

VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY



ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

System vodního hospodářství
– laboratorní model

Sezimovo Ústí, 2011

Autor: Tomáš Šikýř



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Šikýř**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Systém vodního hospodářství – laboratorní model**

Zásady pro vypracování:

1. Nasimulujte v prostředí Matlab/Simulink systém vodního hospodářství (tři nádrže, tři ventily (dva proporcionální, jeden otevřeno/zavřeno), dvě čerpadla (odstředivé a zubové)) a proveďte jeho teoretickou analýzu.
2. Navrhněte uspořádání laboratorního modelu a vytvořte technickou dokumentaci k jeho výrobě.
3. Navrhněte elektroniku laboratorního modelu umožňující ruční ovládání a komunikaci s počítačem pomocí karty MF624 od firmy Humusoft a prostředím Matlab/Simulink.
4. Vytvořte popis laboratorního modelu, který bude sloužit studentům při výuce.
5. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.


Doporučená literatura:

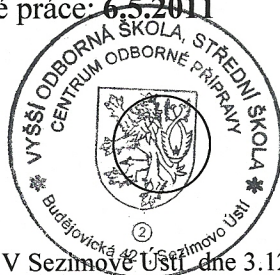
- [1] HANZLÍK, J. Distribuovaný řídicí systém s automaty Rockwell Automation, (Diplomová práce), ČVUT v Praze, FEL, Praha, 2008.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. (2010) *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-260-2.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Odborný konzultant práce: Ing. Jaroslav Svoboda, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Oponent práce: Ing. Jan Fuka, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí


Datum zadání absolventské práce: **1.9.2010**

Datum odevzdání absolventské práce: **6.5.2011**


.....
Ing. Jiří Roubal, Ph.D.
(vedoucí práce)



V Sezimově Ústí dne 3.12.2010


.....
Ing. František Kamlach
(ředitel školy)

Prohlášení

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

V Sezimově Ústí dne 6.5 2011



podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu absolventské práce Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za jeho důsledné vedení, podnětné rady a čas, který věnoval mé práci. Poděkování patří též Ing. Jaroslavu Svobodovi za jeho čas a rady při zpracování technické dokumentace pro výrobu modelu vodního hospodářství. Dále bych rád vyjádřil velký dík učitelům odborného výcviku za pomoc při realizaci laboratorního modelu, konkrétně Danielu Kržovi a Jiřímu Vrkočovi za frézování jednotlivých částí plexi, Miroslavu Vrzalovi za soustružení přírub ventilů a příruby pro připojení zubového čerpadla, Jaroslavu Dvořákovi, Vladimíru Hložkovi, Mikuláši Szolgayovi, Janu Pumprovi a Josefu Hrstkovi za jejich rady a pomoc při lepení modelu. Dík patří také Bc. Miroslavu Hospodářskému za jeho čas a významnou pomoc s návrhem a realizací elektroniky pro řízení modelu.

Děkuji mým blízkým za podporu během studia a také vedení školy za poskytnuté finanční prostředky na stavbu modelu pro novou laboratoř aplikované informatiky a fyziky.

Anotace

Tato absolventská práce se zabývá návrhem modelu systému vodního hospodářství pro výuku v podmínkách školní laboratoře. Model je nejprve matematicky popsán v programovém prostředí MATLAB/Simulink. Součástí práce je popis tvorby simulinkového modelu pro využití při praktické i teoretické výuce moderní teorie řízení. Je vytvořena jeho virtuální realita pro simulaci a ověření správné funkce modelu. Dále práce obsahuje podklady ve formě technických výkresů pro výrobu modelu. Též je navržena elektronika pro řízení a ovládání modelu. Elektronika umožňuje ovládat model ručně nebo pomocí počítače v prostředí MATLAB/Simulink a karty MF624.

Klíčová slova: Laboratorní model, vodní hospodářství, MATLAB/Simulink, matematicko-fyzikální model, diferenciální rovnice, virtuální model, výkresová dokumentace, elektronika, plexisklo.

Annotation

Diese Diplomarbeit befasst sich mit dem Modellsystem der Wasserwirtschaft für den Unterricht im Labor. Das Modell wird zunächst mathematisch im Programm MATLAB/Simulink beschrieben. Die Arbeit beschreibt die Konstruktion eines Simulink Modells für die Benutzung im praktischen und theoretischen Unterricht der modernen Theorie der Steuerung. Es wurde eine Virtual-Reality-Simulation für Überprüfung der korrekten Funktion des Modells erstellt. Dann werden die Dokumente in Form von technischen Zeichnungen für die Produktion der Modelle erstellt. Es ist die Elektronik für Steuerung und Regelung des Modells entworfen. Elektronische Steuerung erlaubt, das Modell manuell oder mit Hilfe des Computerprogramms MATLAB/Simulink und der Karte MF624 zu steuern.

Termine: Labormodell, Wasserwirtschaft, MATLAB/Simulink, Mathematisch-physikalmodell, Differentialgleichung, Virtualmodell, Zeichnungsdokumentation, Elektronik, Plexiglas.

Obsah

Seznam použitých symbolů	ix
Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
1 Úvod	1
2 Model vodního hospodářství	3
2.1 Matematický model vodního hospodářství	4
2.2 Simulinkový model vodního hospodářství	5
2.2.1 Virtuální model vodního hospodářství	8
2.3 Analýza simulinkového modelu vodního hospodářství	13
3 Návrh konstrukce reálného modelu	17
3.1 Senzory	18
3.2 Akční členy	19
3.2.1 Ventily	19
3.2.2 Čerpadla	20
3.3 Mechanická konstrukce modelu	21
3.3.1 Úprava původního modelu	22
3.3.2 Výrobní výkresy	23
3.3.3 Výroba dílů	25
3.3.4 Lepení modelu	25
3.3.5 Provozní kapalina	26
4 Elektronika pro řízení a ovládání modelu	27
4.1 Požadavky na řízení	28

4.1.1	Změřené parametry akčních členů a senzorů	28
4.2	Návrh vzhledu předního ovládacího panelu	29
4.3	Potřebná napájecí napětí	30
4.4	Blokové schéma elektroniky	31
4.4.1	Požadavky na jednotlivé funkční bloky	33
4.5	Elektrické zapojení jednotlivých funkčních bloků	34
4.5.1	Optoelektronický oddělovač s kompenzací nuly a linearity převodu	35
4.5.2	A/D převodník pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů	36
4.5.3	Logika řízení local/remote	37
4.5.4	A/D převodník pro sloupcové zobrazovače	37
4.5.5	Převodník U/I pro řízení proporcionálního ventilu	39
4.5.6	Elektronický spínač pro řízení diskrétního ventilu	40
4.5.7	Převodník U/U pro řízení zubového čerpadla	40
4.5.8	Převodník U/U pro řízení odstředivého čerpadla	42
4.5.9	Obvody indikace napájení a typu řízení	43
4.5.10	Obvody ručního ovládní	44
4.5.11	Napájecí zdroj	44
5	Závěr	47
	Literatura	49
A	Použitý software	I
B	Tvorba modelu v čase	III
C	Obsah příloženého DVD	V
D	Rozpočet projektu	VII
E	Výkresová dokumentace	IX

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
g	gravitační konstanta	m s^{-2}
h_C	výška hladiny ve střední nádrži	m
h_L	výška hladiny v levé nádrži	m
h_R	výška hladiny v pravé nádrži	m
I	elektrický proud	A
S	průřez podstav nádrží	m^2
S_C	průřez výtokového ventilu	m^2
S_L	průřez vstupního potrubí z odstředivého čerpadla	m^2
S_{LC}	průřez ventilu levá-střední nádrž	m^2
S_{RC}	průřez ventilu pravá-střední nádrž	m^2
t	čas	s
U	elektrické napětí	V
u_L	napětí na odstředivém čerpadle	V
u_R	napětí na zubovém čerpadle	V
v_C	míra otevření výtokového ventilu	-
v_{LC}	míra otevření ventilu levá-střední nádrž	-
v_{RC}	míra otevření ventilu pravá-střední nádrž	-
ρ	hustota provozní kapaliny	kg m^{-3}

