia staršieho fyzikálneho modelu, ktorý je využívaný vo výučbe teórie riadenia. Model predstavuje systém spojených nádrží s riadením výšky hladiny. Základom mechanickej časti sú dve zubové čerpadlá, ktoré čerpajú vodu zo zásobnej nádrže do dvoch valcov. Oba valce sú navzájom prepojené ventilom. Z každého valca zároveň vedú výpustné ventily do zásobnej nádrže. Model je možné riadiť buď programovateľným automatom SLC 500, analógovým počítačom Meda alebo osobným počítačom z Matlabu pomocou Real-Time toolboxu. Model tiež umožňuje ručné ovládanie. Bola vypracovaná identifikácia systému s matematickým popisom a vytvorené vzorové programy pre riadenie. V závere práce sú uvedené zadania úloh pre študentov.

Abstract

The main goal of this bachelor thesis is the reconstruction of an older physical model which is exploited in education of control engineering theory. The model represents a system of coupled tanks with control of liquid level. The principal of the mechanical part are two gear pumps pumping water up into the upper tanks from the bottom one. Both tanks are coupled with a valve. There are two another valves flowing water from each tank to the bottom one. The model is controlled either by a programmable logical controller SLC 500, analog computer Meda or a personal computer from Matlab's Real-Time toolbox. The local control is available too. The identification of the system with a mathematical description was performed and examples of programs for control were created. At the end of this work there are problems for students to be solved.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jozef Fetterik**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **PLC řízení modelu technologického procesu**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s klasickými programovatelnými automaty firmy Rockwell Automation řad SLC 500 a PLC 5 a modely používanými pro výuku programování v lab. K23.
2. Připojte k těmto automatům kromě jednoduchých přípravků pro logické programování model vodárny se zubovými čerpadly, u kterého zajistěte možnost dálkového přepínání řízení mezi různými zdroji signálu (PC, PLC a ručně). Proveďte též další nezbytné úpravy přípravků.
3. Automaty propojte s použitím jejich přirozených sítí.
4. Identifikací ověřte vlastnosti systému po provedených úpravách.
5. Zpracujte popis systému pro výuku a proveďte též jeho případnou vizualizaci.
6. Zpracujte vzorové programy pro řízení a na jejich základě vytvořte zadání vhodných úloh pro studenty.

Seznam odborné literatury:

stávající dokumentace k modelu vodárny, firemní materiály

Vedoucí: Ing. Jindřich Fuka

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Obsah

Zoznam obrázkov ..... **vii**

Zoznam tabuliek ..... **ix**

1 Úvod **1**

2 Konštrukcia výukového modelu **2**

2.1 Hydromechanická konštrukcia 2

2.1.1 Ventily 3

2.1.2 Čerpadlá 4

2.1.3 Senzory výšky hladiny 5

2.2 Elektronická konštrukcia 5

2.2.1 Riadiaca jednotka 6

2.2.1.1 Požiadavky na riadiacu jednotku 7

2.2.1.2 Popis riadiacej dosky 7

2.2.1.3 Prepojenie dvoch riadiacich dosiek 9

2.2.1.4 Pripojenie analógového počítača Meda 9

2.2.1.5 Návrh prídavnej elektroniky 10

2.2.1.6 Ovládací panel 11

2.2.2 Snímače stavu ventilov 11

2.2.3 Zdroj napätia 13

2.3 Pripojenie modelu k PC 13

2.4 Pripojenie modelu k PLC 14

2.5 Pripojenie modelu k Mede 15

2.6 Technické parametre modelu 15

3 Analýza systému ... 16
3.1 Fyzikálny popis ... 16
3.1.1 Fyzikálny popis čerpadla ... 16
3.1.2 Fyzikálny popis kapacitných sond výšky hladiny ... 17
3.1.3 Fyzikálny popis spojených nádob ... 18
3.2 Identifikácia ... 22
3.2.1 Identifikácia čerpadiel ... 22
3.2.2 Identifikácia kapacitných sond výšky hladiny ... 24
3.2.3 Prechodové charakteristiky ... 26
3.3 Linearizácia ... 27

4 Využitie modelu vo výuke ... 29
4.1 Návrh regulátoru ... 29
4.1.1 Návrh regulátoru pre Matlab ... 29
4.1.2 Návrh regulátoru pre PLC ... 30
4.2 Zadania úloh pre študentov ... 31

5 Záver ... 35

Literatúra ... 36

Použitý software ... 37

A Obsah priloženého CD ... I

B Elektronická časť ... II

C Pripojenie modelu k PC a PLC ... IX

D Návrh čelného panelu a výkresová dokumentácia ... X

Zoznam obrázkov

2.1 Celkový pohľad na model vodárne..... 3
2.2 Detail výtokového ventilu..... 3
2.3 Zubové čerpadlo – celkový pohľad a detail na ozubené kolieska..... 5
2.4 Riadiaca jednotka..... 6
2.5 Bloková schéma zapojenia elektroniky..... 6
2.6 Riešenie vstupného obvodu na spínanie Matlabom a PLC..... 7
2.7 Jednoduchá logika spínajúca signál do analógového počítača Meda..... 10
2.8 Schéma spínania jazýčkového kontaktu..... 11
2.9 Vzájomná poloha senzoru s magnetom v závislosti na otvorení ventilu..... 12
2.10 Zdroj SYS 1250 od firmy Amicus..... 13
2.11 Šablóna na ovládanie modelu zo Simulinku..... 14
2.12 Programovateľný automat SLC 500, ktorý riadi model vodárne..... 14
2.13 Analógový počítač Meda s televíznou obrazovkou..... 15
3.1 Schéma jednosmerného motoru..... 16
3.2 Prierez kapacitnou sondou..... 18
3.3 Vytekanie kvapaliny otvorom..... 19
3.4 Charakteristika výkonového budiča čerpadla..... 23
3.5 Statická charakteristika čerpadla..... 24
3.6 Prevodná charakteristika kapacitných sond výšky hladiny (po predchádzajúcom napustení nádrží doplna)..... 25
3.7 Prevodná charakteristika kapacitných sond výšky hladiny (lineárna interpolácia do hodnoty predpokladaného ustáleného stavu)..... 25
3.8 Vnútorné zapojenie bloku ovládajúceho vodáreň z obrázku 2.11..... 26
3.9 Porovnanie prechodových charakteristík systému s nelineárnym modelom.... 27

3.10 Porovnanie reálneho systému s lineárnym a nelineárnym modelom..... 28
4.1 Porovnanie reálneho systému a nelineárneho modelu pri regulácii z prázdnych nádob do pracovného bodu a následný skok žiadanej hodnoty o 10 %..... 30
4.2 Priebeh regulácie prostredníctvom PLC..... 30
B.1 Číslovanie pinov DIN konektoru (pohľad spredu na panel)..... II
B.2 Schéma zapojenia riadiacej dosky..... IV
B.3 Schéma dosky s prídavnou elektronikou..... V
B.4 Schéma zapojenia ovládacieho panelu..... VI
B.5 Schéma zapojenia deliča napätia pre indikáciu stavu ventilov..... VI

Zoznam tabuliek

2.1 Riadiace signály *A*, *B* na vývodoch procesoru..... 8

2.2 Riadiace signály *A*, *B* na vývodoch multiplexoru..... 8

2.3 Základné technické parametre modelu..... 15

4.1 Konštanty PID regulátoru v PLC..... 31

B.1 Zapojenie DIN konektoru snímačov výšky hladiny..... II

B.2 Zapojenie DIN konektoru snímačov stavu ventilov..... II

B.3 Zapojenie konektorov Cannon na pripojenie PC a PLC..... III

B.4 Zapojenie konektoru Cannon na pripojenie Medy..... III

B.5 Zoznam súčiastok pre riadiacu dosku..... VII

B.6 Zoznam súčiastok pre dosku s prídavnou elektronikou..... VIII

B.7 Zoznam súčiastok pre ovládací panel..... VIII

B.8 Zoznam súčiastok pre delič..... VIII

C.1 Zapojenie karty PCI–1711..... IX

C.2 Zapojenie modelu na jednotlivé adresy PLC..... IX

Kapitola 1

Úvod

Hlavnou časťou tejto bakalárske práce je rekonštrukcia staršieho modelu vodárne používaného pri výuke teórie riadenia na Katedre riadiacej techniky v laboratóriu K23. Model bol využívaný v rokoch 1995 – 2007, kedy bol nahradený novým systémom s lepšími vlastnosťami. Model predstavuje systém spojených nádob s uzavretým cyklom vody. Pozostáva z dvoch nádrží, ktoré sú navzájom prepojené ventilom. Sústava obsahuje dve zubové čerpadlá, ktorými sa môže nezávisle čerpať voda do každej nádrže. Ďalej obsahuje dva výpustné ventily z každej nádoby do spoločnej zásobnej nádrže a dve sondy na meranie výšky hladiny.

Hlavnou myšlienkou rekonštrukcie bolo v čo najväčšej možnej miere zachovať fyzikálne vlastnosti pôvodného systému pri použití pôvodných prvkov (druh čerpadla, ventily atď.), aby ho bolo možné porovnať s novým systémom. Model vodárne mal zaisťovať možnosť diaľkového prepínania riadenia medzi rôznymi zdrojmi signálu, a to počítača, programovateľného automatu (PLC), analógového počítača Meda a ručného ovládania. Elektronická časť modelu vychádza z riešenia, ktoré bolo použité pri nových modeloch vodární v laboratóriu K23 a spĺňa požiadavku bezpečného napájania 24 V.

V priemyselných aplikáciách sa často stretávame s problémom čerpania a uchovávania rôznych kvapalín, pričom je riadená výška hladiny a prietok. Model vodárne tak približuje študentom tento systém a zároveň umožňuje vyskúšať si návrh regulátorov pre sústavu s jedným vstupom a jedným výstupom (SISO – Single Input Single Output), prípadne s viacnásobným vstupom a viacnásobným výstupom (MIMO – Multiple Input Multiple Output).

Popis modelu vrátane návrhu elektroniky sa nachádza v kapitole 2. V kapitole 3 je uvedený matematický model s jeho linearizáciou. V nasledujúcej kapitole 4 sa nachádza návrh regulátoru, jeho aplikácia pomocou PLC a návrh zadania úloh pre študentov.

Kapitola 2

Konštrukcia výukového modelu

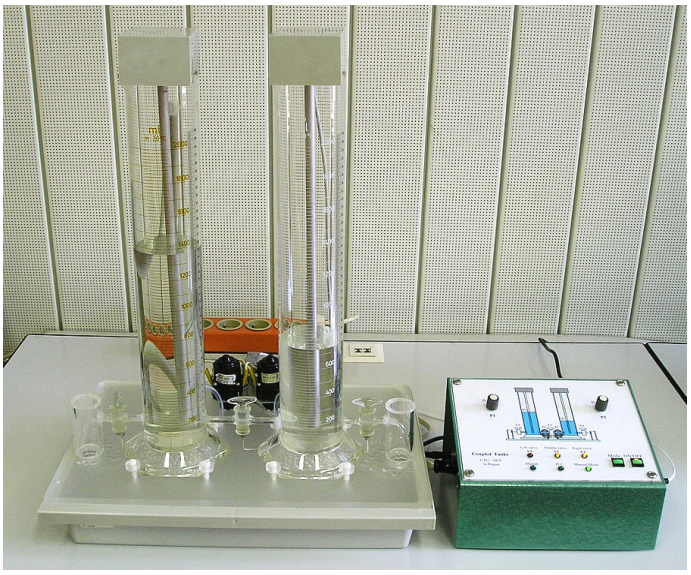
Model vodárne môžeme konštrukčne rozdeliť na dve časti. Jednou z nich je vlastná sústava spojených nádob obsahujúca nádrže, ventily a čerpadlá. S druhou časťou, ktorú tvorí riadiaca jednotka, je elektricky prepojená káblami. Riadiaca jednotka umožňuje ovládať model nielen ručne, ale aj vzdialene prostredníctvom počítača, programovateľného automatu a analógového počítača Meda.

2.1 Hydromechanická konštrukcia

Hlavnú časť tvoria dva sklenené chemické odmerné valce, každý s priemerom 85 mm a objemom približne 2 litre (viď obr. 2.1). Použité nádoby sú pôvodné, zo starej vodárne. Každá z nádob je uchytená pomocou skrutiek ku doske z plexiskla a tá je pripevnená k zásobnej nádrži. Nosná doska je nová, jej hrúbku som navrhol z pôvodných 5 mm na 10 mm, aby nedochádzalo k jej prehýnaniu pod tiažou plných valcov. Pôvodné kovové skrutky s maticou, ktoré obopínali spodnú časť valca a nosnú dosku z oboch strán som kvôli značnej korózii vymenil za plastové. Každú nádrž tak uchycujú štyri skrutky s podložkami zaskrutkované do závitov vyrezaných do nosnej dosky. Okrem zamedzeniu korózie sme tak získali ľahšiu montáž a demontáž modelu, ktorá prebieha iba z vrchnej strany.

Zásobnú nádrž tvorí pôvodná plastová vanička o objeme približne 6 litrov, na ktorej je postavený celý model. Zásobná nádoba je teda dostatočne dimenzovaná, aby pokryla spotrebu oboch plných pracovných nádrží. Všetky sklenené časti sú navzájom zlepené pomocou priehľadného sanitárneho silikónu, ktorý nahradil pôvodné gumové tesnenie.

V modeli sa ako pracovná kvapalina používa destilovaná voda. Je ľahko dostupná, nezanecháva na sklenených častiach stopy a nie je to agresívna kvapalina, ktorá by ničila niektoré časti modelu.



Obr. 2.1: Celkový pohľad na model vodárne

2.1.1 Ventily

Nádrže sú spojené trubičkou s ventilom, takže kvapalina môže pretekať z jedného valca do druhého. Okrem toho, každá nádrž má aj výpustný ventil pre odtok kvapaliny z valca do zásobnej nádrže. Pri návrhu riadenia môžeme ním simulovať napr. poruchovú veličinu.

Použité ventily sa často používajú v chemických laboratóriách na riadenie prietoku kvapalín medzi rôznymi bankami. Sú vyrobené čisto zo skla a skladajú sa z dvoch častí: kohútik s vyvŕtaným prepúšťacím otvorom presne zapadne do objímky, na ktorú sú natavené dve trubičky. Ventily je možné ovládať iba manuálne. V zrekonštruovanom modeli bola požiadavka na digitálnu detekciu otvorenosti ventilu, ktorá je podrobnejšie rozobraná v kapitole 2.2.2.

Obr. 2.2: Detail výtokového ventilu

V pôvodnom modeli vytekala voda z výpustného ventilu úzkou sklenenou trubičkou, ktorá bola tepelným opracovaním ohnutá do tvaru „L“. Kvôli úzkemu prierezu, ktorý vznikol v kolene, tak dochádzalo k zahlcovaniu trubičky a znemožneniu odtoku kvapaliny. V zrekonštruovanom modeli sme spolu s vedúcim práce tento problém vyriešili tak, že po mechanickom odstránení kolena sa zostávajúca trubička vychádzajúca z ventilu zasunula kolmo do širšej trubky z plexiskla (pozri obr. 2.2). Voda tak z ventilu voľne vyteká do zásobnej nádrže. Výšku a tvar trubky z plexiskla som optimalizoval tak, aby ani pri najväčšom prúde voda nevytekala von cez horný kryt prípadne vzlínala popod nosnú dosku.

Všetky diely z plexiskla zhotovila firma MK Plexi podľa výkresovej dokumentácie, ktorá je uvedená v prílohe D. Použité sú dva druhy plexiskla:

matné (ozn. Frost) – nosná doska

číre – odtokové trubky s krytmi

2.1.2 Čerpadlá

Voda zo zásobnej nádrže do pracovných valcov je prepravovaná pomocou dvoch zubových čerpadiel typu APO 020 od firmy Tesla Litovel, pôvodného typu, aký bol použitý v starej vodárni. Čerpadlá podobného druhu sa používajú v ostrekovačoch predného skla osobných áut, náš typ pravdepodobne pochádza zo staršieho modelu vozidla značky Škoda.

Čerpadlo obsahuje jednosmerný motor s permanentným magnetom, ktorý poháňa priamo jedno ozubené koleso. Druhé ozubené koleso je voľne uložené na oske a otáča sa vplyvom pohybu hnacieho kolieska (viď obr. 2.3). Čerpadlo sa tak chová ako zdroj konštantného prietoku kvapaliny. Maximálne napájacie napätie je 12 V, príkon čerpadla je 50 W.

Po demontovaní čerpadiel zo starej vodárne a ich odskúšaní nefungovalo ani jedno. Bolo potrebné dôkladné prečistenie okolia ozubených koliesok a nahradenie chýbajúceho pera, ktoré zabezpečovalo prenos krútiaceho momentu. Ani po tejto úprave však čerpadlá nefungovali spoľahlivo. Nakoniec po dodaní ďalších troch čerpadiel vedúcim práce sa podarilo kombináciou dielov z jednotlivých kusov skompletizovať dve funkčné. Napriek tomu po dlhšej prestávke v používaní dochádza k ich zaseknutiu. Vhodné je preto aspoň raz za týždeň ich uviesť do chodu. Ďalšou nevýhodou tohto druhu čerpadla je vysoká hlučnosť pri prevádzke.

Obr. 2.3: Zubové čerpadlo – celkový pohľad a detail na ozubené kolieska

2.1.3 Senzory výšky hladiny

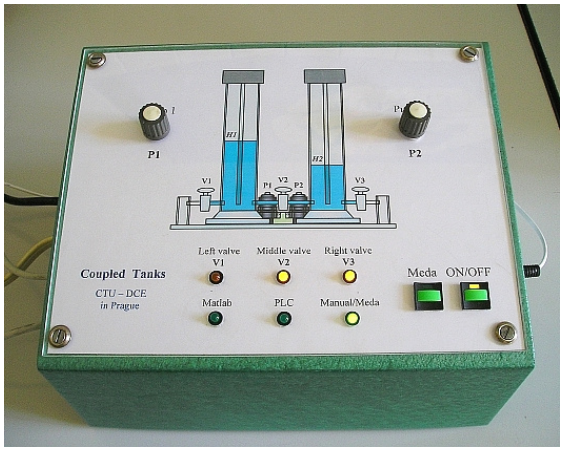
Na určovanie výšky hladiny sú použité pôvodné kapacitné sondy. V plastovej škatuli, ktorá je umiestnená na odmernom valci sa nachádza elektronika senzoru. Na ňu je pripevnený vlastný koaxiálny kondenzátor, ktorý smeruje do vnútra valcovej nádrže. Závislosť kapacity kondenzátora na výške hladiny vody je odvodená v kapitole 3.1.2. Sonda je napájaná z riadiacej jednotky napätím ± 15 V, výstupné napätie sa pohybuje v rozmedzí 0 – 10 V.

2.2 Elektronická konštrukcia

Súčasťou modelu je riadiaca jednotka, ktorá zaisťuje ovládanie modelu. Umožňuje prioritné prepínanie riadenia medzi štyrmi zdrojmi signálu, a to Matlabom, programovateľným automatom, analógovým počítačom Meda a manuálnym ovládaním. Obsahuje výkonové prvky na ovládanie čerpadiel a prepína výstupné analógové a digitálne signály modelu (výška hladiny v jednotlivých nádržiach a stav ventilov). Návrh elektronickej časti vychádza z koncepcie použitej pri nových modeloch vodární, ktorá je súčasťou diplomovej práce J. Hanzlíka [7].

Elektronika, ktorá slúžila na riadenie starého modelu bola kompletne nahradená novou. Použitá bola iba pôvodná plechová škatuľa, ktorá prešla niekoľkými úpravami,

aby bolo umožnené rozšírené ovládanie modelu. Pôvodne bolo plánované použiť úplne nový obal. Na českom trhu som však nenašiel vhodnú priemyselne vyrábanú plastovú škatuľu, ktorá by bola estetická, ekonomicky výhodná a zároveň dostatočne rozmerná na umiestnenie veľkých plošných spojov.

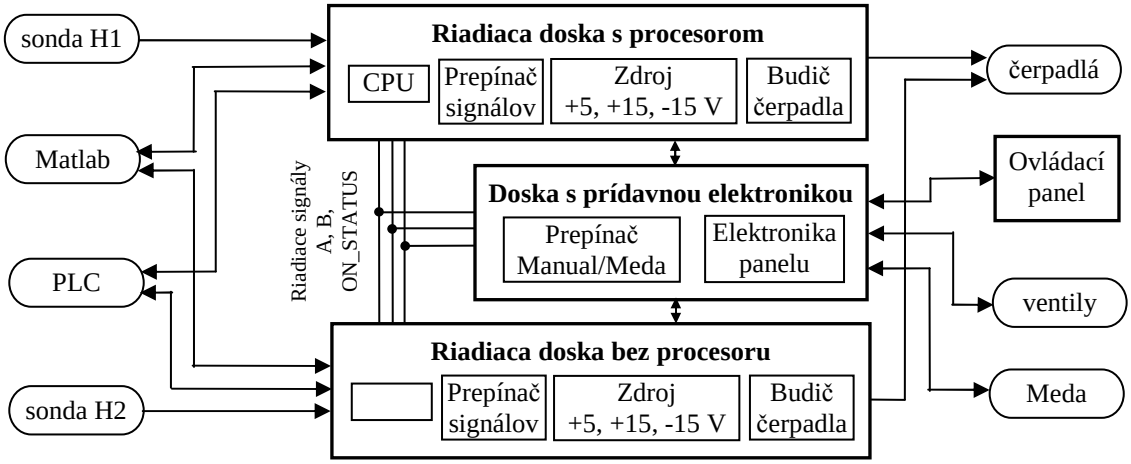


Obr. 2.4: Riadiaca jednotka

Návod k ovládaciemu panelu sa nachádza v kapitole 2.2.1.6. Návrh rozmiestnenia jednotlivých prvkov ovládania a ich popis je v prílohe D.

2.2.1 Riadiaca jednotka

V elektronickej časti boli použité dva kusy dosiek plošných spojov, ktoré slúžili ako prototyp pri riadení nových modelov vodární popísaných v diplomovej práci [7]. Keďže nie sú v tejto práci zadokumentované a líšia sa od elektroniky používanej v súčasnosti v modeloch, uvádzam ich stručný opis. Hlavná myšlienka ich funkcie je však podobná.



Obr. 2.5: Bloková schéma zapojenia elektroniky

2.2.1.1 Požiadavky na riadiacu jednotku

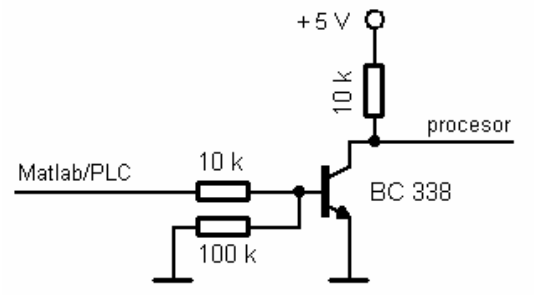
Riadiaca jednotka musí vedieť prepínať medzi rôznymi zdrojmi a typmi signálu a akceptovať ich napäťové úrovne. Analógové hodnoty riadiacej karty Matlabu aj PLC majú napäťové rozsahy 0 – 10 V. Digitálne signály z Matlabu sú kompatibilné s TTL logikou, teda s max. napätím 5 V. Digitálne signály z PLC sú v rozsahu 0 – 5 V pre logickú nulu a 10 – 30 V pre logickú jednotku.

Model sa zapína vysokou napäťovou úrovňou signálu ON/OFF privedenou na určitý pin konektoru (pozri tabuľku B.3). Výnimkou je ručný režim, ktorý reaguje na impulzy tlačidla ON/OFF. Riadiaca jednotka prepína riadenie podľa pevne nastavenej priority:

1. Matlab
2. PLC
3. Manual/Meda

2.2.1.2 Popis riadiacej dosky

Hlavnou súčiastkou na doske je 8-bitový procesor PIC16F84A od firmy Microchip. Vstupom do procesoru sú riadiace signály na zapnutie z Matlabu a PLC (vysoká napäťová úroveň), ktoré sú tranzistorom NPN prekonvertované na napätie blízke 0 V. Procesor teda prepne riadenie na Matlab alebo PLC podľa priority, ak daný pin je vstave logickej nuly. Pôvodne dodaný procesor s doskou reagoval opačne, tzn. spínal v logickej jednotke. Bolo preto potrebné prepísať kód procesoru a znovu ho naprogramovať. Upravený kód v assembleri od J. Hanzlíka [7] je na priloženom CD.



Obr. 2.6: Riešenie vstupného obvodu na spínanie Matlabom a PLC

Tretím vstupom do procesoru je signál z tlačidla ON/OFF umiestneného na hlavnom paneli. Procesor reaguje na jeho nábežnú hranu.

Dôležitými výstupmi procesoru sú tri signály:

- ON_STATUS – v log. 1 indikuje, že riadiaca jednotka je zapnutá
- A, B – určujú jednotlivé stavy, v ktorých sa nachádza riadiaca jednotka, a to podľa tabuľky:

	A	B
OFF	1	1
Manual	0	0
Matlab	0	1
PLC	1	0

Tabuľka 2.1: Riadiace signály *A*, *B* na vývodoch procesoru

Na doske sa nachádzajú dva analógové multiplexory, z ktorých je využitý iba jeden. Pomocou adries *A*, *B* prepína signál z nadradenej jednotky (PLC, Matlab, Manual, Meda) do výkonového zosilňovača pre čerpadlo. (Druhý multiplexor pôvodne spínal proporcionálny ventil na nových vodárňach.) Pred vstupom do multiplexoru sú však napäťové úrovne opäť invertované tranzistormi NPN. Multiplexor napájaný napätím 15 V je teda adresovaný podľa tabuľky 2.2.

	A	B
OFF	0 V	0 V
Manual	15 V	15 V
Matlab	15 V	0 V
PLC	0 V	15 V

Tabuľka 2.2: Riadiace signály *A*, *B* na vývodoch multiplexoru

Na doske sa ešte nachádza stabilizátor napätia 5 V, ktorý nepretržite napája procesor, ďalej sú tu spínače typu MOSFET, ktoré spínajú ostatné obvody, a to iba v zapnutom stave (ON_STATUS = 1). Medzi ne patrí aj stabilizátor napätia 15 V a zdroj – 15 V, ktoré sa používajú na napájanie multiplexorov a senzorov výšky hladiny (pozri kap. 2.1.3).

Pôvodná prototypová doska prešla mnohými fyzickými úpravami a prispôsobeniami ku konkrétnemu modelu vodárne (napr. vytvorenie vývodu symetrického napájania pre sondy výšky hladiny). Preto neuvádzam tvar plošného spoja. Aktuálne elektrické zapojenie je však v prílohe B.

2.2.1.3 Prepojenie dvoch riadiacich dosiek

Keďže jedna riadiaca doska obsahuje iba jeden výkonový zosilňovač, ktorý sa dá použiť na riadenie čerpadla, pre jednoduchosť boli použité dve rovnaké dosky. Procesor je umiestnený iba na jednej z nich, pričom navzájom sú prepojené vývody riadiacich signálov ON_STATUS, A a B na päticiach procesorov. Jedna doska (s procesorom) tak slúži na ovládanie „ľavej“ polovice modelu (čerpadlo 1, sonda výšky hladiny v prvom valci), druhá doska (bez procesoru) ovláda zvyšnú časť. Riadiace signály z nadradených systémov (PLC, Matlab, atď.) smerujú do oboch dosiek (obrázok 2.5).

2.2.1.4 Pripojenie analógového počítača Meda

Riadiaca doska, ktorá slúžila ako prototyp pri návrhu elektroniky pre nové modely vodární umožňuje prepojiť systém s manuálnym ovládaním a najviac dvoma nadriadenými jednotkami (napr. PLC a Matlab). Počas rekonštrukcie nášho modelu vznikla požiadavka pripojenia štvrtého systému – analógového počítača Meda.

Pri pripojovaní tohto počítača sa vyskytol problém s jeho vstupnými obvodmi. Ak je Meda vypnutá z napájania, vstupné obvody majú nízky odpor a môžu tak neúmerne zaťažiť meraný signál. Ostatné zariadenia, ku ktorým by bol signál pripojený paralelne merali by ovplyvnené hodnoty. Dôležité bolo preto odpojiť výstupy snímačov výšky hladiny od Medy, pokiaľ nie je v činnosti.

Jedným z riešení by bolo navrhnúť úplne novú riadiacu jednotku, ktorá by umožňovala prepínanie medzi štyrmi zdrojmi signálu. Použil by sa napríklad viackanálový analógový multiplexor, ktorý by bol ovládaný minimálne troma riadiacimi signálmi. Nutné by bolo, samozrejme, vyrobiť kompletne nový plošný spoj a naprogramovať odznovu procesor.

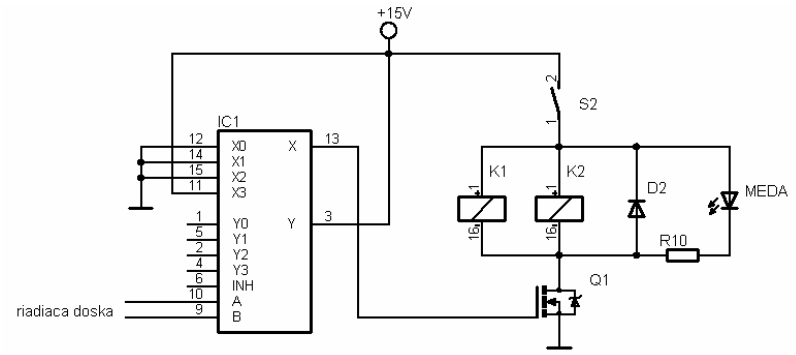
Po porade s vedúcim práce sme sa rozhodli pre jednoduchšie a rýchlejšie riešenie: Meda sa bude zapínať manuálne vypínačom umiestnenom na paneli a to iba v prípade,

ak je procesor v stave *Manual*. Prídavná elektronika zabezpečí automatické odpojenie Medy, ak procesor prejde do stavu riadenia s vyššou prioritou.

2.2.1.5 Návrh prídavnej elektroniky

Pre potreby vzájomného prepojenia signálov z oboch riadiacich dosiek s ovládacím panelom som navrhol samostatnú dosku plošného spoja. Obsahuje zároveň elektroniku prepínania signálov do Medy, ktorej problematika je rozobraná v predchádzajúcej časti 2.2.1.4. Schéma zapojenia je uvedená v prílohe B na obrázku B.3.

Hlavnou časťou zapojenia je analógový multiplexor. Riadiace signály sú rovnaké so signálmi použitými v multiplexoroch na riadiacej doske (viď tabuľka 2.2). Polovica multiplexoru spína jednu z indikačných LED diód, ktorá informuje o stave, v ktorom sa nachádza riadiaca jednotka (Matlab, PLC, Manual/Meda). Druhá polovica multiplexoru vedie do brány tranzistoru MOSFET, ktorý spína dve relé. Aby cez relé prechádzal prúd, musí byť zopnuté tlačidlo Meda na riadiacom paneli (v obrázku 2.7 označené ako S2), ktoré pripojí relé na kladné napätie. Relé sa teda zopne iba v prípade, ak je riadiaca jednotka v ručnom režime (multiplexor na základe signálov *A* a *B* prepustí do brány tranzistoru kladné napätie) a zároveň užívateľ zvolil na riadiacom paneli režim Meda. Prepnutím relé sa prepojí riadiaci signál na ovládanie čerpadiel z panelu na vstup od Medy a zároveň na Medu sa zapojí výstupné napätie zo senzorov výšky hladín.



Obr. 2.7: Jednoduchá logika spínajúca signál do analógového počítača Meda

2.2.1.6 Ovládací panel

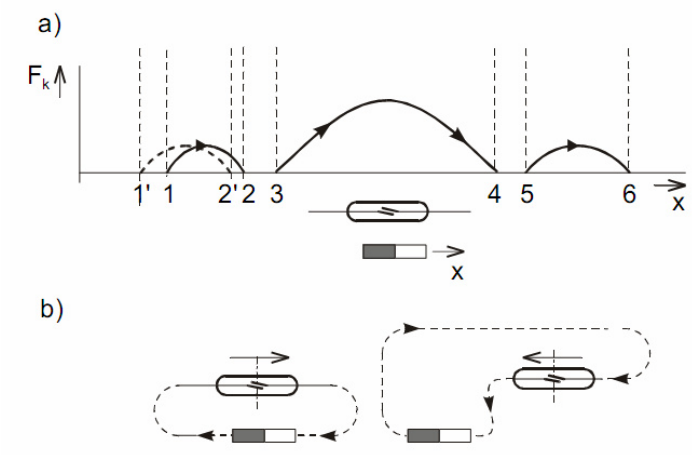
Ovládací panel spĺňa dve funkcie: indikačnú a možnosť ovládania modelu v ručnom režime. Schéma panelu sa nachádza v prílohe D.