Seznam obrázků

2.1	Principiální schéma systému vodního hospodářství	4
2.2	Simulinkové schéma pravé nádrže (rovnice (2.3))	5
2.3	Zapojení bločků zubového čerpadla a odmocniny ze schématu na obr. 2.2	6
2.4	Simulinkový model systému vodního hospodářství	7
2.5	Simulinkové schéma modelu vodního hospodářství (rovnice (2.1) až (2.3))	7
2.6	Vnitřní zapojení bločku PUMP L (odstředivé čerpadlo) z obr. 2.5	8
2.7	Virtuální model systému vodního hospodářství	9
2.8	Ikona Insert Box v programu V-Realm Builder	9
2.9	Vlastnosti objektu – nastavení vlastnosti Transparency	9
2.10	Okno programu V-Realm Builder s 3D scénou	10
2.11	Bločky To VR World a VR Sink v programu Simulink	11
2.12	Vnitřní zapojení bločku To VR World z obr. 2.11	11
2.13	Virtuální model z programu Solid Edge	12
2.14	Napouštění levé nádrže odstředivým čerpadlem	13
2.15	Napouštění pravé nádrže zubovým čerpadlem	14
2.16	Vyrovnání hladin v pravé a střední nádrži	14
3.1	Hydrostatické čidlo LMP 331	18
3.2	Ventily použité v modelu vodního hospodářství	19
3.3	Odstředivé čerpadlo	20
3.4	Porovnání původního a nového modelu vodního hospodářství	21
3.5	Popisové pole sestavy věže 1	24
3.6	Kusovník sestavy věže 1	24
3.7	Detail připojení ventilů – střední věž	26
4.1	Schéma rozvržení předního panelu	30
4.2	Blokové schéma elektroniky laboratorního modelu	32
4.3	Schéma optoelektronického oddělovače	35

4.4	Schéma převodníku pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů	36
4.5	Schéma přepínacího obvodu local/remote	37
4.6	Schéma převodníku pro sloupcové zobrazovače	38
4.7	Schéma převodníku U/I pro řízení proporčního ventilu	39
4.8	Schéma elektronického spínače pro řízení diskrétního ventilu	40
4.9	Schéma převodníku pro řízení zubového čerpadla	41
4.10	Statická charakteristika převodníku pro řízení zubového čerpadla	41
4.11	Schéma převodníku pro řízení odstředivého čerpadla	42
4.12	Statická charakteristika převodníku pro řízení odstředivého čerpadla	43
4.13	Schéma indikace napájení a typu řízení	43
4.14	Schéma obvodů ručního ovládání	44
4.15	Schéma napájecího zdroje	45

Seznam tabulek

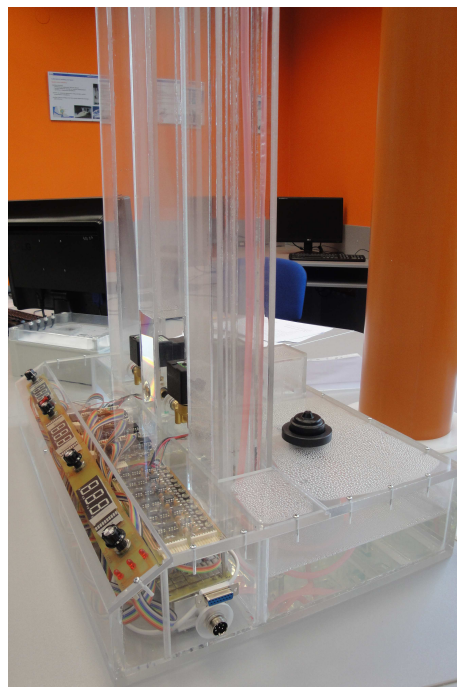
D.1 Finanční rozpočet projektu	VII
D.2 Hodinový rozpočet projektu	VIII

Kapitola 1

Úvod

Výuku ve školních laboratořích bez ověření teoretických poznatků při praktických pokusech si dnes již asi nikdo nedovede ani představit. Kvalitní modely pro výuku moderní teorie řízení jsou stále, vzhledem ke své vysoké pořizovací ceně, pro většinu škol nedostupné. Na Vyšší odborné škole, Střední škole, Centru odborné přípravy Sezimovo Ústí právě jedna taková laboratoř vzniká. Tato laboratoř s názvem „Laboratoř aplikované informatiky a fyziky“ by v budoucnu měla být vybavena několika modely pokrývající základní fyzikální oblasti (elektřina, magnetismus, přímočarý pohyb, rotační pohyb, proudění kapaliny, proudění plynu, přenos tepla atd.) právě pro ověření teoretických poznatků při praktických pokusech. Laboratoř by měla sloužit pro výuku nejen fyziky na střední škole (pozorování fyzikálních dějů, konfrontace pozorování s jednoduchými fyzikálními zákony), ale i pro výuku modelování a řízení reálných modelů na vyšší odborné škole. Tato koncepce vychází ze zkušeností vedoucího této práce získaných mimo jiné v Laboratoři teorie automatického řízení (ROUBAL, J. et al., 2009).

Cílem této práce je navrhnout model systému vodního hospodářství pro novou školní Laboratoř aplikované informatiky a fyziky. Tento model sice přímo v praxi využití nenajde, dokáže ale velice dobře simulovat řadu reálných dynamických systémů založených na práci s kapalinou. Mezi tyto systémy patří například vodní elektrárny, přečerpávací



elektrárna Dlouhé Stráně nebo i tradiční vodojemy u většiny obcí a měst.

Podle doporučení vedoucího absolventské práce se jako základ modelu vzal již fungující model na ČVUT v Praze, Fakultě elektrotechnické, katedře řídicí techniky. Jeho autorem je Jiří Hanzlík, který tento model navrhl ve své diplomové práci (HANZLÍK, J., 2008). Stejně jako v jeho případě i u nového modelu je jedním z hlavních požadavků jeho doba ustálení v řádu minut tak, aby mohl model sloužit při výuce a práce s ním nebyla příliš zdoluhavá, a tudíž výukově neproduktivní. Dalším z požadavků bylo zvýšení variability systému pro budoucí využití při výuce. Původní model (HANZLÍK, J., 2008) je složen z jednoho čerpadla, dvou ventilů a dvou nádrží. Tato konfigurace přílišnou variabilitu výukových úloh nenabízí, proto se tento model kompletně přepracoval za využití moderních výpočetních a simulačních programů a ve finále se rozhodlo model rozšířit o další čerpadlo, ventil i nádrž. Vznikl tak model vodního hospodářství, který v sobě kombinuje jak rychlý, tak i pomalý dynamický systém.

Návrh modelu začíná jeho matematickým popisem, tvorbou simulinkového modelu a následně i 3D virtuální reality pro ověření správné funkce simulinkového systému. Výpočty a simulace jsou provedeny v prostředí Matlab/Simulink a 3D virtuální model je navržen v prostředí Virtual Reality Toolbox. Následně je navržena výkresová dokumentace pro výrobu modelu z plexiskla. Jsou také vybrány senzory a akční členy pro požadovanou funkci modelu. Nakonec je navržena a zrealizována vhodná elektronika pro ruční a počítačové řízení modelu.

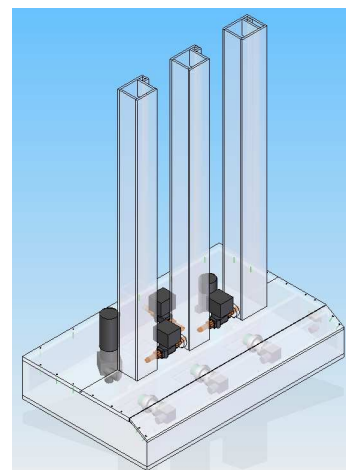
Struktura této práce, která je napsána v $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ ¹, je následující. Kapitola 2 se věnuje teoretickému návrhu modelu systému vodního hospodářství. Kapitola 3 se zabývá návrhem uspořádání laboratorního modelu a tvorbou technické dokumentace potřebné k jeho výrobě. Kapitola 4 popisuje elektroniku pro řízení a ovládání laboratorního modelu. V příloze práce je časový harmonogram výroby tohoto modelu, použitý software, rozpočet projektu a výkresová dokumentace. Další materiály jsou na přiloženém DVD.

¹ $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ je rozšíření systému \LaTeX , což je kolekce maker pro \TeX . \TeX je ochranná známka American Mathematical Society.

Kapitola 2

Model vodního hospodářství

Než bude přikročeno k vlastní výrobě laboratorního modelu vodního hospodářství, je třeba provést teoretickou analýzu chování tohoto systému, aby se předešlo návržení nepoužitelného nebo nevhodného zařízení pro výuku (například příliš pomalý systém nebo naopak podobné chování zdrojů kapaliny atd.). Proto bude nejprve vytvořen v prostředí MATLAB/Simulink (KUPKA, L., 2007) teoretický počítačový model vycházející z matematicko-fyzikálních rovnic (ROUBAL, J. et al., 2010) a bude provedena jeho analýza (časové odezvy výšek hladin v jednotlivých nádržích pro různé kombinace vstupních veličin), ze které bude vycházeno při návrhu a tvorbě reálného laboratorního modelu (velikost nádrží, jejich rozložení, výběr akčních členů, výběr senzorů a jejich osazení atd.).