Na paneli sa nachádzajú 3 zelené LED diódy informujúce o aktuálnom riadiacom mieste. Model sa zapne do ručného režimu stlačením tlačidla ON/OFF, pokiaľ už nie je ovládaný iným nadriadeným systémom. Výkon čerpadiel je vtedy možné ovládať pomocou dvoch potenciometrov. Ovládanie modelu pomocou Medy je možné zapnúť iba v ručnom režime stlačením tlačidla Meda. Zároveň sa rozsvieti zelená LED dióda na tlačidle indikujúca tento stav. Čerpadlá vtedy nereagujú na hodnoty nastavené potenciometrami. Model je možné vypnúť opätovným stlačením tlačidla ON/OFF.

Na paneli sa nachádzajú aj tri oranžové LED diódy indikujúce otvorenosť ventilov. Príslušná dióda svieti, ak je ventil otvorený.

2.2.2 Snímače stavu ventilov

Pri rekonštrukcii modelu vznikla požiadavka na elektronickú detekciu stavu ventilov. Aj keď sa ventil v určitom malom uhle otočenia správa ako proporcionálny (podrobnejší popis je v kapitole 2.1.1), pri komplexnom pohľade môžeme povedať, že má iba dva stavy: otvorený a uzavretý.



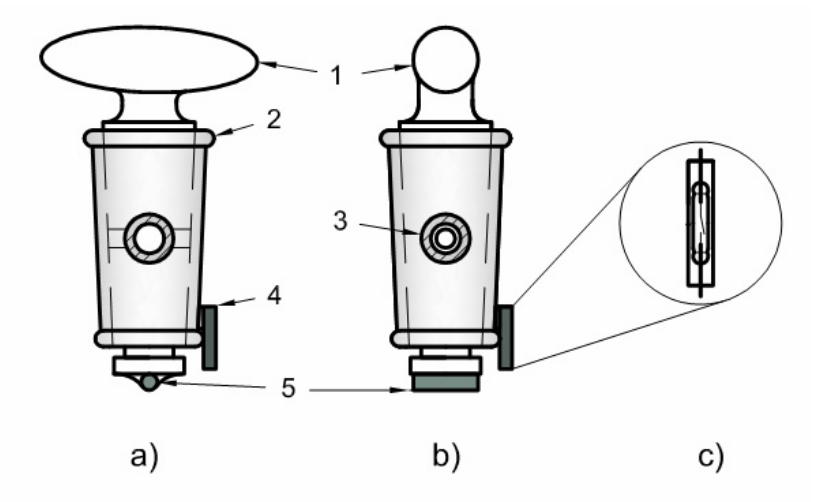
Obr. 2.8 Schéma spínania jazýčkového kontaktu (obrázky prevzaté z [12])
a) závislosť prítlačnej sily kontaktov jazýčkového senzoru na polohe magnetu
b) magnetický tok senzorom pri rôznych polohách magnetu

Spočiatku nebolo jasné, aký snímač na detekciu stavu ventilu použiť. Zo všetkých druhov snímačov polôh (optické závory, optické a mechanické inkrementálne snímače, indukčné snímače, jazýčkové kontakty, mikrospínače, atď.) som výber po porade s vedúcim práce zúžil na mikrotlačidlá a jazýčkové kontakty. Tieto senzory sú relatívne malé a jednoduché. Rozhodli sme sa teda, že sa bude detekovať iba stav: otvorený/uzavretý.

Nevýhodou mikrotlačidla je, že na zopnutie potrebuje mechanický kontakt. Bolo by teda nutné pripevniť na otočnú časť ventilu mechanické zariadenie, ktoré by tlačidlo zoplo. Znemožnilo by sa tak jednoduché rozobratie ventilu a jeho údržba. Ďalšou nevýhodou by mohla byť nemožnosť otočenia ventilu do rovnakej strany po dorazení na kontakt (ventilom bolo predtým možné otáčať donekonečna v jednom smere).

Nevýhodou jazýčkového kontaktu je zase nepravidelnosť spínania a niekedy jeho väčšia hysterézia [12] (viď obrázok 2.8). Podarilo sa však nájsť vzájomnú polohu senzoru a magnetu, pri ktorej dochádza k spínaniu približne vtedy, keď je ventil otvorený (viď obrázok 2.9).

Ako spínač bol zvolený jazýčkový kontakt od firmy Meder v plastovom puzdre kvôli väčšej odolnosti proti poškodeniu. Použitý magnet je tyčový s priemerom 3 mm a dĺžkou nepresahujúcou priemer vnútornej časti ventilu. Ventil je teda možné rozobrať bez poškodenia snímača.



Obr. 2.9: Vzájomná poloha senzoru s magnetom v závislosti na otvorení ventilu
a) ventil uzavretý
b) ventil naplno otvorený
c) vnútorná konštrukcia senzoru

K obrázku 2.9:

1. otočná časť ventilu
2. pevná časť ventilu
3. odtoková rúrka, v strede prepúšťací otvor v otočnej časti
4. magnetický senzor
5. magnet

2.2.3 Zdroj napätia

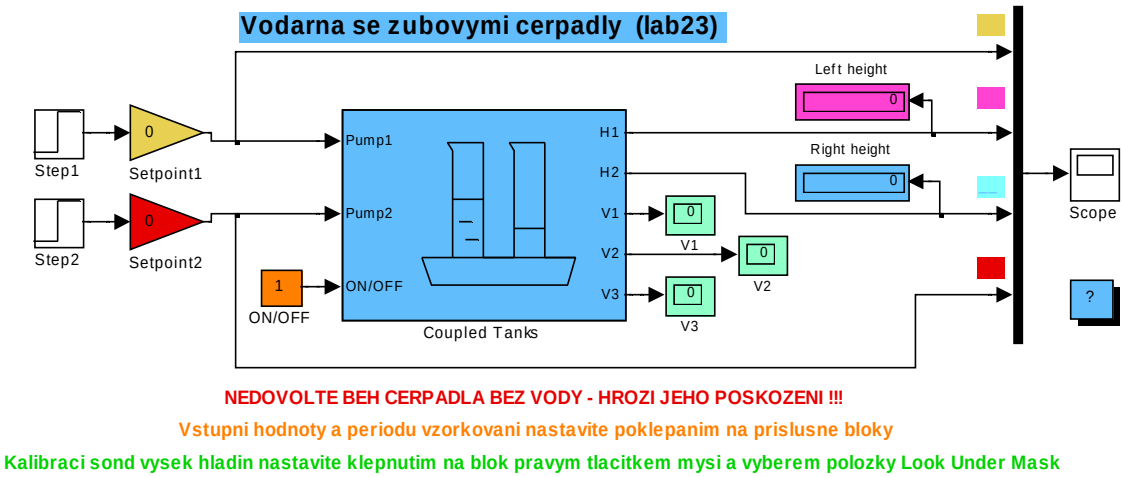
Keďže model vodárne obsahuje dve čerpadlá, každé o príkone 50 W, bolo potrebné nájsť vhodný zdroj napätia, ktorý by dostatočne pokryl ich spotrebu. Zvolený bol spínaný adaptér SYS 1250 od firmy Amicus s univerzálnym napätím 90 – 264 V. Zdroj má výstupné napätie 24 V, vysoký výstupný výkon 130 W a prúd 5,4 A. Samozrejmosťou je ochrana proti skratu.

Obr. 2.10: Zdroj SYS 1250 od firmy Amicus (obrázok prevzatý z katalógového listu výrobcu)

2.3 Pripojenie modelu k PC

Model je pripojený k počítaču pomocou vstupno-výstupnej karty PCI–1711. Samotná realizácia pripojenia je prostredníctvom konektoru Cannon. Význam pinov je uvedený v tabuľke B.3 a pripojenie ku karte PCI-1711 ukazuje tabuľka C.1.

Na riadenie modelu z Matlabu sa využíva Simulink a Real Time Toolbox. Analógové signály majú hodnoty 0 až 1, stavy ventilov hodnoty 0 alebo 1 (0 = zavretý, 1 = otvorený). Po celú dobu zapnutia modelu musí byť signál ON/OFF v log. 1.



Obr. 2.11: Šablóna na ovládanie modelu zo Simulinku

2.4 Pripojenie modelu k PLC

Vodáreň je pripojená k programovateľnému automatu SLC 500 s procesorom radu 2. K danému účelu bolo možné samozrejme použiť aj výkonnejší procesor, s vedúcim práce sme sa však rozhodli ku staršiemu modelu vodárne pripojiť aj starší automat. Procesor komunikuje s okolím pomocou komunikačného kanálu DH485. Na snímanie stavu hladiny a ovládanie čerpadiel slúži analógový vstupno-výstupný modul, digitálne moduly sú použité na zisťovanie stavu ventilov a na zapínanie modelu.

Automat je pripojený k riadiacej jednotke vodárne pomocou konektoru Cannon podobne ako matlabovská karta (viď kap. 2.3). Konektory na riadiacej jednotke sú navzájom opačné, nemôže teda dôjsť k zámene. Zapojenie modelu na jednotlivé adresy PLC je uvedené v tabuľke C.2. Automat je prispôsobený tak, že je k nemu možné okrem modelu vodárne pripojiť aj polohovacie zariadenie, ktoré je často využívané v predmete Programovateľné automaty.

Obr. 2.12: Programovateľný automat SLC 500, ktorý riadi model vodárne

2.5 Pripojenie modelu k Mede

Model vodárne je taktiež možné pripojiť k analógovému počítaču Meda, navrhnúť regulátor a na televízore sledovať priebeh analógových veličín. Model v súčasnosti k Mede nie je pripojený, má ale na riadiacom paneli pripravený 9-pinový konektor. Signály sa na tento konektor prepoja po zapnutí vypínača Meda na riadiacom paneli, ak je jednotka v ručnom režime. Podrobnosti ohľadom elektronického zapojenia sú uvedené v kapitole 2.2.1.4. Zapojenie konektoru uvádza tabuľka B.4.

Obr. 2.13: Analógový počítač Meda s televíznou obrazovkou

2.6 Technické parametre modelu

Napájanie modelu	24 V (jednosm.)
Výška	65 cm
Šírka	50 cm
HĺBka	34 cm
Objem zásobnej nádrže	6 l
Objem pracovnej nádrže	2 l
Príkon čerpadla	50 W

Tabuľka 2.3: Základné technické parametre modelu

Kapitola 3

Analýza systému

3.1 Fyzikálny popis

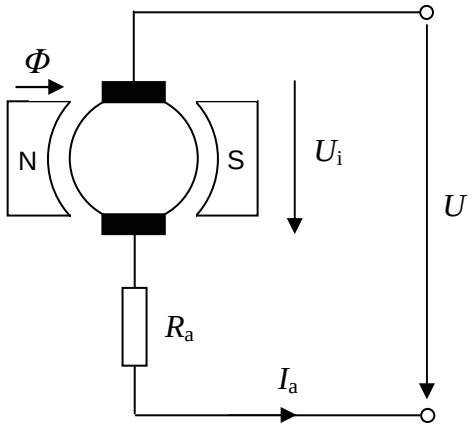
3.1.1 Fyzikálny popis čerpadla

Čerpadlo poháňa jednosmerný motor s permanentným magnetom. Podľa [2] alebo [9] môžeme pre jednosmerný motor s ustáleným napájacím napätím a otáčkami napísať vzťahy:

$$U = U_{\mathrm{i}} + R_{\mathrm{a}} I_{\mathrm{a}} \tag{3.1}$$

$$U_{\mathrm{i}} = k\,\Phi\,\omega \tag{3.2}$$

$$M = k\,\Phi\,I_{\mathrm{a}} \tag{3.3}$$



Obr. 3.1: Schéma jednosmerného motoru

kde:

U napájacie napätie motoru čerpadla (riadiace napätie) [V]

U_i indukované napätie na kotve motoru [V]

R_a odpor vinutia kotvy motoru [Ω]

I_a prúd pretekajúci kotvou [A]

Φ magnetický tok vytvorený permanentným magnetom [Wb]

ω uhlová rýchlosť otáčania kotvy [s^{-1}]

M elektromagnetický moment motoru [Nm]

k konštanta zahŕňajúca elektromagnetické a geometrické usporiadanie motoru [-]

Vzájomným dosadením rovníc 3.1 až 3.3 dostaneme vzťah vyjadrujúci otáčky jednosmerného motoru:

$$\omega = \frac{U - R_a I_a}{k\,\Phi}$$

$$\omega = \frac{U}{k\,\Phi} - \frac{R_a M}{(k\,\Phi)^2} \tag{3.4}$$

Otáčky teda priamoúmerne závisia na napájacom napätí U. Ak uvažujeme v našom prípade približne konštantný zaťažovací moment M (výška hladiny je malá a príliš sa nemení), posledný člen vo vzťahu 3.4 je konštantný a teda výsledný vzťah otáčok motora na napätí je lineárny. Keďže ide o zubové čerpadlo, lineárny je aj objemový prietok v závislosti na napätí.

3.1.2 Fyzikálny popis kapacitných sond výšky hladiny

Sonda pracuje na princípe zmeny kapacity kondenzátoru vplyvom zmeny výšky hladiny. Podľa [6] kapacitu koaxiálneho kondenzátoru môžeme vypočítať podľa vzťahu:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r h}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \tag{3.5}$$

kde:

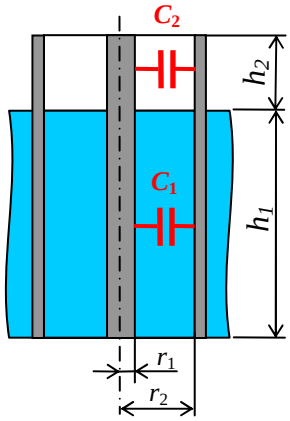
ε_0 permitivita vákua [Fm^{-1}]

ε_r relatívna permitivita látky [-]

h výška kondenzátoru [m]

r_1 polomer vnútornej elektródy [m]

r_2 polomer vonkajšej elektródy [m]



Obr. 3.2: Prierez kapacitnou sondou

Kapacita je teda priamoúmerne závislá na výške h. Sonda meria paralelnú kombináciu kapacít C_1 a C_2, kde C_1 predstavuje časť trubice zaplavenej vodou a C_2 časť nad ňou, na vzduchu. Keď uvážime, že relatívna permitivita vody dosahuje hodnotu $\varepsilon_r = 80$ (oproti vzduchu $\varepsilon_r = 1$), môžeme kapacitu vzduchovej časti C_2 oproti časti pod hladinou C_1 zanedbať a výsledný vzťah kapacity na výške hladiny sa stane lineárny.

3.1.3 Fyzikálny popis spojených nádob

Fyzikálny systém tvoria dve nádoby spojené ventilom. Pre jednu z nich platí vzťah:

$$\frac{dV}{dt} = S\frac{dh}{dt} = q_i - q_o \tag{3.6}$$

kde:

V objem kvapaliny v nádrži [m^3]

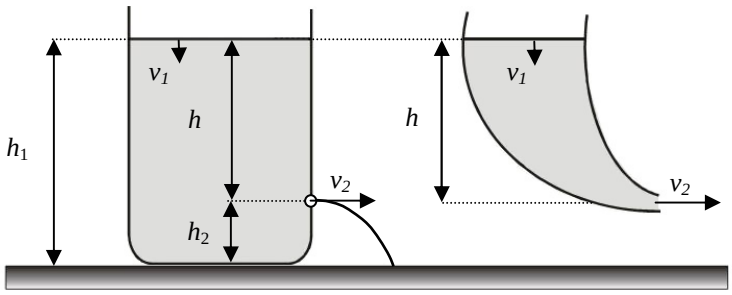
S prierez nádrže [m^2]

h výška kvapaliny v nádrži [m]

q_i objemový prítok do nádrže [m^3s^{-1}]

q_o objemový odtok z nádrže [m^3s^{-1}]

Výtokovú rýchlosť kvapaliny z nádoby môžeme podľa [1] určiť napríklad z Bernoulliho rovnice. Na tento problém sa možno pozerať aj ako na prúdenie kvapaliny v trubici zvláštneho tvaru (obr. 3.3). Uvažujme dva prierezy takej „trubice“. Prvý leží na úrovni hladiny kvapaliny v nádobe, druhý v mieste otvoru v stene nádoby.



Obr. 3.3: Vytekanie kvapaliny otvorom (obrázok prevzatý z [1])

Na základe Bernoulliho rovnice platí:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2 \tag{3.7}$$

kde:

$p_1 = p_2 = p_a$, kde p_a je atmosfericky tlak [Pa] (oba tlaky teda z rovnice vypadnú)

ρ hustota kvapaliny [kg.m^{-3}]

g tiažové zrýchlenie 9,81 kg.m^{-2}

$h = h_1 - h_2$ výška voľnej hladiny nad otvorom [m]

v_1 rýchlosť poklesu kvapaliny v nádobe [m.s^{-1}]

v_2 výtoková rýchlosť [m.s^{-1}]

Úpravou rovnice 3.7 a uvážením, že $v_1 << v_2$ dostávame vzťah:

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \tag{3.8}$$

Z neho pre výtokovú rýchlosť plynie:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{3.9}$$

Ak sa výška hladiny v nádobe nemení, objemový výtok V kvapaliny za čas t môžeme popísať vzťahom:

$$V = Svt = St\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{3.10}$$

Skutočný objem je však oveľa menší, pri výtoku totiž dochádza k zúženiu kvapalinového lúča. Na výtokový objem má tiež vplyv tvar otvoru a viskozita kvapaliny. Predpokladáme, že všetky tieto straty sa s výškou hladiny nemenia a zahrnieme ich do konštanty μ. Výtokový objem potom vyjadríme vzťahom:

$$V = \mu St\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{3.11}$$

Objemové prietoky jednotlivými ventilmi v našom modeli môžeme teda popísať vzťahmi:

$$q_{V1} = \mu_1 S_{V1}\sqrt{2gh_1} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned} q_{V2} &= \mu_2 S_{V2}\sqrt{2g(h_1 - h_2)}; \quad h_1 \geq h_2 \\ q_{V2} &= -\mu_2 S_{V2}\sqrt{2g(h_2 - h_1)}; \quad h_2 > h_1 \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$q_{V3} = \mu_3 S_{V3}\sqrt{2gh_2} \tag{3.14}$$

kde:

q_{V1}, q_{V2}, q_{V3}	objemové prítoky (resp. odtoky) cez jednotlivé ventily [m^3s^{-1}]
S_{V1}, S_{V2}, S_{V3}	plošné prierezy jednotlivých ventilov [m^2]
μ_1, μ_2, μ_3	konštanty vyjadrujúce straty pre jednotlivé ventily [-]
h_1, h_2	výšky hladín v jednotlivých nádržiach [m]

V kapitole 3.1.1 sme odvodili, že objemový prítok čerpadla na napätí je lineárny. Môžeme preto napísať vzťahy:

$$q_{P1} = k_{P1}(u_1 - u_{d1}) \tag{3.15}$$

$$q_{P2} = k_{P2}(u_2 - u_{d2}) \tag{3.16}$$

kde:

q_{P1}, q_{P2} objemové prítoky jednotlivých čerpadiel [m^3s^{-1}]

k_{P1}, k_{P2} konštanty čerpadiel [$m^3s^{-1}V^{-1}$]

u_1, u_2 napätia na čerpadlách [V]

u_{d1}, u_{d2} tzv. „mŕtve pásma“ čerpadiel – napätia, pri ktorých sa začínajú čerpadlá otáčať [V]

Poznámka: Pri uvažovaní vzťahov v strojových jednotkách Matlabu sú všetky napätia u_1, u_2, u_{d1}, u_{d2} bezrozmerné a konštanty k_{P1}, k_{P2} majú rozmer [m^3s^{-1}].

Vychádzajúc zo vzťahu 3.6 platia pre jednotlivé nádrže vzťahy:

$$S\frac{dh_1}{dt} = q_{P1} - q_{V1} - q_{V2} \tag{3.17}$$

$$S\frac{dh_2}{dt} = q_{P2} + q_{V2} - q_{V3} \tag{3.18}$$

Dosadením z rovníc 3.12 až 3.16 a úpravou dostaneme:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{4k_{P1}}{\pi D^2}\left(u_1 - u_{d1}\right) - \mu_1 \frac{d_{V1}^2}{D^2}\sqrt{2gh_1} - \mu_2 \frac{d_{V2}^2}{D^2}\sqrt{2g\left(h_1 - h_2\right)} \tag{3.19}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{4k_{P2}}{\pi D^2}\left(u_2 - u_{d2}\right) + \mu_2 \frac{d_{V2}^2}{D^2}\sqrt{2g\left(h_1 - h_2\right)} - \mu_3 \frac{d_{V3}^2}{D^2}\sqrt{2gh_2} \tag{3.20}$$

kde:

d_{V1}, d_{V2}, d_{V3} vnútorné priemery jednotlivých ventilov [m]

D vnútorný priemer valcov (predpokladáme, že priemery oboch valcov sú rovnaké) D = 0,078 m

Konštanty μ_1, μ_2, μ_3 v tomto prípade zahrňujú aj mieru otvorenia ventilu, prípadne $\mu = 0$, ak je ventil uzavretý.

3.2 Identifikácia

Pre potreby identifikácie sa na model pozeráme ako na systém s jedným vstupom a jedným výstupom, kde vstupom je napätie u_1 a výstupom výška vody v pravom valci h_2. Výtokový ventil z prvej nádrže je uzavretý, prepúšťací a odtokový ventil z druhej nádrže sú naplno otvorené. Zavedením týchto úprav do rovníc 3.19 a 3.20 dostaneme vzťahy:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{4k_{P1}}{\pi D^2}(u_1 - u_{d1}) - \mu_2 \frac{d_{V2}^2}{D^2}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{3.21}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \mu_2 \frac{d_{V2}^2}{D^2}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - \mu_3 \frac{d_{V3}^2}{D^2}\sqrt{2gh_2} \tag{3.22}$$

Ich zjednodušením dostaneme:

$$\frac{dh_1}{dt} = K_P(u_1 - u_{d1}) - K_1\sqrt{h_1 - h_2} \tag{3.23}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = K_1\sqrt{h_1 - h_2} - K_2\sqrt{h_2} \tag{3.24}$$

kde:

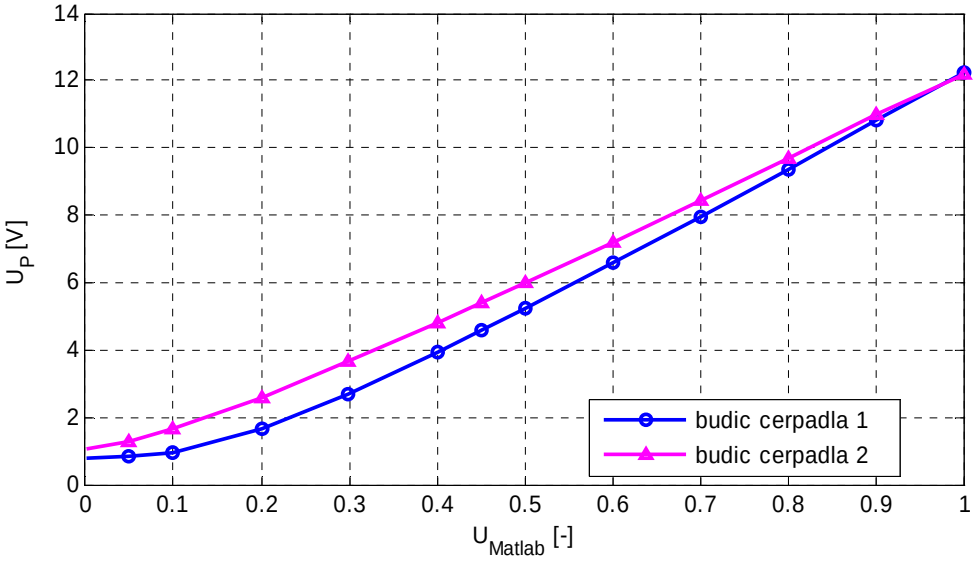
$$K_P = \frac{4k_{P1}}{\pi D^2}, \quad K_1 = \mu_2 \frac{d_{V2}^2}{D^2}\sqrt{2g}, \quad K_2 = \mu_3 \frac{d_{V3}^2}{D^2}\sqrt{2g}$$

Úlohou identifikácie je teda určiť konštanty u_{d1}, K_P, K_1 a K_2.

3.2.1 Identifikácia čerpadiel

Prvým krokom bolo odmeranie prevodnej charakteristiky budiča čerpadla, ktorý tvorí step-down konvertor LM 2596. Meranie prebiehalo tak, že v Matlabe boli zadávané postupne hodnoty pre čerpadlo v rozsahu 0 – 1 a priamo na svorkách sa meralo napätie. Čerpadlo bolo počas merania odpojené a namiesto neho bol výstup konvertoru zaťažený odporom 1000 Ω. Najnižšie možné napätie konvertoru pre

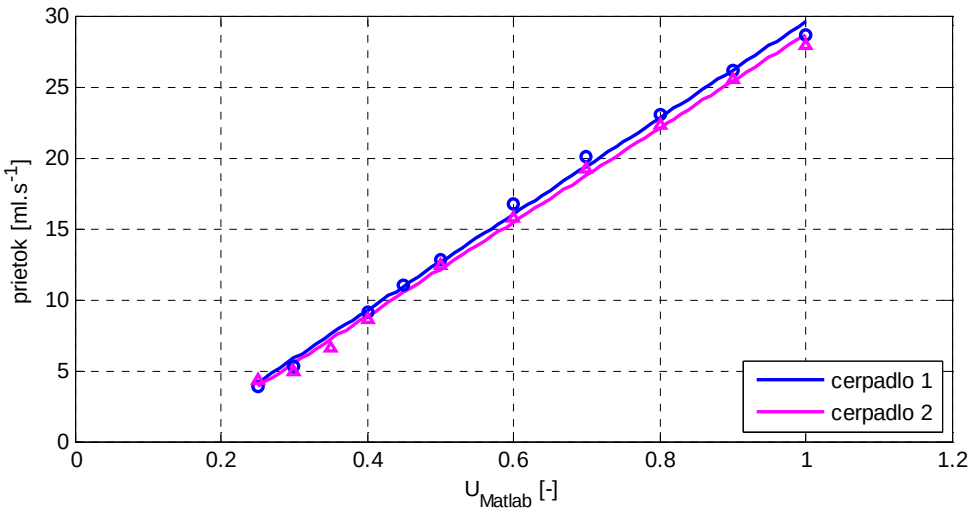
hodnotu 0 nastavenú v Matlabe činilo 1,24 V. Keďže čerpadlá sa už pri tejto hodnote otáčali a čerpali kvapalinu, bola do série s každým čerpadlom zaradená výkonová dióda P600K, ktorá je dimenzovaná na prúd prechádzajúci čerpadlom. Charakteristika budiča na obr. 3.4 je už spolu s diódou. Z grafu vidíme, že pracovný bod by sme mali voliť uprostred charakteristiky v lineárnej oblasti.



Obr. 3.4: Charakteristika výkonového budiča čerpadla

Nasledovalo určenie statickej charakteristiky čerpadla. Podľa teoretického modelu uvedeného v kapitole 3.1.1 očakávame lineárnu závislosť prietoku čerpadla na riadiacom napätí. Pri meraní bolo v Matlabe postupne nastavované napätie od 0 do 1 a pre jednotlivé hodnoty stopkami odmeraný čas, za ktorý čerpadlo pričerpalo konštantný objem kvapaliny (výšku kvapaliny 5 alebo 10 cm, predpokladáme konštantný prierez valcov). Všetky ventily boli pri meraní uzatvorené. Z množstva pričerpanej kvapaliny a času vieme vypočítať objemový prietok.

Meranie pre každé napätie sa uskutočnilo pričerpávaním v minimálne v dvoch rôznych počiatočných výškach hladiny. Cieľom bolo zistiť mieru pôsobenia výšky kvapalinového stĺpca na otáčky čerpadla a tým aj jeho prietok. Zistený rozdiel bol však minimálny, predstavoval chybu max. 2 % od priemernej hodnoty. Táto chyba mohla byť spôsobená aj nepresným meraním (ľudský faktor pri ovládaní stopiek) a taktiež nestálym chodom čerpadla. Čerpadlo totiž má dosť často kolísavý chod.



Obr. 3.5: Statická charakteristika čerpadla

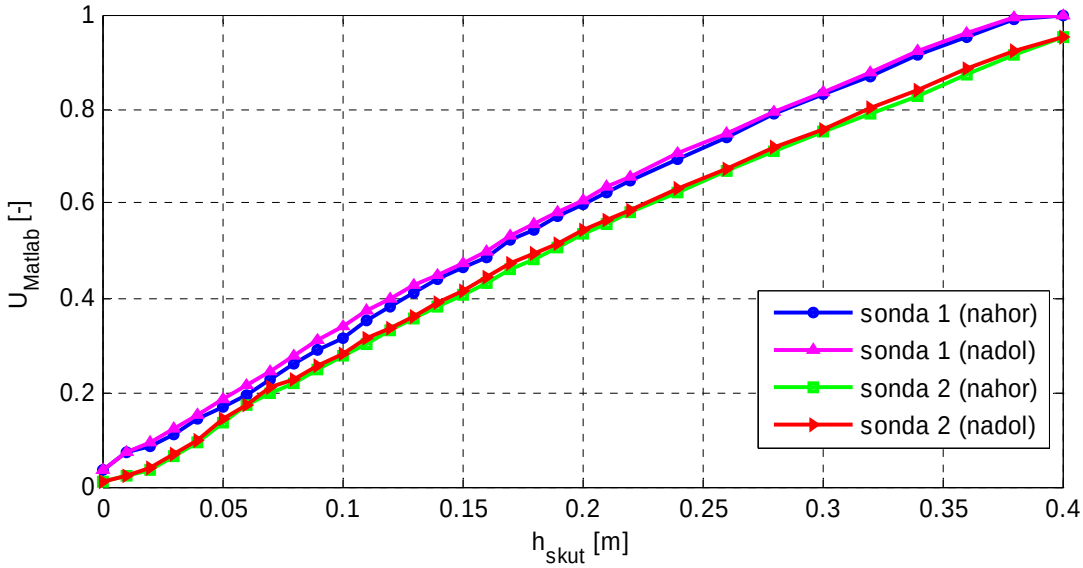
Pre potreby identifikácie teda uvažujeme lineárnu statickú charakteristiku čerpadla. Na obrázku 3.5 sú lineárne interpolované priemerné hodnoty prietokov pre jednotlivé napätia. Z rovníc priamok môžeme určiť konštanty čerpadla vo vzťahoch 3.15, 3.16: $k_{P1} = 33{,}874.10^{-6}$ m^{3}s^{-1} a $u_{d1} = 0{,}1274$ [-] (konštanty pre druhé čerpadlo vychádzajú: $k_{P2} = 33{,}103.10^{-6}$ m^{3}s^{-1} a $u_{d2} = 0{,}1334$ [-]) a z toho predelením plochou prierezu valca dostaneme konštantu vo vzťahu 3.23: $K_P = 0{,}00709$ ms^{-1} .

3.2.2 Identifikácia kapacitných sond výšky hladiny

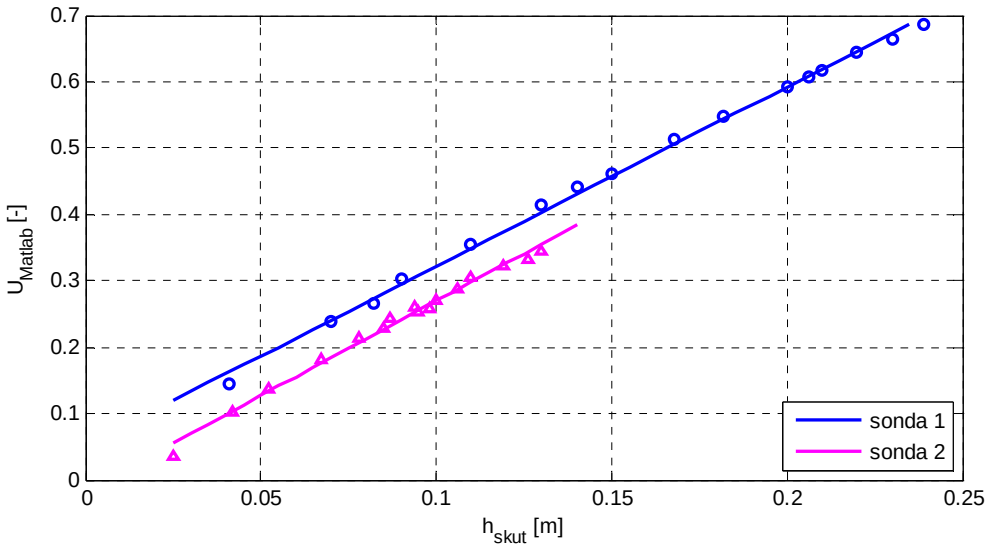
Cieľom bolo stanoviť prevodný vzťah medzi výstupným napätím sondy meraným Matlabom v rozsahu 0 – 1 a skutočnou výškou hladiny v metroch. Prvé meranie predchádzalo úplné napustenie oboch nádrží vodou z dôvodu omočenia vnútorných stien kapacitných sond a zabezpečenia malej hysterézie. Meranie bolo uskutočnené pre zvyšovanie hladiny ako aj pre jej znižovanie. Namerané hodnoty sú na obrázku 3.6. Hysterézia nie je veľmi veľká, v prepočte dosahuje hodnoty približne 2 – 4 mm.