Výsledkem této kapitoly vedle nalezených parametrů reálného systému, ze kterých bude vycházet návrh konstrukce laboratorního modelu, je samotný simulinkový model systému vodního hospodářství s virtuální realitou, který bude sloužit studentům a žákům při výuce v laboratoři aplikované informatiky a fyziky. Model bude opatřen maskou, která je uživatelsky příjemná a umožňuje jeho snadné ovládání, což je pro začínající studenty z hlediska motivace důležité.

V této kapitole je nejprve popsán matematicko-fyzikální model systému vodního hospodářství, poté je podrobně vysvětlena tvorba simulinkového modelu (přepsání matematicko-fyzikálních rovnic do simulinkového schématu) a tvorba virtuální reality. V závěru kapitoly je model analyzován pro různé parametry (průřezy nádrží, výkony čerpadel, světlost ventilů a způsob jejich ovládání atd.).

2.1 Matematický model vodního hospodářství

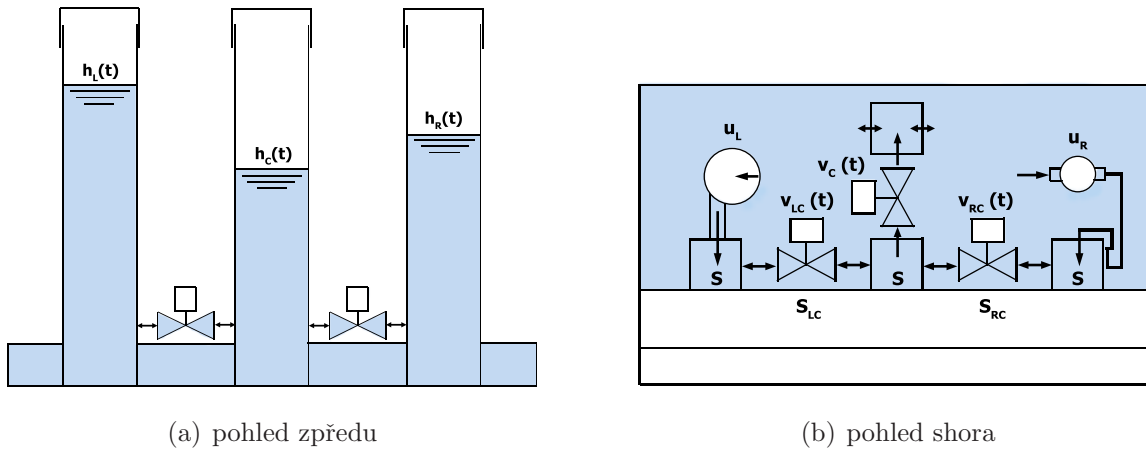
Matematický model systému vodního hospodářství, který je odvozen z diplomové práce (HANZLÍK, J., 2008), lze podle (ROUBAL, J. et al., 2010, kapitola 11 a 12) popsat diferenciálními rovnicemi

$$\frac{dh_L(t)}{dt} = \frac{1}{S} \left[-v_{LC}(t)S_{LC}\sqrt{2g(h_L(t) - h_C(t))} + S_L\sqrt{2\left(\frac{k_L}{\rho}u_L^2(t) - gh_L(t)\right)} \right], \quad (2.1)$$

$$\frac{dh_C(t)}{dt} = \frac{1}{S} \left[+v_{LC}(t)S_{LC}\sqrt{2g(h_L(t) - h_C(t))} + v_{RC}(t)S_{RC}\sqrt{2g(h_R(t) - h_C(t))} - v_C(t)S_C\sqrt{2gh_C(t)} \right], \quad (2.2)$$

$$\frac{dh_R(t)}{dt} = \frac{1}{S} \left[-v_{RC}(t)S_{RC}\sqrt{2g(h_R(t) - h_C(t))} + k_R u_R(t) \right], \quad (2.3)$$

kde h_L , h_C , h_R [m] jsou výšky hladin v jednotlivých nádržích (levá, střední, pravá), v_{LC} , v_C , v_{RC} [-] jsou míry otevření jednotlivých ventilů (mezi levou a střední nádrží, ze střední nádrže, mezi pravou a střední nádrží), u_L , u_R [V] jsou napětí na čerpadlech (levé odstředivé, pravé zubové), S_{LC} , S_C , S_{RC} [m²] jsou průřezy příslušných ventilů, S_L [m²] je průřez vstupního potrubí z odstředivého čerpadla, S [m²] je průřez podstav nádrží, $\rho = 998 \text{ kg m}^{-3}$ je hustota vody a $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ je gravitační konstanta. Následující obrázek znázorňuje principiální schéma systému vodního hospodářství včetně výše uvedeného značení jednotlivých veličin a konstant.

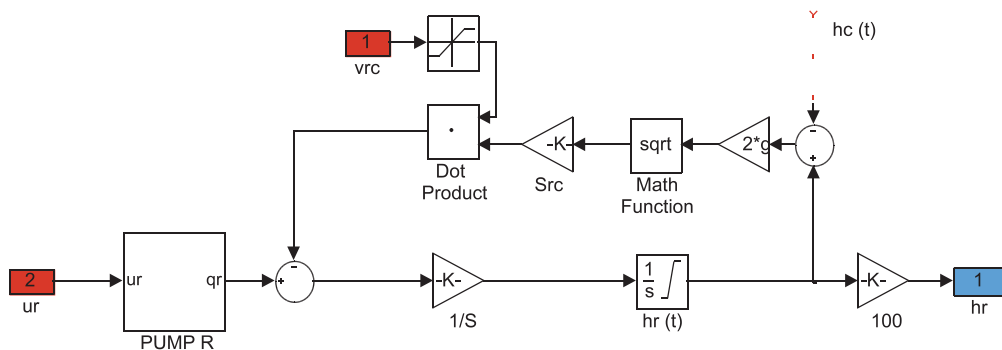


Obrázek 2.1: Principiální schéma systému vodního hospodářství

2.2 Simulinkový model vodního hospodářství

V této části bude vytvořen simulinkový model systému vodního hospodářství reprezentovaný rovnicemi (2.1), (2.2) a (2.3). Simulinkový model je popis systému v prostředí programu MATLAB/Simulink (KUPKA, L., 2007). Ve své podstatě jsou to matematické rovnice, ovšem vyjádřené schématickými bloky. Simulinkový model umožňuje provádět simulace a analýzu chování reálného systému. Výsledky simulací lze znázornit pomocí časových průběhů jednotlivých veličin simulovaného systému nebo pomocí virtuální reality (KUPKA, L., 2007).

Detailně bude nyní vysvětlen přepis rovnice (2.3) do schématu znázorněném na následujícím obrázku. Na rovnice (2.1) a (2.2) se aplikuje analogický postup (KUPKA, L., 2007; ROUBAL, J. et al., 2010).



Obrázek 2.2: Simulinkové schéma pravé nádrže (rovnice (2.3))

Nejprve se do schématu vloží integrátor představující kapacitu pravé nádrže a označí se $h_R(t)$, viz obr. 2.2. Jeho vstupem je změna hladiny pravé nádrže (derivace $\dot{h}_R(t)$) a výstupem je aktuální výška hladiny $h_R(t)$. Uvnitř integrátoru lze nastavit rozsah výšky hladiny v nádrži v intervalu $\langle 0, 0,66 \rangle$ m a také počáteční podmínka pro výšku hladiny v nádrži $h_R(0)$. Dále se realizuje schéma tak, jak je zapsaná rovnice (2.3). Derivace výšky hladiny se rovná $\frac{1}{S}$ krát ..., což ve schématu znázorňuje bloček Gain (trojúhelníček), do kterého se nastaví konstanta $\frac{1}{S}$.

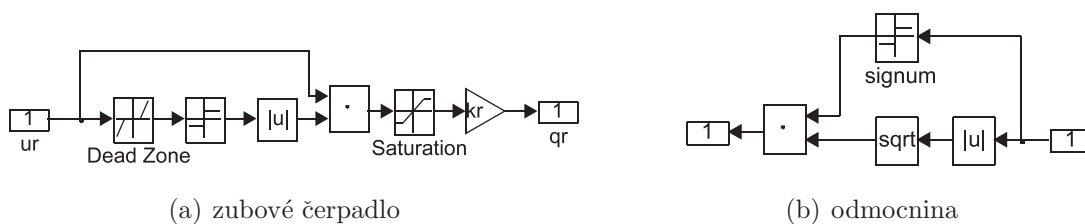
Za konstantou $\frac{1}{S}$ je v rovnici (2.3) závorka, ve které se sčítá respektive odečítá. To je ve schématu realizováno bločkem Sum (kolečko), u kterého lze nastavit, které vstupy jsou s plusem a které s mínusem (bloček Sum umožňuje přidat další vstupy, při větším počtu vstupů je ale vhodnější přepnout kolečko na obdélníček). Na oba tyto vstupy je přiveden signál podle rovnice (2.3). Na záporný vstup se přivede signál z bločku Dot Product,

který realizuje násobení dvou signálů. V tomto případě je vstupem násobícího bločku objemový průtok mezi pravou a střední nádrží $S_{RC}\sqrt{2g(h_R(t) - h_C(t))}$ a míra otevření odpovídajícího ventilu $v_{RC}(t)$. Bloček **Saturation** omezí možnost otevření ventilu na interval $\langle 0, 1 \rangle$.

Objemový průtok mezi pravou a střední nádrží je roven součinu konstanty S_{RC} (ve schématu trojúhelníček) a odmocniny (bloček **Math Function** – čtvereček **sqrt**) z výrazu $2g$ krát (ve schématu trojúhelníček) rozdíl hladin $h_R(t) - h_C(t)$ realizovaný bločkem **Sum**. Vstupem tohoto bločku jsou výšky hladin $h_R(t)$ a $h_C(t)$, které jsou na výstupech příslušných integrátorů. Výška hladiny je v metrech a pro snazší odečtení hodnoty veličiny z grafu je výstup násoben konstantou 100 pro převod na centimetry.

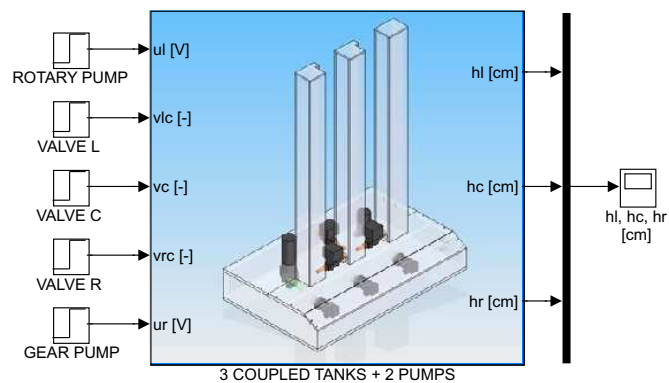
Druhým vstupem sčítacího členu před integrátorem je objemový průtok generovaný zubovým čerpadlem $k_R u_R(t)$. Ve schématu je čerpadlo zastoupeno bločkem **Pump R**, jehož vnitřní zapojení zahrnující vstupní necitlivost čerpadla v rozsahu $\langle 0, 2 \rangle$ V modelovanou bločkem **Dead Zone** a rozsah vstupu (saturaci) v rozsahu $\langle 0, 12 \rangle$ V je na obr. 2.3(a). Schéma zubového čerpadla je převzato z (ROUBAL, J. et al., 2010).

V rovnici (2.3) se vyskytuje odmocnina z rozdílu hladin. Nyní je třeba ještě upozornit na jistý detail. Tento rozdíl může být jak kladný tak záporný, ale odmocnina je definována jen pro kladná čísla. Proto je nutné tento problém ošetřit pomocí funkce **signum**, jak je znázorněno ve schématu na obr. 2.3(b), které představuje vnitřní zapojení bločku **sqrt** ve schématu na obr. 2.2.

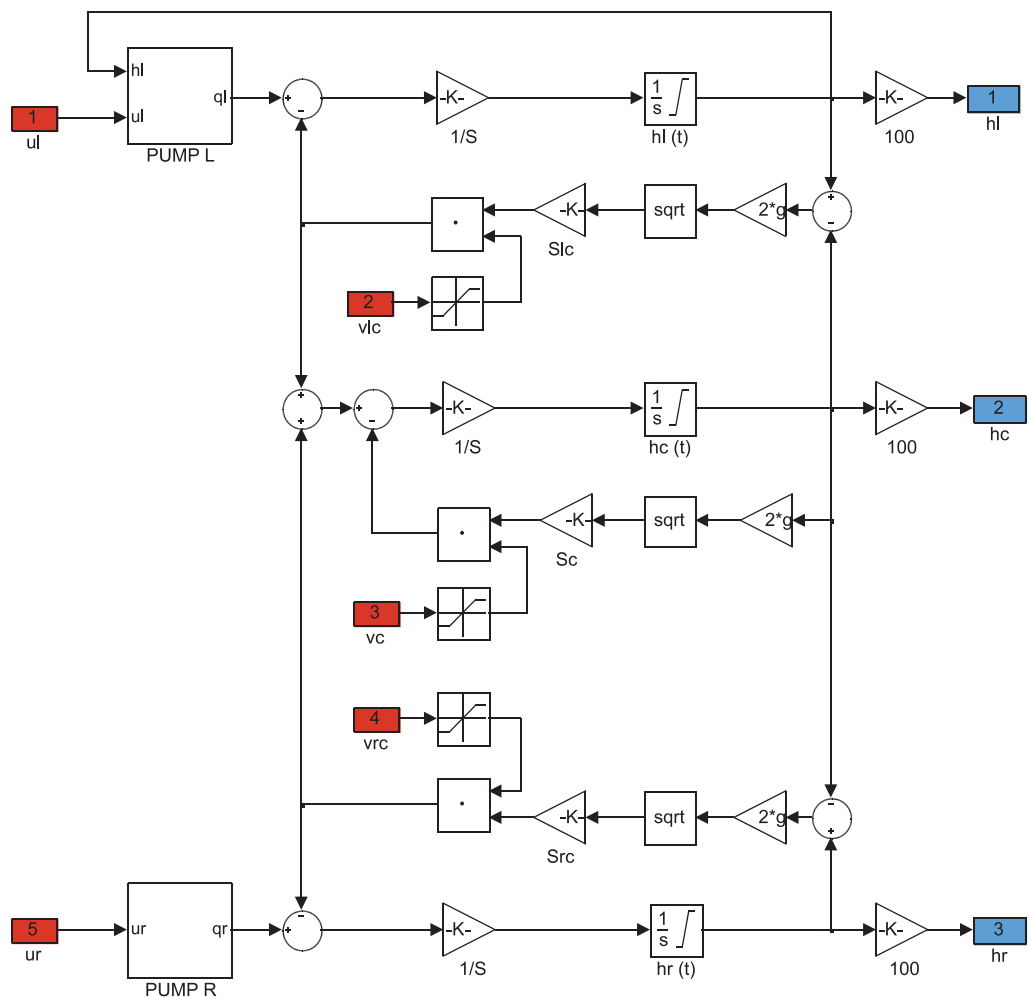


Obrázek 2.3: Zapojení bločků zubového čerpadla a odmocniny ze schématu na obr. 2.2

Rovnice (2.1) a (2.2) jsou převedeny do schématu analogickým postupem. Výsledné simulinkové schéma systému vodního hospodářství je znázorněno na následujícím obrázku. Schéma obsahuje pět vstupů (napětí na obou čerpadlech a míry otevření tří ventilů) a tři výstupy (výšky hladin v nádržích). Vnitřní zapojení celkového modelu je na obr. 2.5. Pro přehlednost jsou vstupy obarveny červeně a výstupy modře.

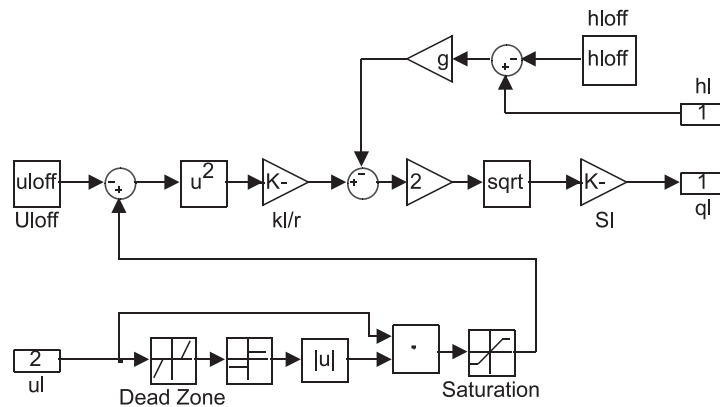


Obrázek 2.4: Simulinkový model systému vodního hospodářství



Obrázek 2.5: Simulinkové schéma modelu vodního hospodářství (rovnice (2.1) až (2.3))

Obsah bločku odstředivého čerpadla ukazuje obr. 2.6. Bločkem **Dead Zone** se nastavuje u čerpadel pásmo necitlivosti – jeho počátek a konec. Pokud se tedy například odstředivé čerpadlo rozběhne až při dosažení napájecího napětí $u = 3,73 \text{ V}$, nastavíme počátek na 0 V a konec na $3,73 \text{ V}$. Bloček **Saturation** ořezává vstupní signál, pokud jeho velikost dosáhne hodnoty mimo nastavený interval popsany minimální a maximální hodnotou v parametrech tohoto bločku. U odstředivého čerpadla je saturace nastavena v intervalu $\langle 0, 20 \rangle \text{ V}$. Hodnoty proměnných u_{loff} a h_{loff} byly použity z (ROUBAL, J. et al., 2010).