Prvotné napustenie nádrží až doplna pred meraním sa neskôr ukázalo ako nevhodné. Pri meraní prechodovej charakteristiky (viď kapitola 3.2.3) a aj pri regulácii v okolí ustáleného stavu sa výška hladín mení veľmi málo. Sonda však počas ustaľovania (rádovo desiatky minút) dávala na výstupe iné napätie napriek tomu, že výška hladiny v nádrži bola rovnaká. Rozdiel v udávanej výške činil až cca. 5 mm. Spôsobené to

mohlo byť pravdepodobne tým, že kvapalina, ktorá zostala na vnútorných stenách sondy po plnom napustení valcov, vyschla pri dlhodobom ustaľovaní v nižšej výške a spôsobila tak zmenu kapacity meracieho kondenzátora. Preto som sa rozhodol nenapúšťať nádrže pred meraním až doplna, ale len do výšky predpokladaného ustáleného stavu. Linearizovaná prevodná charakteristika odmeraná iba do výšky asi 4 cm nad pracovným bodom sa nachádza na obrázku 3.7.

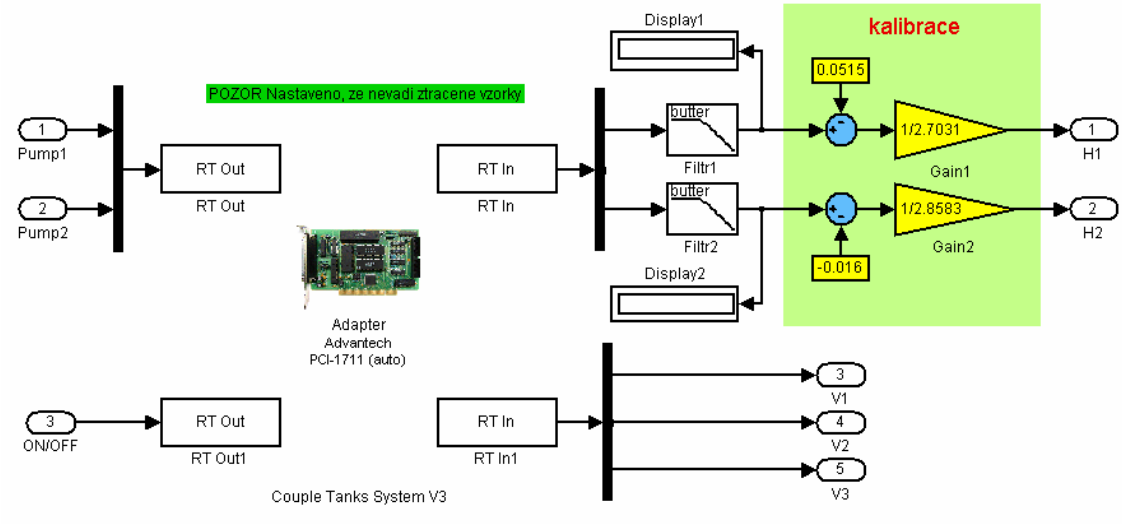


Obr. 3.6: Prevodná charakteristika kapacitných sond výšky hladiny (po predchádzajúcom napustení nádrží doplna)



Obr. 3.7: Prevodná charakteristika kapacitných sond výšky hladiny (lineárna interpolácia do hodnoty predpokladaného ustáleného stavu)

Konštanty rovníc priamok získané interpoláciou prevodnej charakteristiky boli použité v bloku „kalibrace“ (obrázok 3.8) na prepočet strojových jednotiek Matlabu na výšku hladiny v metroch. Signál zo sond je do značnej miery zašumený, preto je pred prepočtom filtrovaný Butterworthovým filtrom 2. rádu so zlomovou frekvenciou 0,2 rad.s^{-1}.



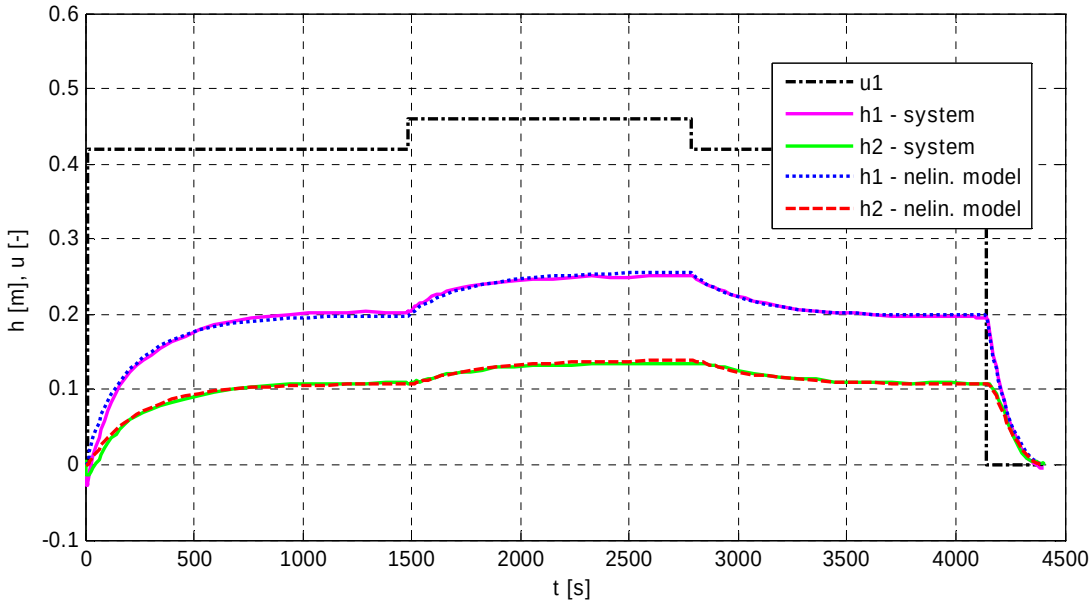
Obr. 3.8: Vnútorné zapojenie bloku ovládajúceho vodáreň z obrázku 2.11

3.2.3 Prechodové charakteristiky

Po identifikovaní čerpadiel a kapacitných sond na meranie výšky hladín nasledovalo odmeranie prechodovej charakteristiky systému. Ľavý ventil bol uzatvorený, stredný a pravý ventil naplno otvorené. Prvá charakteristika (vo veľkom) je pre skok napätia z $u_1 = 0$ na $u_1 = 0{,}42$, druhá charakteristika (v malom) je pre skok o cca. +10 % na hodnotu $u_1 = 0{,}46$. Nasleduje návrat na pôvodnú hodnotu.

V ustálenom stave je zmena výšky hladín nulová, to znamená, že ľavé strany rovníc 3.23 a 3.24 sa rovnajú nule. To nám umožňuje dosadením ustálených výšok vypočítať chýbajúce hodnoty konštánt. Priemerovaním z 3 ustálených stavov získame hodnoty: $K_1 = 0{,}00688\,\mathrm{m}^{\frac{1}{2}}s^{-1}$, $K_2 = 0{,}00634\,\mathrm{m}^{\frac{1}{2}}s^{-1}$.

Porovnanie prechodových charakteristík s nelineárnym modelom je na obrázku 3.9. Vidíme, že model je dobrou aproximáciou reálneho systému.



Obr. 3.9: Porovnanie prechodových charakteristík systému s nelineárnym modelom

3.3 Linearizácia

Pre potreby identifikácie sa na model pozeráme ako na systém s jedným vstupom a jedným výstupom Nelineárny systém popísaný v kapitole 3.2 má dva stavy: $x_1 = h_1$, $x_2 = h_2$, jeden vstup u_1 a jeden výstup $y = h_2$. Model je linearizovaný v pracovnom bode $\boldsymbol{u}_0 = u_{10} = 0{,}42$ a $\boldsymbol{x}_0 = [x_{10} \;\; x_{20}]^T = [0{,}200 \;\; 0{,}109]^T$. Matice stavového popisu majú pre tento pracovný bod tvar:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -K_1 \dfrac{1}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} & K_1 \dfrac{1}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} \\ K_1 \dfrac{1}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} & -K_1 \dfrac{1}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} - K_2 \dfrac{1}{2\sqrt{h_{20}}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} K_P \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{3.25}$$

$$\boldsymbol{C} = [0 \quad 1], \qquad \boldsymbol{D} = [0].$$

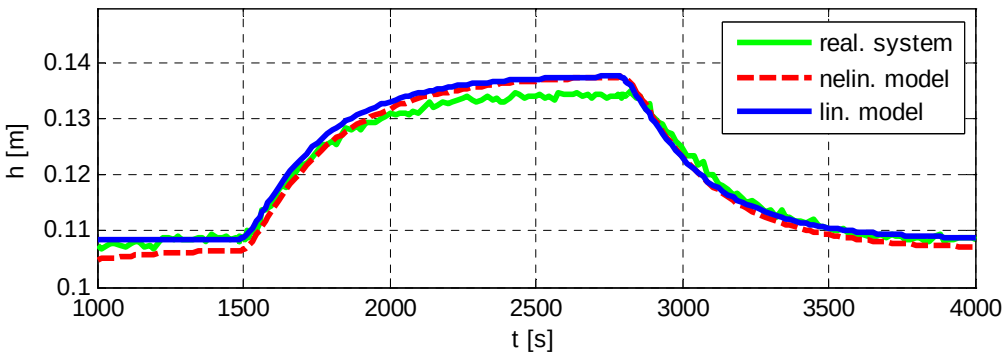
Dosadením za príslušné konštanty dostaneme:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -0{,}01137 & 0{,}01137 \\ 0{,}01137 & -0{,}02099 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0{,}00709 \\ 0 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}. \tag{3.26}$$

Prenos systému vypočítaný z týchto matíc (napr. podľa [3]) je:

$$\boldsymbol{G}(s) = \frac{8{,}061.10^{-5}}{s^2 + 0{,}03236s + 0{,}0001094} \tag{3.27}$$

Z obrázku 3.10 je zrejmé, že lineárny model pre odchýlku 10 % od pracovného bodu je dobrou aproximáciou nelineárneho modelu resp. reálneho systému.



Obr. 3.10: Porovnanie reálneho systému s lineárnym a nelineárnym modelom

Kapitola 4

Využitie modelu vo výuke

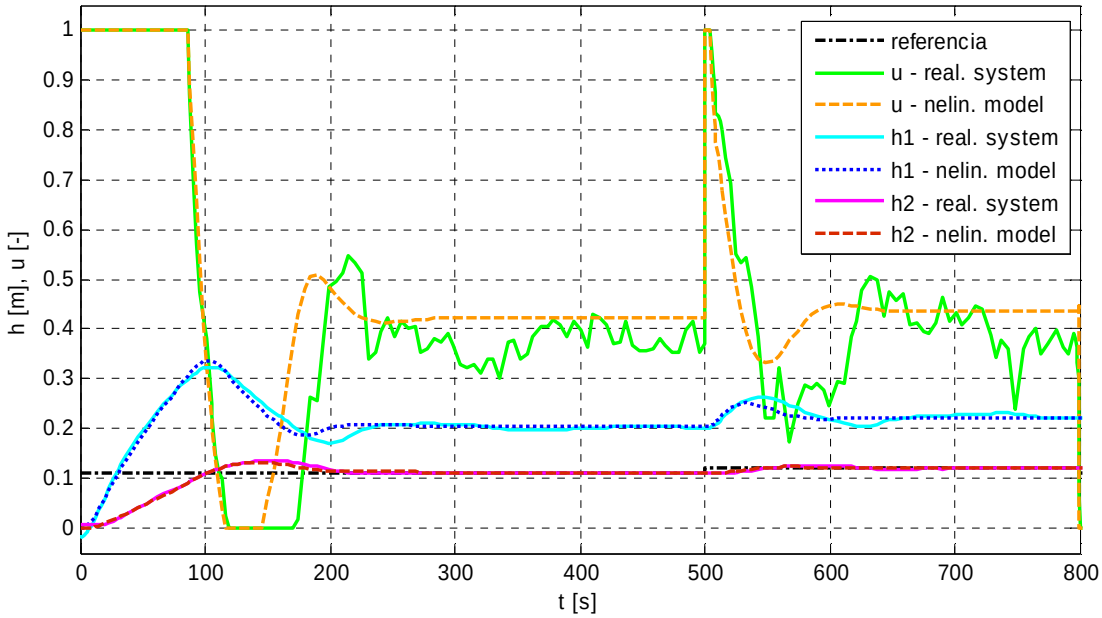
V tejto kapitole je popísaný návrh regulátorov pre riadenie prostredníctvom Matlabu a PLC. Reguluje sa výška hladiny v pravej nádrži zmenou čerpania vody do ľavého valca. Predpokladá sa, že vypúšťací ventil z ľavej nádrže je uzatvorený, prepúšťací a odtokový ventil z druhej nádrže sú naplno otvorené. Zmenou otvorenia ventilov je možné simulovať poruchovú veličinu. Aj keď sa síce nepredpokladá veľké využitie modelu vo výučbe hlavne kvôli vysokej hlučnosti, v závere kapitoly sa nachádzajú návrhy zadaní úloh pre študentov.

4.1 Návrh regulátoru

4.1.1 Návrh regulátoru pre Matlab

Výstupné napätie sond na meranie výšky hladiny je veľmi zašumené a bez jeho filtrácie nie je riadenie možné. Simulinkový model obsahuje preto Butterworthov filter 2. rádu so zlomovou frekvenciou 0,2 rad.s^{-1}. Linearizovaný model som rozšíril o dynamiku tohto filtru a pomocou frekvenčných metód [3] som navrhol PID regulátor s filtráciou derivačnej zložky a s obmedzením integračnej zložky (anti-windup). Reguláciu z prázdnych nádob do pracovného bodu a následný skok žiadanej hodnoty o 10 % je na obrázku 4.1. Regulátor má prenos:

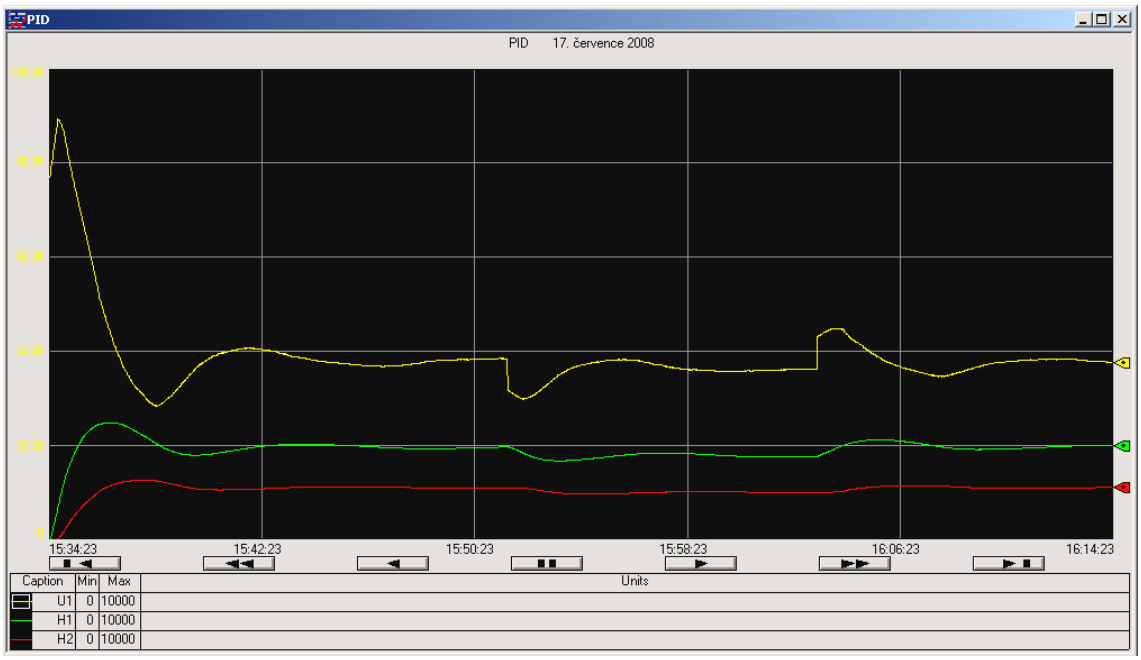
$$C(s) = \frac{360(s + 0{,}0531)(s + 0{,}009871)}{s(s + 0{,}6338)} \tag{4.1}$$



Obr. 4.1: Porovnanie reálneho systému a nelineárneho modelu pri regulácii z prázdnych nádob do pracovného bodu a následný skok žiadanej hodnoty o 10 %

4.1.2 Návrh regulátoru pre PLC

Pre reguláciu výšky hladiny prostredníctvom PLC sa využila priamo PID inštrukcia, ktorú ponúka daný procesor. Akčný zásah je v závislosti na hodnotách



Obr. 4.2: Priebeh regulácie prostredníctvom PLC (žlté – napätie na čerpadle, zelené – výška v ľavej nádrži, červené – výška v pravej nádrži)

proporcionálneho zosilnenia, integračnej a derivačnej konštanty vypočítaný podľa vzťahu:

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{dPV(t)}{dt} \right] + bias \tag{4.2}$$

kde:

$u(t)$	akčná veličina v čase t
K_P, T_I, T_D	konštanty regulátoru [–; min; min]
$e(t)$	odchýlka riadenej veličiny od zadanej hodnoty v čase t
$PV(t)$	(process variable) riadená veličina v čase t
$bias$	voliteľný posun

Procesor tak nepočíta derivačnú zložku z odchýlky, ale priamo z riadenej veličiny. Navyše veľkosť proporcionálneho zosilnenia je obmedzená na maximálnu hodnotu 25,5. To znemožnilo použiť regulátor navrhnutý pre riadenie z Matlabu (4.1). Použitý regulátor v PLC bol navrhnutý metódou „ručnej optimalizácie“ simuláciami v Simulinku. Konštanty regulátoru udáva nasledujúca tabuľka:

K_P	22 [-]
T_I	1,8 [min]
T_D	0,15 [min]

Tabuľka 4.1: Konštanty PID regulátoru v PLC

4.2 Zadania úloh pre študentov

V tejto kapitole sú uvedené zadania úloh pre študentov, ktoré je možné využiť v súčasne vyučovaných predmetoch na Katedre riadiacej techniky. Preto aj ich návrh je inšpirovaný zadaniami pre existujúce fyzikálne modely používanými pri výuke [10].

Zadanie 4.1: Model predstavuje systém spojených nádrží s riadením výšky hladiny. Základom mechanickej časti sú dve zubové čerpadlá, ktoré čerpajú vodu zo zásobnej nádrže do dvoch valcov. Oba valce sú navzájom prepojené ventilom.

Z každého valca zároveň vedú výpustné ventily do zásobnej nádrže. Výšky hladín h_1, h_2 sú merané kapacitnými sondami a prevádzané na napäťové signály, ktoré sa dajú zobraziť v Simulinku ako bezrozmerné veličiny $h_1, h_2 \in \langle 0,1 \rangle$ alebo odčítať priamo na valcoch v centimetroch. Vstupmi do systému sú napätia na čerpadlách $u_1, u_2 \in \langle 0,1 \rangle$ (bezrozmerné veličiny Matlabu), ktorými po prevode RT Toolboxom Matlabu sú ovládané výkonové zosilňovače čerpadiel. Čerpadlá môžu iba pričerpávať.

Pri odvodení fyzikálneho popisu systému môžeme zanedbať dynamiku čerpadla s ohľadom na pomalú dynamiku celého systému. Ďalej môžeme predpokladať, že čerpadlo sa chová ako zdroj objemového prítoku $q_P = k_P(u - u_d)$ [m^{3}s^{-1}], kde u_d je mŕtve pásmo čerpadla (pásmo necitlivosti). Predpokladáme tiež, že čerpadlo je dokonale tesné a veľkosť prítoku nezávisí na výške hladiny vody v nádrži.

Pre identifikáciu sa na model dívame ako na systém s jedným vstupom a jedným výstupom (SISO), kde vstupom je napätie u_1 a výstupom výška vody v pravom valci h_2. Vypúšťací ventil z ľavej nádrže je uzatvorený, prepúšťací a odtokový ventil z druhej nádrže sú naplno otvorené. Množstvo vody pretekajúce z ľavej nádrže do pravej závisí na rozdiele výšok hladín a tiež na ploche ventilu, jeho tvare a viskozite vody. Všetky tieto veličiny zahrnieme do konštanty vyjadrujúcej straty: μ. Podobne sa dá opísať aj odtok kvapaliny z pravého ventilu ako voľný výtok z otvorenej nádoby. Pokiaľ bude prítok čerpadla konštantný a na systém nebudú pôsobiť poruchy, dôjde po určitom čase k ustáleniu hladín v oboch valcov. Z výšky hladín a z napätia na čerpadle je možné potom vypočítať jednotlivé konštanty ventilov.

Úlohy:

1. Popíšte systém fyzikálnymi rovnicami uvažujúc pritom obe čerpadlá a všetky tri ventily. Na základe neho vytvorte model v Simulinku vrátane všetkých nelinearít a otestujte jeho rozumné chovanie. Jednotlivé konštanty si vhodne zvoľte.
2. Zjednodušte fyzikálny popis systému na model SISO podľa vyššie uvedeného popisu. Linearizujte ho v všeobecnom pracovnom bode a zapíšte ho pomocou matíc, kde stavový vektor je $\boldsymbol{x} = [x_1 \;\; x_2]^T = [h_1 \;\; h_2]^T$.
3. Zoznámte sa s ručným ovládaním modelu a pomocou Simulinku.
4. Skalibrujte sondy výšky hladiny. Pred meraním sa odporúča kvôli lepšej opakovateľnosti nádrže naplniť a vypustiť, nie však doplna, ale len do výšky niekoľko centimetrov nad predpokladaným pracovným bodom (v ľavom valci asi

do 25 cm, v pravom do 15 cm). Počas merania, ktoré trvá aj niekoľko desiatok minút, môže kvapalina na stenách sondy nad hladinou vody vyschnúť a tak ovplyvniť kapacitu meracieho kondenzátora. Kliknite na blok vodárne v Simulinkovej schéme pravým tlačítkom myši a z menu vyberte ponuku „Look under mask“. Vašou úlohou je správne nastaviť konštanty zosilnenia a ofsetu v zelenom rámčeku. (Doporučený postup: Pre jednotlivé výšky hladiny odčítajte v Matlabe výšku v strojových jednotkách a preložte priamkou. Berte pritom do úvahy to, že pri nízkych hladinách sonda meria veľmi nepresne – merací kondenzátor je v skutočnosti niekoľko milimetrov nad nulovou hladinou vody. Z rovnice priamky je možné určiť potrebné konštanty.)

5. Odmerajte statickú charakteristiku čerpadla, tzn. závislosť prítoku na napätí. Postup si zvoľte.
6. Zmerajte prechodovú charakteristiku vo veľkom z prázdnych valcov. Vhodné vstupné napätie je u_1 = 0,42 (max. 0,45). Nechajte systém dobre ustáliť (1500 – 2000 s). Po ustálení zmerajte rovnakým spôsobom charakteristiku na skok vstupnej veličiny o +10 % a na záver na skok opačným smerom. Budete mať tak dáta na porovnanie skutočného systému s lineárnym modelom.
7. Z ustálených stavov vypočítajte hodnoty príslušných konštánt. Dosaďte ich do nelineárneho modelu a porovnajte s reálnym systémom.
8. Dosaďte vypočítané konštanty do lineárneho modelu a vyjadrite číselne matice $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{D}$. Z matíc vypočítajte prenos systému. Porovnajte reálny systém s lineárnym a nelineárnym modelom v jednom obrázku.

Zadanie 4.2: Zoznámte sa s modelom popísaným podrobnejšie v zadaní 4.1. Úlohou je riadiť výšku hladiny v druhom valci zmenou čerpania vody do prvého valca. Vypúšťací ventil z ľavej nádrže je uzatvorený, prepúšťací a odtokový ventil z druhej nádrže sú naplno otvorené. Ovládací simulinkový model obsahuje filtráciu výstupného signálu reprezentovanú Butterworthovým filtrom 2. rádu so zlomovou frekvenciou 0,2 rad/s. Zahrňte tento člen do prenosu systému pri výpočte regulátoru. Všetky regulátory navrhnite najprv ako ideálne a až potom pridajte filtráciu v prípade, kde je nutná.

Požiadavky na riadenie: je požadovaná max. 5 % odchýlka v ustálenom stave na skok riadiacej veličiny. Regulátor má byť čo najrýchlejší pri max. prekmite 30 %.

Doporučený postup:

1. Overte experimentom prenos systému v pracovnom bode.
2. Navrhnite vhodné regulátory pomocou rôznych metód (frekvenčné metódy, podľa Zieglera-Nicholsa, ručná optimalizácia konštánt, pomocou geometrického miesta koreňov,...). Regulátory odskúšajte na nelineárnom simulinkovom modeli.
3. Vyberte dva regulátory, ktoré sa najlepšie chovali na fyzikálnom modeli a odskúšajte ich na reálnom systéme. Namerané priebehy porovnajte s nelineárnym a lineárnym modelom.

Zadanie 4.3: Zoznámte sa s modelom popísaným podrobnejšie v zadaní 4.1. Naprogramujte programovateľný automat tak, aby bolo možné riadiť výšku hladiny v druhom valci zmenou čerpania vody do prvého valca. Využite na to PID inštrukciu, ktorá je súčasťou inštrukčnej sady procesoru.

Vstupné aj výstupné napätia na čerpadlách a zo sond výšky hladiny (v skut. 0 – 10 V) majú v programe rozsah 0 – 32 768. Vypočítaná akčná veličina PID inštrukciou je však v rozsahu 0 – 16 384. Prepočítajte preto všetky napätia pomocou inštrukcie SCL (Scale) tak, aby najväčší zásah PID inštrukcie zodpovedal v skutočnosti aj maximálnemu napätiu. Zároveň z prepočítaných hodnôt napätí majú byť jasné aj výšky hladín v jednotlivých nádržiach (zvoľte napr. rozsah 0 – 10000, kde 10000 zodpovedá výstupu 10 V na ovládanie čerpadla, zároveň hodnoty 0 – 4000 udávajú výšku hladiny 0 – 40 cm). Regulátor navrhnite a odsimulujte najprv v Simulinku, potom nastavte príslušné konštanty v PID inštrukcii (pozor, sú v minútach). Regulátor odskúšajte na reálnom systéme. Na zobrazenie veličín vytvorte trend, zobrazte v ňom už prepočítané hodnoty jednotlivých napätí. Jednotlivé vstupy a výstupy sú zapojené na adresy podľa tabuľky C.2.

Kapitola 5

Záver

V tejto bakalárskej práci sa podarilo zrekonštruovať starší model vodárne, ktorý sa v hojnej miere využíval pri výučbe na Katedre riadiacej techniky v rokoch 1995 – 2007. Vlastnosti systému sa však vo veľkej miere podarilo zachovať. Zrekonštruovaný model preto môže slúžiť na porovnanie vlastností systému s novými modelmi vodární s lepšími vlastnosťami (tichší chod, asi 8-krát rýchlejšia dynamika, priemyslové snímače...), ktoré boli zavedené do výuky v roku 2007.

Rekonštrukcia modelu si vyžiadala niekoľko úprav. Bola navrhnutá silnejšia nosná doska z plexiskla a tiež upravené odtokové ventily. Koleno, do ktorého bola ohnutá sklenená odtoková rúrka a spôsobovalo zahlcovanie kvapaliny, bolo odstránené a nahradené širokou trubkou z plexiskla. Vylepšenie modelu predstavujú jazýčkové kontakty na každom ventile, ktoré umožňujú elektronicky identifikovať jeho stav.

Podstatnou zmenou prešla riadiaca elektronika modelu, ktorá bola kompletne nahradená novou a vychádza z elektroniky použitej v nových vodárňach. Model je možné ovládať z počítača prostredníctvom Matlabu, programovateľným automatom, analógovým počítačom Meda a tiež aj manuálne z riadiaceho panelu. Elektronika automaticky prepína medzi jednotlivými systémami na základe nastavenej priority.

Bol vypracovaný kompletný popis systému vrátane identifikácie a návrhu demonštračných regulátorov ako z Matlabu tak aj z PLC. Aj keď sa síce nepredpokladá veľké nasadenie modelu do výuky kvôli existencii modelov s lepšími vlastnosťami, v závere práce sú uvedené zadania pre študentov.

Možným pokračovaním tejto práce by mohlo byť nahradenie hlučných čerpadiel tichšími a spoľahlivejšími s podobnými vlastnosťami. Tiež je možné vyskúšať zapojenie na analógový počítač Meda a model riadiť prostredníctvom neho.

Literatúra

[1] BANÍK, Ivan, CHOVANCOVÁ, Marcela, ZÁMEČNÍK, Jozef. *Fyzika 1: Mechanika a hydromechanika*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2006. 221 s. Dostupný z WWW: <http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_netradicne/skripta/fyzika1/>.

[2] FETTER, František. *Obecná elektrotechnika pro strojní inženýry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967. 476 s.

[3] FRANKLIN, Gene F., POWELL, J. David, EMAMI-NAEINI, Abbas. *Feedback control of dynamic systems*. 5th edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006. xvii, 910 s.

[4] FOIT, Julius, VOBECKÝ, Jan, ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika: laboratorní cvičení*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 95 s.

[5] GM Electronic. S*oučástky pro elektroniku, katalog* [online]. c1990-2008 [cit. 2008-07-01]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz>.

[6] HAJKO, Vladimír, et al. *Fyzika v príkladoch*. 3. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967. 460 s.

[7] HANZLÍK, Jiří. *Distribuovaný řídicí systém s automaty Rockwell Automation*. [s.l.], 2008. xxxiii, 58 s. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky, Praha. Diplomová práce.

[8] JANEČEK, Milan. *Model systému s dopravním zpožděním*. [s.l.], 2007. ix, 27 s. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky, Praha. Bakalářská práce.

[9] JANOUŠEK, Josef, SUCHÁNEK, Vladimír. *Základy silnoproudé elektrotechniky*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999. 154 s.

[10] JOHN, Jan, FUKA, Jindřich, KUTIL, Michal. *Učebnice SARI* [online]. [2005-2008] [cit. 2008-06-05]. Dostupný z WWW: <http://dce.felk.cvut.cz/sari/>.

[11] NOVÁK, Jiří. *Model lineárního servomechanismu a jeho řízení*. [s.l.], 2004. 80 s. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky, Praha. Diplomová práce.

[12] RIPKA, Pavel. *Prezentácie z prednášok z predmetu Senzory a převodníky* [online]. 2005 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/index.html>.

[13] Rockwell Automation. *Literature Library* [online]. c2008 [cit. 2008-06-25]. Dostupný z WWW: <http://literature.rockwellautomation.com/>.

[14] VEDRAL, Josef, FISCHER, Jan. *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 340 s.