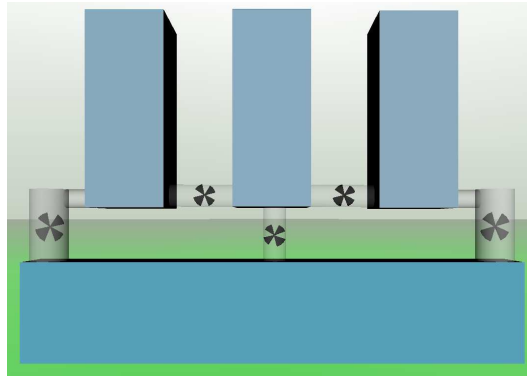


Obrázek 2.6: Vnitřní zapojení bločku PUMP L (odstředivé čerpadlo)
z obr. 2.5

2.2.1 Virtuální model vodního hospodářství

V tomto odstavci je popsána tvorba virtuálního modelu vodního hospodářství v programu V-Realm Builder včetně všech nastavení a připojení k simulinkovému modelu. Kliknutím v tomto programu na ikonku **New** se vytvoří nová scéna. Scéna je prostor, kam lze umístit komponenty modelu a nastavit ji vhodné pozadí. Do scény je možné přidávat libovolné tvary, kterými se mohou vytvořit odpovídající komponenty modelu systému vodního hospodářství. V dalších odstavcích je popsán základní princip tvorby tohoto virtuálního modelu, který je znázorněn na obr. 2.7.

Začít lze například od spodního zásobníku kapaliny, který je největší a tvoří tak celý základ virtuálního modelu. Kliknutím na **Insert Box** (viz obr. 2.8) se vloží komponenta kvádr. Nová komponenta se vloží automaticky pod názvem **Transform**, je vhodné ji proto vždy přejmenovat tak, aby název vystihoval použití komponenty v celkovém modelu.



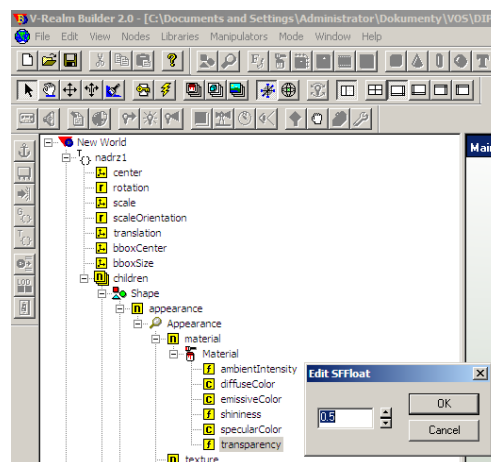
Obrázek 2.7: Virtuální model systému vodního hospodářství

V levé části programu jsou záložky s vlastnostmi jednotlivých komponent, viz obr. 2.10. Editací volby *Size* lze nastavit požadovanou velikost. Úprava volby *DiffuseColor* nastaví správnou barvu. Tato komponenta zastupující zásobník bude tedy umístěna níže než ostatní a budou z ní vycházet komponenty představující potrubí do čerpadel a potrubí z odtokového ventilu.



Obrázek 2.8: Ikona Insert Box v programu V-Realm Builder

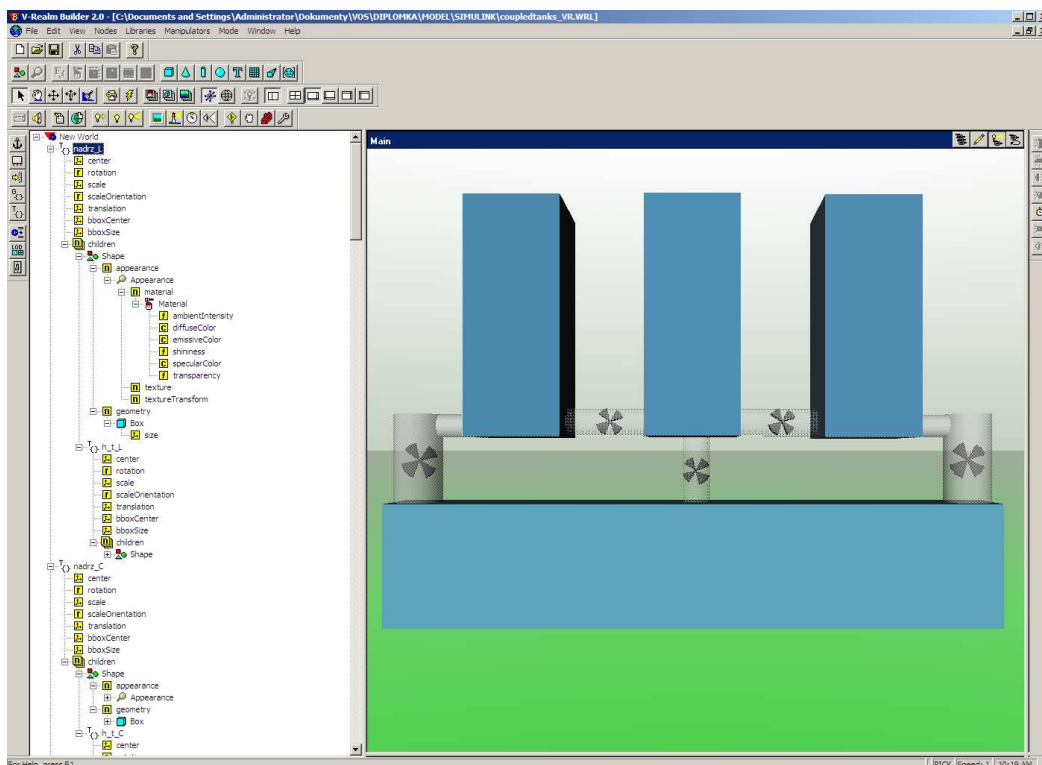
Insert Cylinder dovoluje vložit válce, které budou představovat potrubí do čerpadel a potrubí do výtokového ventilu. Volba *Transparency* dovoluje nastavit průhlednost prvků tak, aby se do potrubí daly vložit vrtulky simulující chod čerpadel a otevření jednotlivých ventilů.



Obrázek 2.9: Vlastnosti objektu – nastavení vlastnosti Transparency

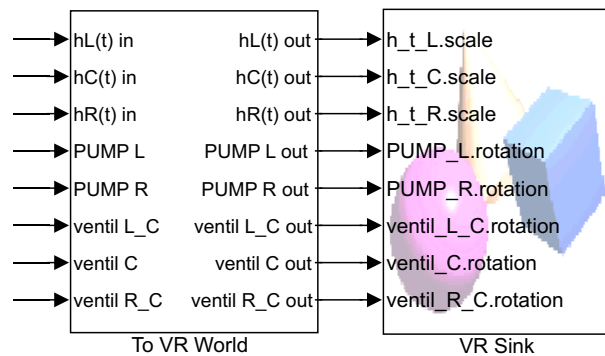
Kliknutím na **Insert Extrusion** se vloží vrtulky představující čerpadla. Dvojkliknutím na volbu **Extrusion** se otevře editor vzhledu prvku. Zde lze nastavit přesný vzhled vrtulky kresbou, nastavit lze i osu otáčení. Analogicky se vloží i potrubí s vrtulkou představující výtokový ventil.