Použitý software

Asix UP	Ver. 2.29
AutoCAD 2005	Ver. N.63.0
Eagle	Ver. 4.16r2
Matlab R2006a	Ver. 7.2.0.232
RSLinx	Ver. 2.43.00
RSLogix 500	Ver. 6.30.00

Príloha A

Obsah priloženého CD

Elektronika		
	Eagle	Zdrojové súbory so schémami pre jednotlivé dosky plošných spojov
	Zoznamy súčiastok	Textové súbory so zoznamami súčiastok pre jednotlivé dosky
	Procesor	Zdrojový súbor pre procesor v assembleri
PLC	Zdrojový súbor programu pre programovateľný automat SLC 500	
Matlab	Šablóny na ovládanie modelu z Matlabu	
Text	Text tejto práce vrátane použitých obrázkov a zadaní úloh	
Výkresová dokumentácia	Dokumentácia pre výrobu častí modelu z plexiskla	
Čelný panel	Súbor s návrhom rozloženia ovládacieho panelu riadiacej jednotky	

Príloha B

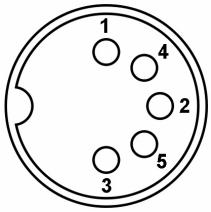
Elektronická časť

Pin	Sonda 1	Sonda 2
1	+ 15 V	+ 15 V
2	GND	GND
3	- 15 V	- 15 V
4	Výška *H1*	Výška *H2*
5	Výška *H1*	Výška *H2*

Tabuľka B.1: Zapojenie DIN konektoru snímačov výšky hladiny

Pin	Ventily
1	+ 24 V
2	V2 (vstup)
3	GND
4	V1 (vstup)
5	V3 (vstup)

Tabuľka B.2: Zapojenie DIN konektoru snímačov stavu ventilov



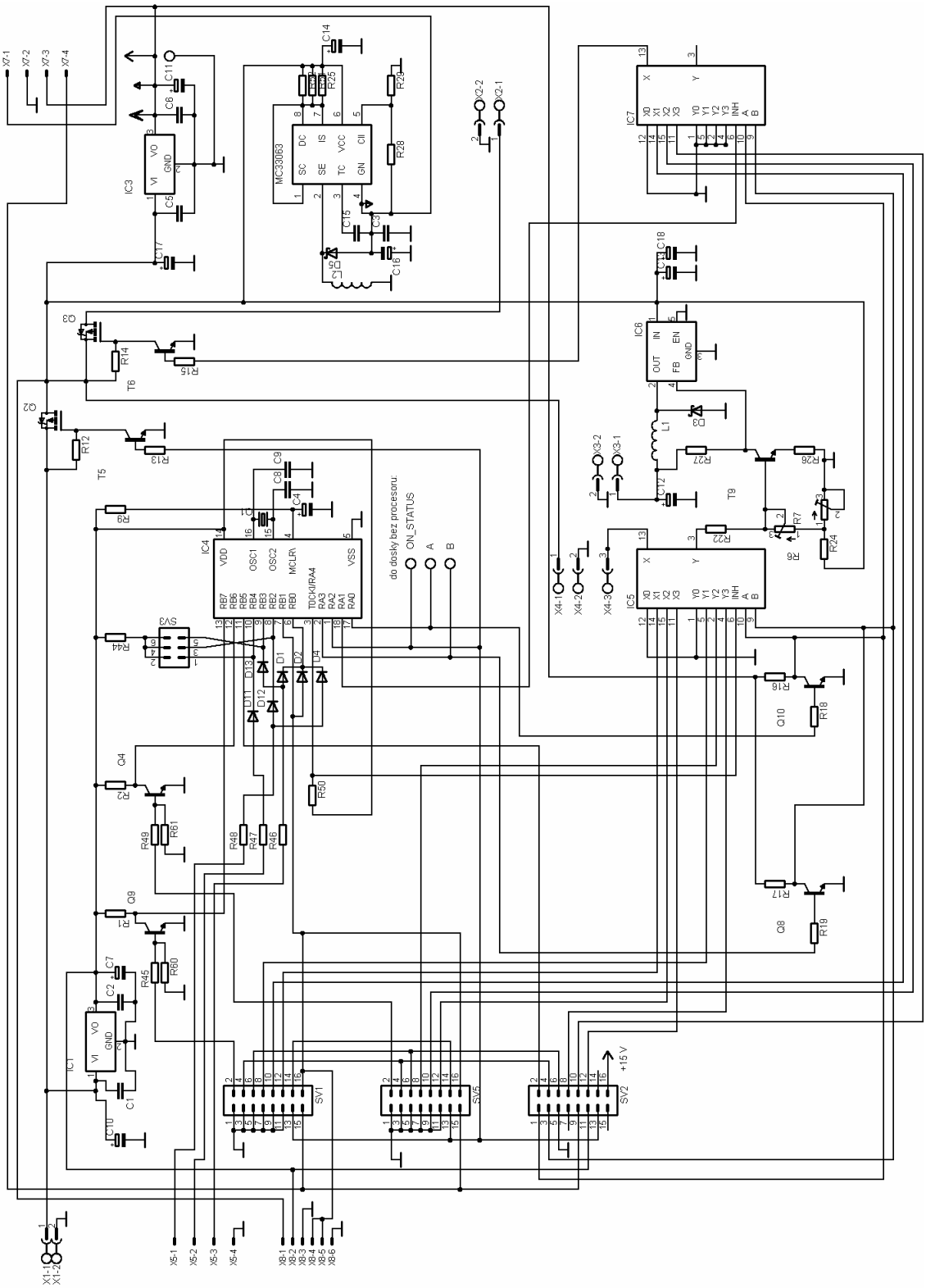
Obr. B.1: Číslovanie pinov DIN konektoru (pohľad spredu na panel)

Pin	PC − Matlab	PLC
1	Stav: ventil V1 (0/5 V)	Stav: ventil V1 (0/24 V)
2	Stav: ventil V2 (0/5 V)	Stav: ventil V2 (0/24 V)
3	Stav: ventil V3 (0/5 V)	Stav: ventil V3 (0/24 V)
4	nepoužitý	nepoužitý
5	nepoužitý	nepoužitý
6	nepoužitý	nepoužitý
7	nepoužitý	nepoužitý
8	nepoužitý	nepoužitý
9	Stav: ON/OFF (0/5 V)	Stav: ON/OFF (0/5 V)
10	Výška *H1* (0-10 V)	Výška *H1* (0-10 V)
11	Výška *H2* (0-10 V)	Výška *H2* (0-10 V)
12	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)
13	Riadenie čerpadla P2 (0-10 V)	Riadenie čerpadla P2 (0-10 V)
14	ON/OFF (5/0 V)	ON/OFF (24/0 V)
15	GND	GND

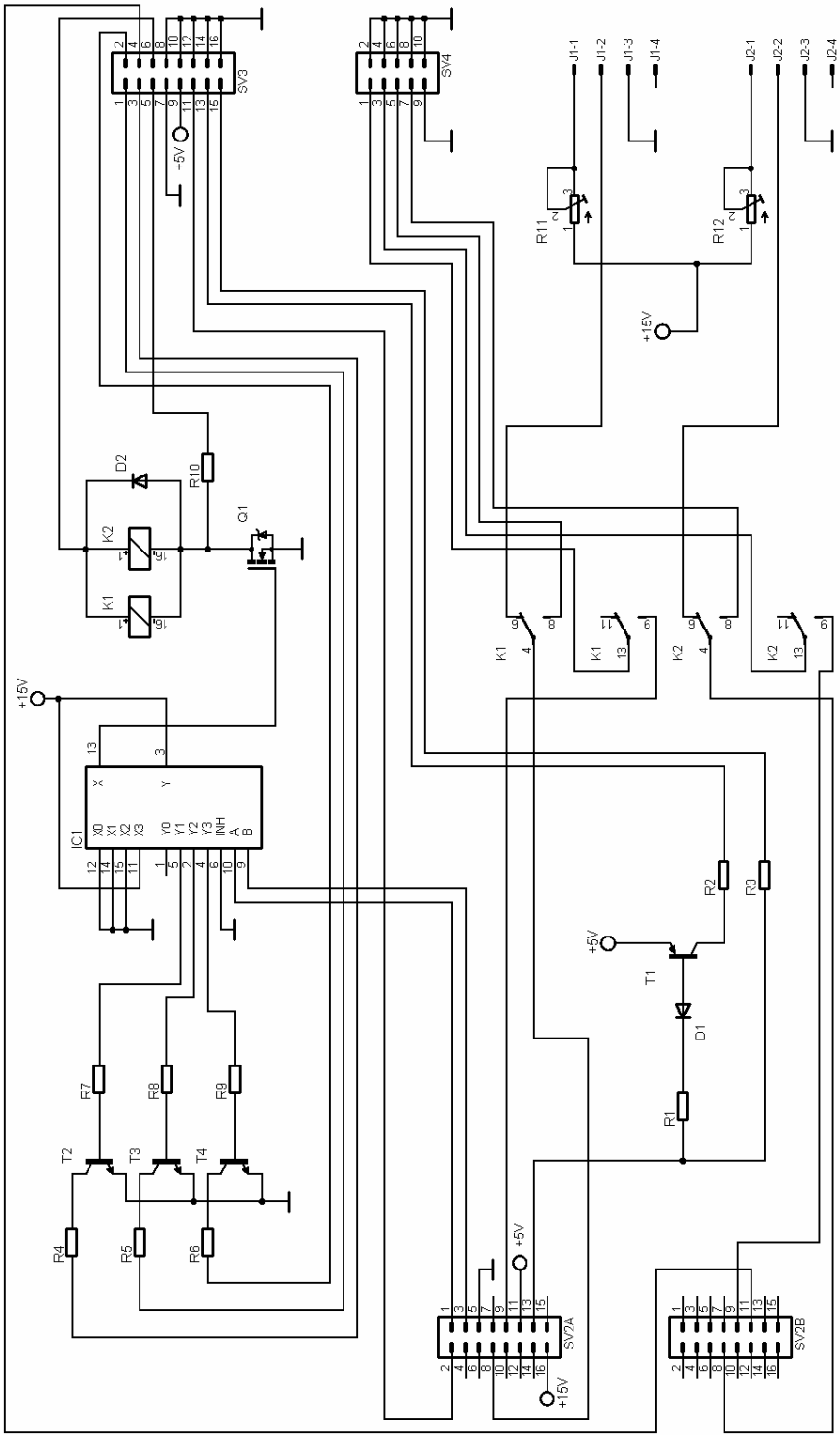
Tabuľka B.3: Zapojenie konektorov Cannon na pripojenie PC a PLC

Pin	Meda
1	Výška *H1*
2	Výška *H2*
3	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)
4	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)
5	GND
6	Stav: ventil V1 (0/5 V)
7	Stav: ventil V2 (0/5 V)
8	Stav: ventil V3 (0/5 V)
9	nepoužitý

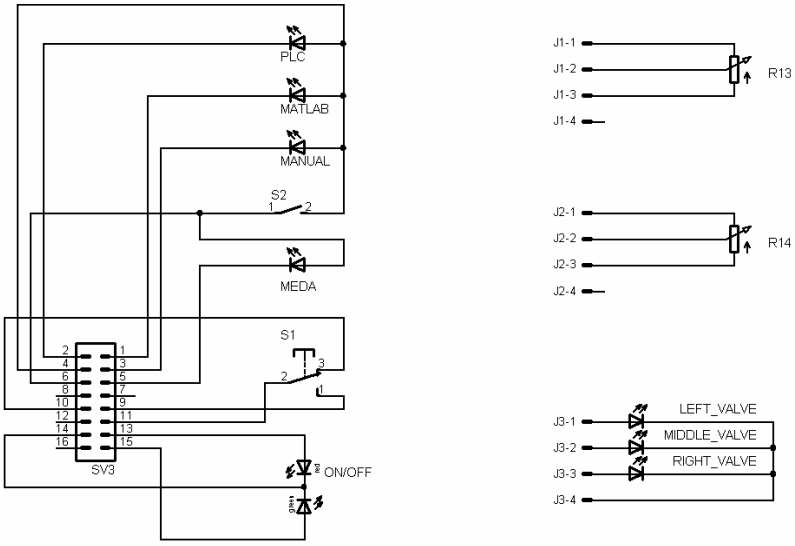
Tabuľka B.4: Zapojenie konektoru Cannon na pripojenie Medy



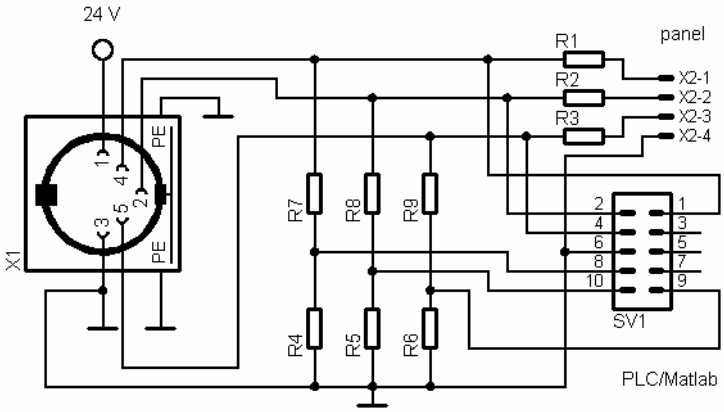
Obr. B.2: Schéma zapojenia riadiacej dosky



Obr. B.3: Schéma dosky s prídavnou elektronikou



Obr. B.4: Schéma zapojenia ovládacieho panelu



Obr. B.5: Schéma zapojenia deliča napätia pre indikáciu stavu ventilov

Počet	Referencia	Hodnota/Typ
6	C1, C2, C3, C5, C6, C15	100 nF
4	C4, C11, C14, C17	10 µF/ 15V
2	C7, C10	50 µF/ 6.3V
2	C8, C9	33 nF
2	C12, C16	220 µF/ 25V
2	C13, C18	2,2 mF/ 25V
7	D1, D2, D3, D4, D11, D12, D13	1N4148
1	D5	1N5819
1	IC1	7805
1	IC3	7815
1	IC4	PIC16F84AP
1	IC5	4052N
1	IC6	LM2596TV
1	IC7	4052N
1	L1	100 µH
1	L2	88 µH
1	Q1	kryštál 4 MHz
2	Q2, Q3	IRF9530
4	Q4, Q8, Q9, Q10	BC338
12	R1, R2, R22, R24, R27, R29, R44, R45, R46, R47, R48, R49	10 kΩ
13	R6, R9, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R26, R28, R50	1 kΩ
1	R7	trimer 100 kΩ
3	R25, R51, R52	0,3 Ω
2	R60, R61	100 kΩ
3	SV1, SV2, SV5	konektor na plochý kábel do DPS 16 pin. – zástrčka
1	SV3	konektor na plochý kábel do DPS 6 pin. – zástrčka
3	T5, T6, T9	BC337
4	X1, X2, X3, X4	konektor Phoenix-508
3	X5, X7, X8	konektor Molex (4 pin.)

Tabuľka B.5: Zoznam súčiastok pre riadiacu dosku

Počet	Referencia	Hodnota/Typ
1	D1	1N4148
1	D2	1N4002
1	IC1	HEF4052BP
2	J1, J2	konektor Molex (4 pin.)
2	K1, K2	relé, 2x prepínací kontakt, 5 V
1	Q1	IRF540
1	R1	390 Ω
2	R11, R12	5 k Ω
6	R2, R3, R4, R5, R6, R10	150 Ω
3	R7, R8, R9	5,6 k Ω
3	SV2A, SV2B, SV3	konektor na plochý kábel do DPS 16 pin. – zástrčka
1	SV4	konektor na plochý kábel do DPS 10 pin. – zástrčka
1	T1	BC327
3	T2, T3, T4	BC338

Tabuľka B.6: Zoznam súčiastok pre dosku s prídavnou elektronikou

Počet	Referencia	Hodnota/Typ
3	J1, J2, J3	konektor Molex (4 pin.)
1	MEDA	LED 5x2 mm, zelená
1	ON/OFF	LED 5x2 mm, zelená/červená spoločná katóda
3	PLC, MATLAB, MANUAL	LED 5 mm, zelená
2	R13, R14	potenciometer 4,7 k Ω
1	S1	vypínač
1	S2	tlačidlo
1	SV3	konektor na plochý kábel do DPS 16 pin. – zásuvka
3	V1, V2, V3	LED 5 mm, žltá

Tabuľka B.7: Zoznam súčiastok pre ovládací panel

Počet	Referencia	Hodnota/Typ
3	R1, R2, R3	1,5 k Ω/ 0,6 W
3	R4, R5, R6	1,5 k Ω
3	R7, R8, R9	5,6 k Ω
1	SV1	konektor na plochý kábel do DPS 10 pin. – zástrčka
1	X2	konektor Molex (4 pin.)

Tabuľka B.8: Zoznam súčiastok pre delič

Príloha C

Pripojenie modelu k PC a PLC

Cannon (číslo pinu)	PCI-1711	Farba vodiča	Popis
12	DA0	zelený	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)
13	DA1	ružový	Riadenie čerpadla P2 (0-10 V)
10	AI0	červený	Výška *H1* (0-10 V)
11	AI1	sivý	Výška *H2* (0-10 V)
14	DO0	žltý	ON/OFF (5/0 V)
1	DI0	biely	Stav: ventil V1 (0/5 V)
2	DI1	hnedý	Stav: ventil V2 (0/5 V)
3	DI2	fialový	Stav: ventil V3 (0/5 V)
9	DI3	čierny	Stav: ON/OFF (0/5 V)
15	AGND, DGND, A1GND	modrý	GND

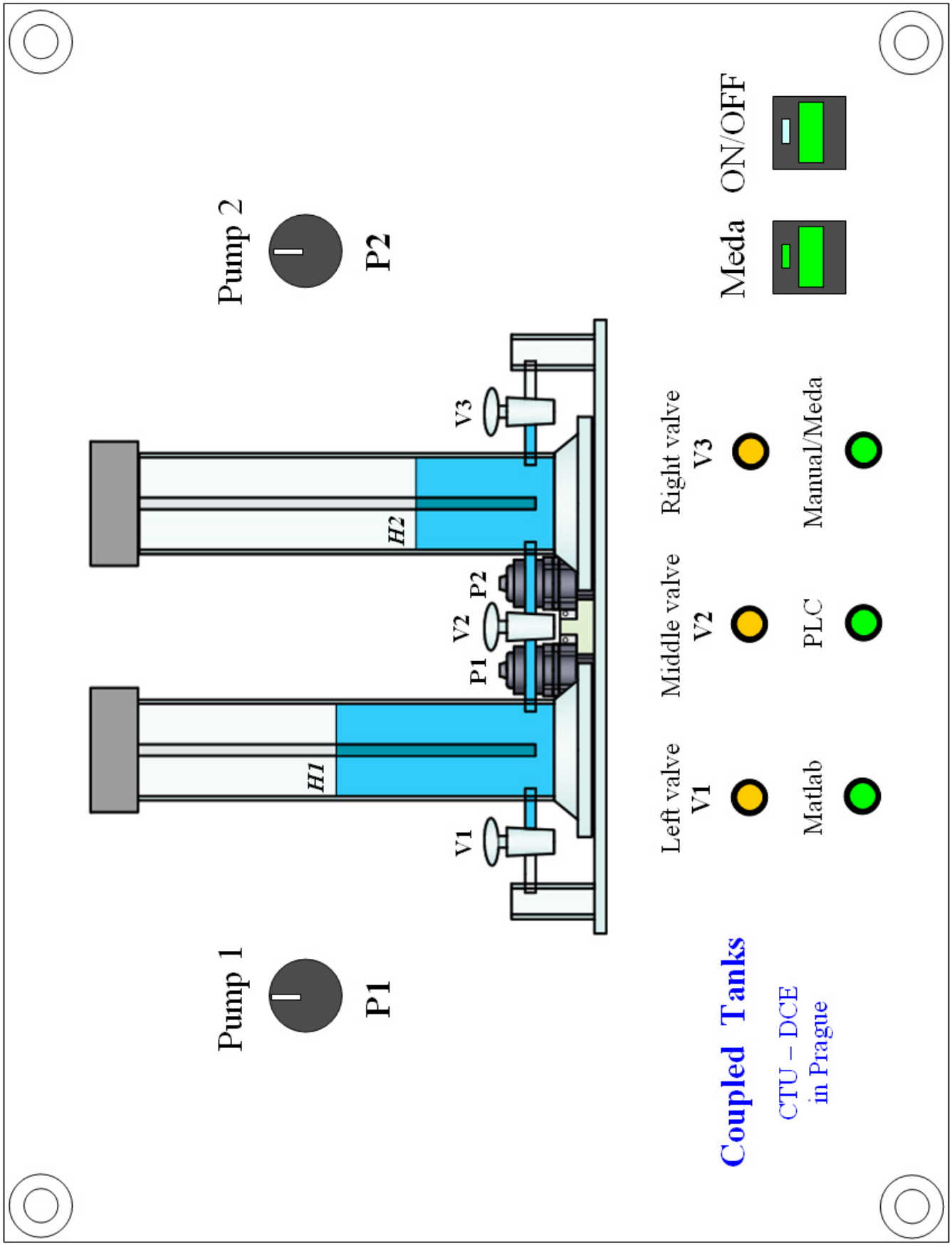
Tabuľka C.1: Zapojenie karty PCI–1711

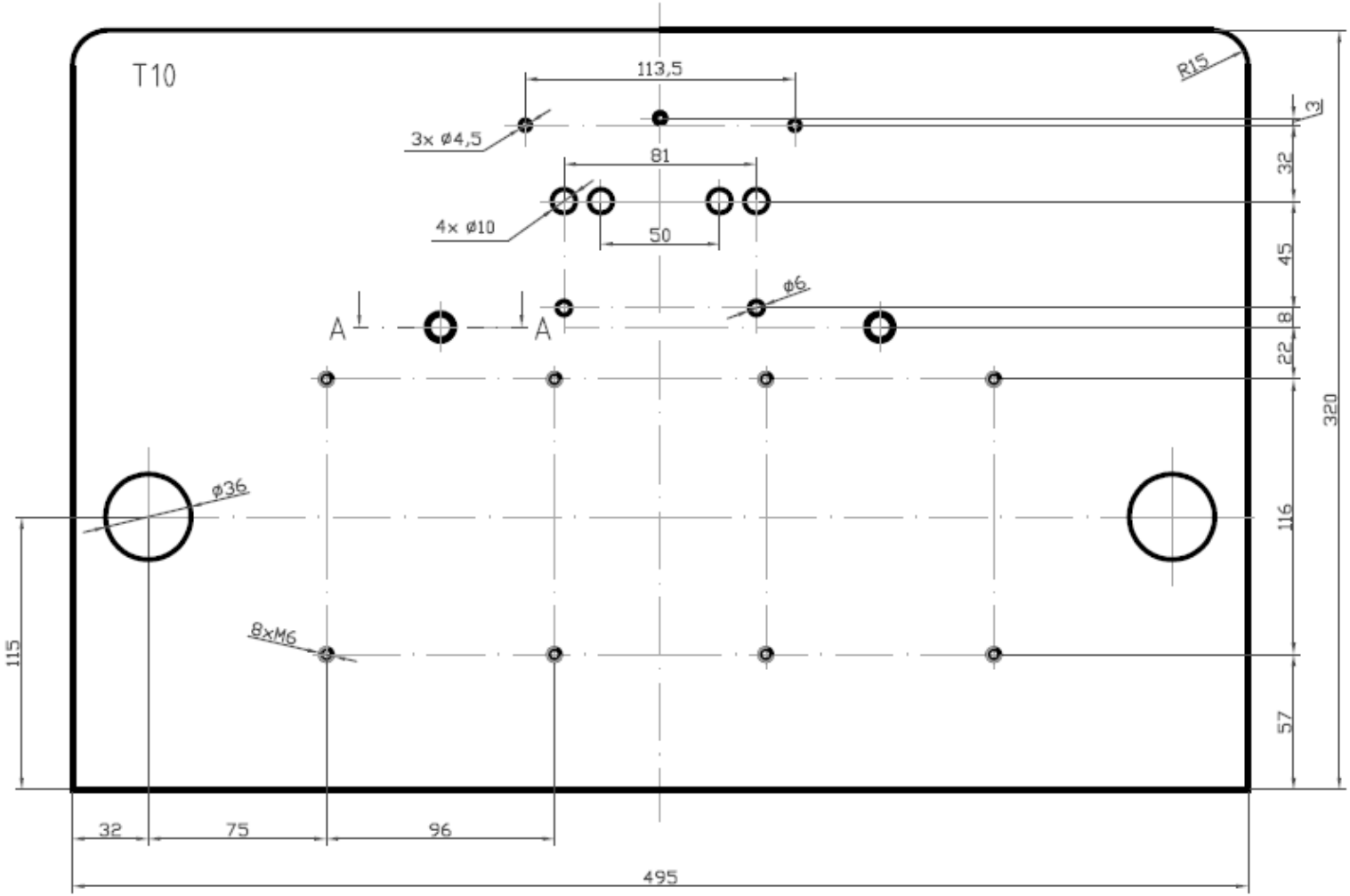
Adresa v PLC	Popis
I:5.0	Výška *H1* (0-10 V)
I:5.1	Výška *H2* (0-10 V)
I:3.0/13	Stav: ventil V1 (0/24 V)
I:3.0/14	Stav: ventil V2 (0/24 V)
I:3.0/15	Stav: ventil V3 (0/24 V)
O:5.0	Riadenie čerpadla P1 (0-10 V)
O:5.1	Riadenie čerpadla P2 (0-10 V)
O:4.0/8	ON/OFF (24/0 V)

Tabuľka C.2: Zapojenie modelu na jednotlivé adresy PLC

Príloha D

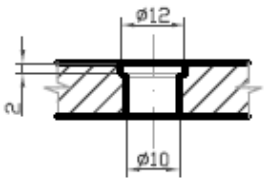
Návrh čelného panelu a výkresová dokumentácia


Pump 1
P1
Pump 2
P2
V1
V2
V3
P1
P2
H1
H2
Left valve
V1
Middle valve
V2
Right valve
V3
Matlab
PLC
Manual/Meda
Meda
ON/OFF
Coupled Tanks
CTU – DCE
in Prague

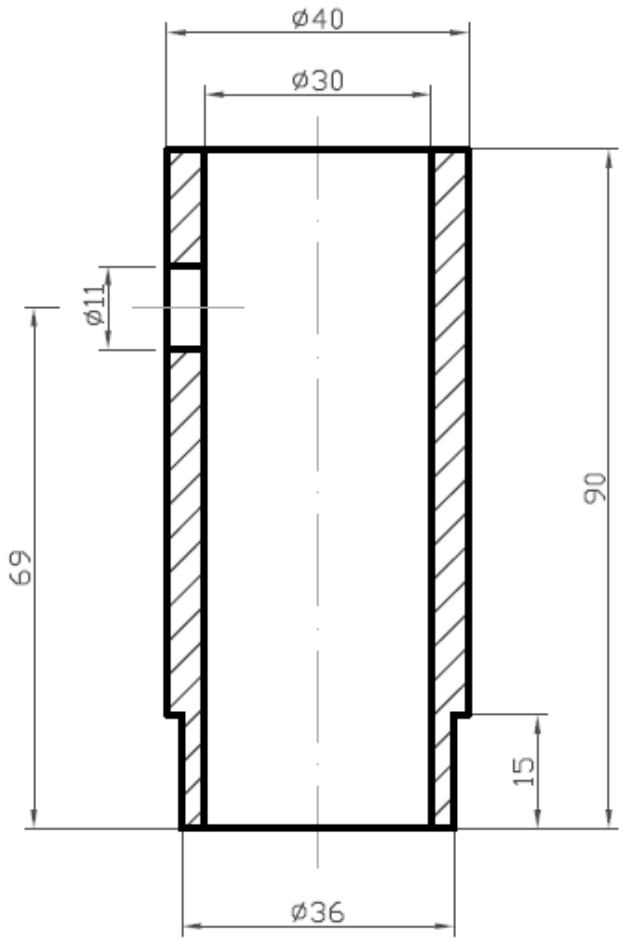


M 1:1

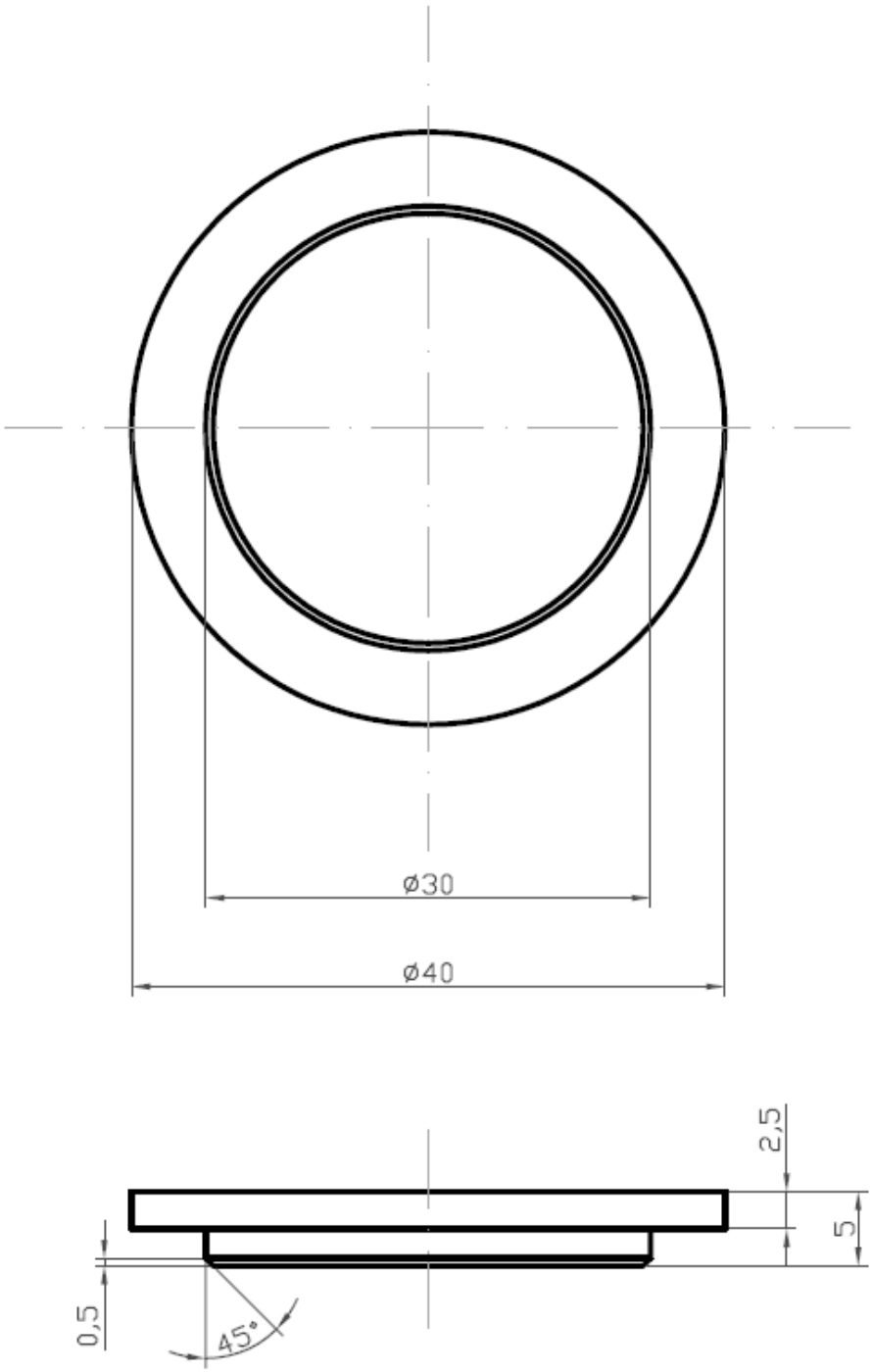
A-A



				Presnosť	Materiál Matné plexisklo (Frost)
				Tolerancia	Polotovar
				Prepletanie	Hrubá hmotnosť
Zmena	Dátum	Index	Podpis	ČVUT v PRAZE, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY	
Navrhol Fatterik	Poznámka	Mierka		Názov	
Preskúmal	1 ks	1:2		NOSNÁ DOSKA	
Technológ					
Normalizácia	Starý výkres			Číslo výkresu	
Schválil	Číslo zoznamu				
Dátum 31. 3. 2008	Číslo zostavy				



				Presnosť	Materiál	Číre plexisklo
				Tolerancia	Polotovar	Trubka z plexiskla
				Premietanie	Hrubá hmotnosť	
				ČVUT v PRAZE, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY		
Zmena	Dátum	Index	Podpis			
Navrhol Fetterik	Poznámka		Mierka	Názov		
Preskúmal	2 ks		1:1	ODTOKOVÁ RÚRKA		
Technológ						
Normalizácia	Starý výkres			Číslo výkresu		
Schválil	Číslo zoznamu					
Dátum 31. 3. 2008	Číslo zostavy					



				Presnosť	Materiál Číre plexisklo
				Tolerancia	Polotovar
				Premietanie	Hrubá hmotnosť
				ČVUT v PRAZE, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY	
Zmena	Dátum	Index	Podpis		
Navrhol Fetterik	Poznámka	Mierka		Názov	
Preskúmal	2 ks	2:1		KRYT ODTOKOVEJ RÚRKY	
Technológ					
Normalizácia	Starý výkres			Číslo výkresu	
Schválil	Číslo zoznamu				
Dátum 25. 3. 2008	Číslo zostavy				