Další komponenty modelu jsou věže s regulovanou výškou hladiny kapaliny. Věže se přidávají kliknutím na volbu **Insert Box**. Budou mít částečnou průhlednost a budou obsahovat vnořené prvky – objemy kapaliny. Objemy kapaliny budou další **Boxy**, které budou mít nastavenou modrou barvu a budou mít identickou velikost jako věže. Tyto **Boxy** se musí svázat s původními věžemi přes položku **Children**. V posledním kroku se přidá ještě potrubí od čerpadel do krajních zásobníků a dále od zásobníků k ventilům, toto potrubí se opět přidá kliknutím na **Insert Cylinder**. Tímto jsou dokončeny jednotlivé komponenty 3D scény, pokud je poskládáme do prostoru tak, aby toto umístění odpovídalo reálnému modelu, docílili jsme virtuální reality systému vodního hospodářství. Pro budoucí prezentaci 3D scény je vhodné nastavit i předdefinovanou pozici pohledu na model, tzv. **Viewpoint**. Těchto pohledových pozic se může nastavit libovolné množství, obvykle ale postačí pohled zepředu, shora a zešikma. Celý model virtuální reality se uloží pod vhodným názvem s příponou ***.VRL** do složky, ve které je uložen simulinkový model.

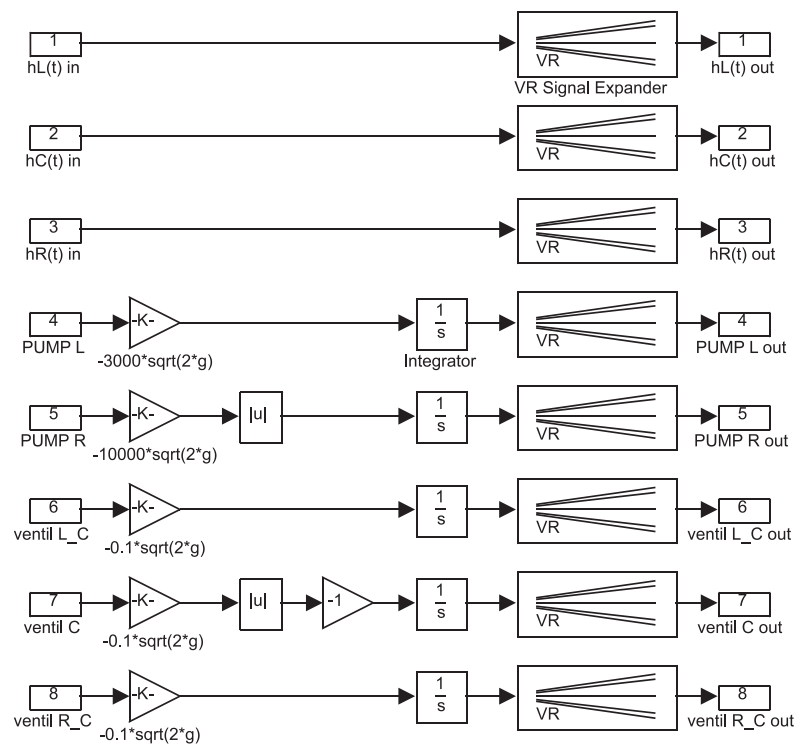


Obrázek 2.10: Okno programu V-Realm Builder s 3D scénou

K simulinkovému modelu se připojí virtuální realita pomocí bločku Virtual Reality Toolboxu VR Signal Expander a dále blokem VR Sink. Ve vlastnostech tohoto bloku, které se vyvolají dvojitým kliknutím na tento blok, se kliknutím na Browse zvolí odpovídající virtuální model. Po načtení modelu se napravo objeví stromová struktura, kde se nastaví, jaké parametry modelu se budou měnit v závislosti na změně vstupních veličin bloku VR Sink.



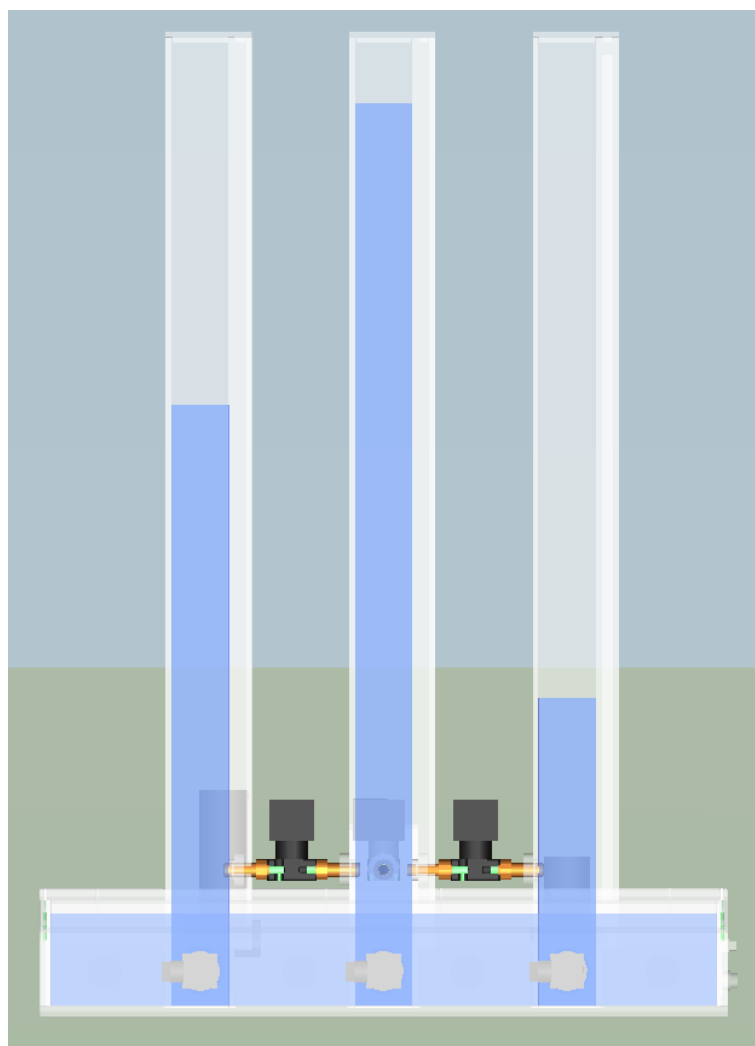
Obrázek 2.11: Bločky To VR World a VR Sink v programu Simulink



Obrázek 2.12: Vnitřní zapojení bločku To VR World z obr. 2.11

Vnitřní zapojení bločku *To VR World* uvedené na obr. 2.12 obsahuje připojení vstupních veličin do prvků *VR Signal Expander*. U modelů vrtulek simulující protékání kapaliny nebo chod čerpadla, kde je potřeba ošetřit směr nebo rychlost otáčení vrtulek, se připojí na vstup podle potřeby ještě prvky *Abs* nebo *Gain*. Kombinací prvků *Abs* a *Gain* s hodnotou -1 se zabezpečí otáčení vrtulky v požadovaném směru. Přidáním pouze prvku *Gain* se může ovlivnit rychlost otáčení dané vrtulky. Bloček *Integrator* převádí (integruje) otáčky na úhel natočení.

Pro případnou kvalitnější prezentaci činnosti virtuálního modelu se může použít také virtuální model exportovaný přímo z programu *Solid Edge*, ve kterém je v následující kapitole proveden návrh reálného modelu. Tento virtuální model je součástí přiloženého DVD.

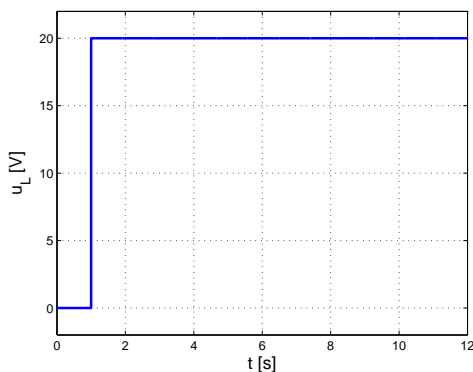


Obrázek 2.13: Virtuální model z programu *Solid Edge*

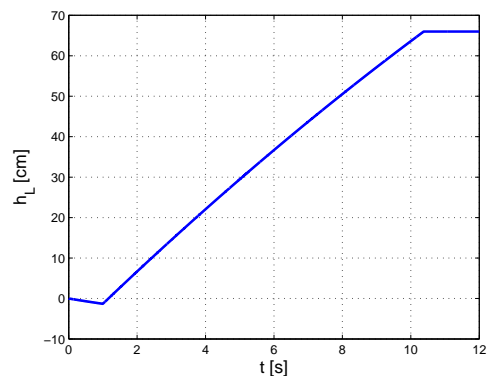
2.3 Analýza simulinkového modelu vodního hospodářství

V této kapitole bude provedeno několik experimentů se simulinkovým modelem a následná diskuse kvalitativní správnosti odezev. Nejprve bude provedena analýza zjištění času potřebného k napuštění krajních nádrží jednotlivými čerpadly při uzavření všech ventilů tak, jak to ukazují odezvy na obr. 2.14 a obr. 2.15. Poté bude simulováno přepouštění kapaliny z jedné nádrže do druhé pro zjištění rychlosti průtoku mezi nádržemi. Bylo by totiž absolutně nevhodné, aby přepouštění trvalo příliš dlouho nebo naopak příliš krátce.

V čase $t = 1$ s se zapne odstředivé čerpadlo, do té doby z levé nádrže vytéká kapalina. To je způsobeno tím, že nulová hladina odpovídá umístění ventilů, kdežto přívod od čerpadla se nachází níže z konstrukčních důvodů. V tomto čase se začne levá nádrž plnit kapalinou až v čase $t = 11,5$ s dojde k přetečení kapaliny bezpečnostním přepadem v nádrži. Z grafu lze vyčíst, že odezva odpovídá fyzikálnímu principu funkce odstředivého čerpadla. Křivka odezvy na intervalu, kde funkce roste, není přímka ale vykazuje kvadratický útlum nárůstu hodnoty funkce, což odpovídá rovnici (2.1).



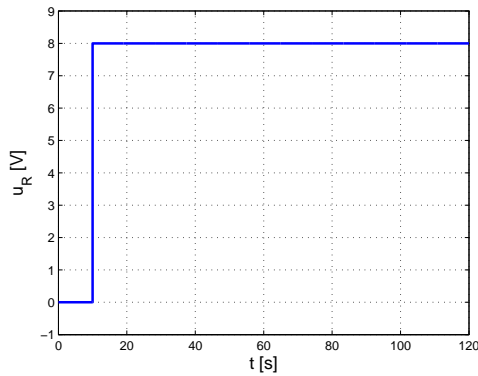
(a) vstupní signál odstředivého čerpadla



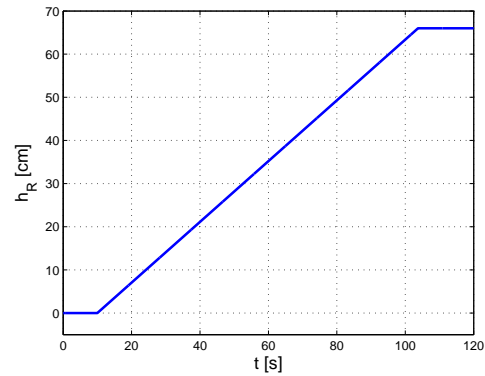
(b) odezva hladiny v levé nádrži

Obrázek 2.14: Napouštění levé nádrže odstředivým čerpadlem

V čase $t = 10$ s se zapne zubové čerpadlo a v levé nádrži začne lineárně stoupat výška hladiny až v čase $t = 104$ s dojde k naplnění této nádrže a k odtoku kapaliny bezpečnostním přepadem. Lineární nárůst výšky hladiny na intervalu, kde funkční hodnoty odezvy rostou, odpovídají rovnici (2.3).



(a) vstupní signál zubového čerpadla

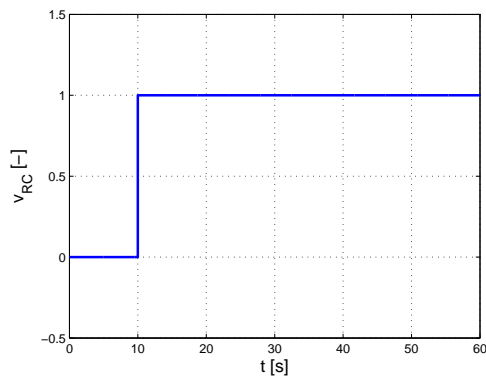


(b) odezva hladiny v pravé nádrži

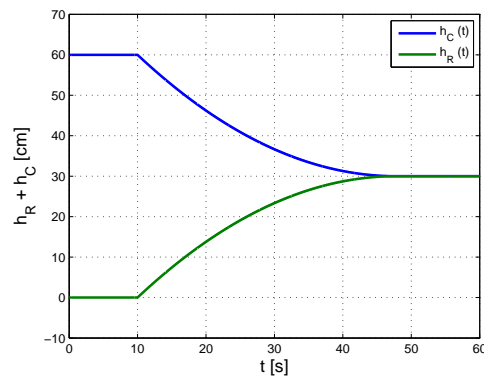
Obrázek 2.15: Napouštění pravé nádrže zubovým čerpadlem

Z výše uvedených simulací lze vypořizovat relativně velký rozdíl v době načerpání nádrže jednotlivými čerpadly, což bylo požadováno v zadání této práce.

Další úlohou je analýza chování výšky hladin v pravé a prostřední nádrži s počátečním stavem prostřední nádrže $h_c = 60$ cm, při uzavření ventilu mezi pravou a prostřední nádrží a vypnutí zubového čerpadla. V čase $t = 10$ s se otevře prostřední ventil a dojde k odtoku kapaliny z prostřední nádrže do pravé nádrže až se hladiny v obou nádržích v čase $t = 45$ s vyrovnají.



(a) míra otevření pravého ventilu



(b) odezva hladin v pravé a střední nádrži

Obrázek 2.16: Vyrovnání hladin v pravé a střední nádrži

Výše uvedené obrázky opět potvrzují kvalitativní správnost modelu. Byly provedeny další experimenty se simulinkovým modelem. Z důvodu délky této práce tu již nejsou uvedeny. Simulinkový model vodního hospodářství je na přiloženém DVD a je možné tyto experimenty opětovně provést. Všechny experimenty ukázaly, že simulinkový model od-

povídá matematicko-fyzikálnímu popisu systému vodního hospodářství, který je uveden v kapitole 2.1.

Provedené simulace pomohly určit referenční hodnoty jednotlivých prvků budoucího modelu tak, aby vznikající model splnil požadavky pro jeho použití při výuce v nové laboratoři. Mezi tyto hodnoty patří především plochy podstav jednotlivých nádrží, světlosti ventilů, výkony čerpadel atd. Tyto parametry zásadním způsobem ovlivňují chování modelu při jeho reálném použití. Určují například dobu načerpání jednotlivých nádrží, dobu potřebnou k poklesu hladiny o určitou hodnotu při vypouštění nádrží skrze otevřené ventily atd. Uvedené simulace již dopředu ukazují, jaké úlohy z oblasti moderní teorie řízení budou moci být v přijatelném čase prováděny a jaké úlohy budou více či méně časově náročné, stejně tak i jaké parametry modelu budou v budoucnu trápit studenty při řešení zadaných úloh (např. počáteční necitlivosti čerpadel, nelineární čerpání objemu kapaliny odstředivým čerpadlem při měnící se výšce hladiny nádrže a konstantním vstupním napětí atp.). Navržené hodnoty jednotlivých komponent se následně využily při samotném návrhu konstrukce skutečného modelu a při výběru senzorů a akčních prvků.

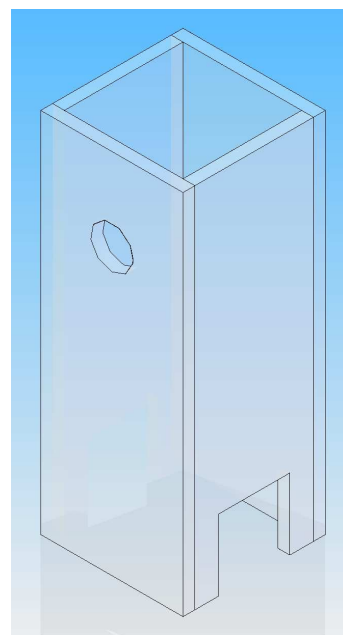
Kapitola 3

Návrh konstrukce reálného modelu

Návrh konstrukce skutečného laboratorního modelu systému vodního hospodářství vychází z diplomové práce (HANZLÍK, J., 2008) a ze simulací teoretického matematicko-fyzikálního modelu provedených v prostředí MATLAB/Simulink v kapitole 2.3. Aby nový model splnil požadavky zadání absolventské práce, došel významných změn. Tyto změny jsou především v konstrukční části. Model byl rozšířen o jednu nádrž, proporcionální ventil a zubové čerpadlo.

Osazení modelu v podstatě respektuje kladné hodnocení původního modelu (HANZLÍK, J., 2008) a přebírá tak většinu prvků. Protože původní model obsahoval rychlý zdroj kapaliny, bylo druhým zdrojem zvoleno zubové čerpadlo, které je naopak zdrojem pomalým. Další otázkou bylo, zda jako třetí ventil použít ventil dvoustavový či proporcionální. I přes vyšší cenu proporcionálního ventilu byl použit tento z důvodu větší variability výukových úloh realizovaných na tomto laboratorním přípravku.

V následujících částech bude popsáno složení modelu vodního hospodářství z jednotlivých prvků (senzory, akční členy, plexisklo). Elektrické prvky byly řádně proměřeny a jejich ověřené parametry jsou součástí této kapitoly. Kapitola dále obsahuje popis výkresové dokumentace, její strukturu a poznatky z lepení modelu. Kompletní výkresová dokumentace je v příloze této práce a také na přiloženém DVD, na kterém je též doporučený postup lepení modelu, celkový rozpočet projektu, manuály sensorů a akčních prvků, jejich faktury, objednávky a fotodokumentace.



3.1 Senzory

Model obsahuje tři snímače výšky hladiny v nádržích. Jelikož se navazuje na již existující model a v něm se velice dobře osvědčil snímač od firmy Smaris LMP 331, používá se i v tomto modelu. Jak píše výrobce (SMARIS, 2005), tento snímač je určen ke kontinuálnímu měření výšky hladiny kapalin, kalů, suspenzí nebo emulsí slučitelných s nerezovou ocelí tř. 17.348¹. Pracuje na principu měření hydrostatického tlaku vodního sloupce. Tento tlak je přenášen prostřednictvím náplně inertního oleje na měřicí polovodičový čip. Na tomto čipu je polovodičovou technologií vytvořen tenzometrický můstek jehož výstupní signál je teplotně kompenzován a upraven na standardní elektrický výstupní signál. Do soustavy se senzor připojuje pomocí závitu G3/4. Vodotěsné připojení zajišťuje těsnící o-kroužek. Snímač je připojen do elektronické části modelu dvěma vodiči s napěťovým výstupem v intervalu $\langle 0, 10 \rangle$ V, který odpovídá výšce hladiny $\langle 0, 1 \rangle$ m. Fotografie snímače je na následujícím obrázku.



Obrázek 3.1: Hydrostatické čidlo LMP 331

Fotografie senzoru na obr. 3.1 je převzata z manuálu firmy (SMARIS, 2005). Parametry sensorů použitých v modelu vodního hospodářství jsou uvedeny v textu nad obrázkem, fotografie na obr. 3.1 je pouze ilustrativní.

¹Konstrukční ocel korozivzdorná s legovacími prvky Cr-Ni-Mo-Ti (LEINVEBER, J. a VÁVRA, P., 2008).

3.2 Akční členy

Volba akčních členů byla podobně jako u senzorů výše ovlivněna již existujícím modelem. Model reprezentuje uzavřenou soustavu zásobníků kapaliny. Ke své funkci potřebuje proto kapalinu čerpat do svislých zásobníků, tzv. věží, a dále ji přepouštět ať už mezi jednotlivými věžemi nebo zpět do hlavního zásobníku, ze kterého byla do soustavy načerpána. Model tedy nutně musí obsahovat čerpadla kapaliny a elektricky ovládané ventily.

3.2.1 Ventily

V laboratorním modelu jsou použity elektricky ovládané ventily od firmy Asco Joucomatic. Bylo zvoleno použití dvou ventilů s proporční možností regulace velikosti průtoku kapaliny a dále jeden ventil s možností pouze průtok dovolit nebo jej zcela zastavit.

Jako proporční ventil byl zvolen typ SCG202A057V. Tento ventil je v klidovém stavu uzavřen, přípojovací závit má G1/4, průměr stěrby je 7,1 mm, hystereze je pod 5% a citlivost má pod 2%. Má dále bronzové tělo a je ovládán 24 V ss cívkou. Vnitřní odpor cívky je $32\ \Omega$. Otvírání ventilu je vhodné realizovat k tomu přímo určenou řídicí jednotkou. Její cena je ovšem realitivně vysoká, proto je v tomto případě otevření ventilu řízeno alternativně velikostí proudu cívky $I \in \langle 350, 600 \rangle$ mA.

Dvoustavový, někdy také digitální, ventil byl použit typ SCG262C013, který je v klidovém stavu zavřený, přípojovací závit je G1/4, velikost stěrby je 5,6 mm, má bronzové tělo a je ovládán 24 V ss cívkou při proudovém odběru $I = 0,3$ A. Fotografie ventilů je na následujícím obrázku.



(a) proporční ventil

(b) dvoustavový ventil

Obrázek 3.2: Ventily použité v modelu vodního hospodářství

3.2.2 Čerpadla

Model ke své funkci potřebuje dvě čerpadla. Pro větší variabilitu úloh řízení na laboratorním modelu bylo rozhodnuto použít z principu funkce každé čerpadlo jiné. Jedno čerpadlo je odstředivé, druhé zubové. Odstředivé čerpadlo je z principu funkce zdrojem tlaku, čerpadlo zubové je zdrojem toku. Tato konfigurace přináší zajímavé regulační možnosti a úlohy. Odstředivé čerpadlo bude tlačit kapalinu vzhůru jen do určitého stavu, kdy dojde k vyrovnání tlaku vodního sloupce a tlaku generovaného odstředivým čerpadlem, bude zároveň rychlým zdrojem nového objemu kapaliny. Naproti tomu zubové čerpadlo dodává konstantní množství čerpané kapaliny bez ohledu na výšku hladiny v dané nádrži. Oproti čerpadlu odstředivému bude ale asi 10 krát pomalejším zdrojem kapaliny do nádrží.

Odstředivé čerpadlo je použito stejné jako je v původním modelu. Jedná se o čerpadlo od firmy Johnson Pump, typ CM10P7-1. Jak je uvedeno v (HANZLÍK, J., 2008), toto čerpadlo má oddělení oběžného kola a motoru magnetickou spojkou. Čerpadlo je osazeno stejnosměrným motorem, jehož moment se na oběžné kolo přenáší pomocí dvou magnetů. Jeden je pevně připevněn k oběžnému kolu. Magnetické pole pak přes plastický kryt motoru otáčí magnetem oběžného kola. Výhodou pro laboratorní použití je skutečnost, že čerpadlo umožňuje suchý chod po dobu max. 30 minut a je odolné vůči zaseknutí lopatek, tudíž nedojde ke spálení motoru. Nemalou výhodou tohoto čerpadla je také jeho tichý chod oproti čerpadlům zubovým. Za nevýhodu lze považovat nelineární závislost ustálené výšky hladiny na napětí čerpadla. Čerpadlo je napájeno 24 V ss, při kterém odebírá v tomto konkrétním použití proud 0,54 A.

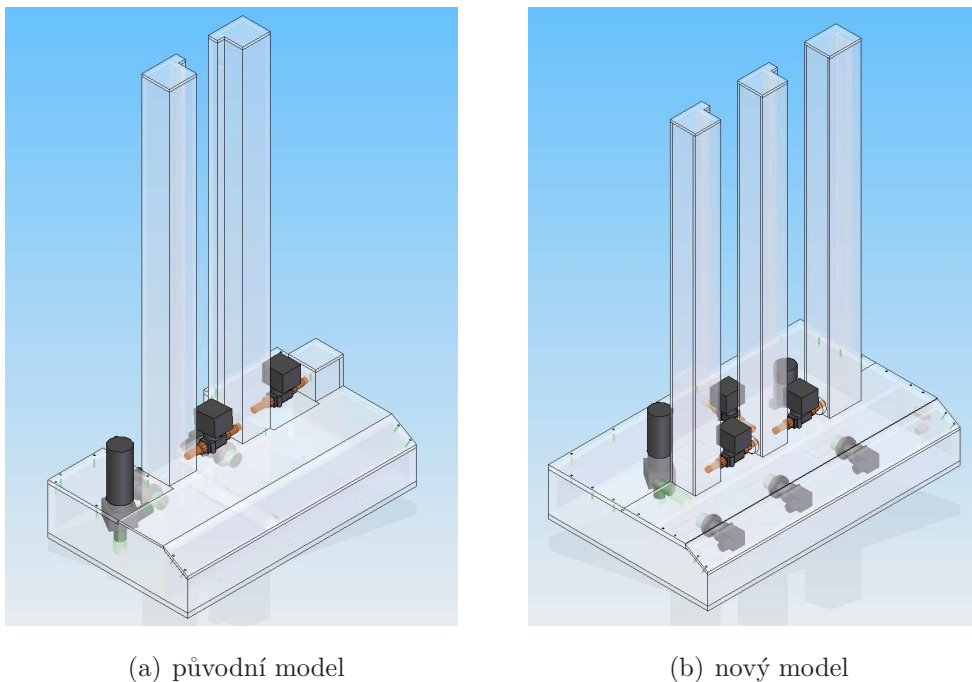


Obrázek 3.3: Odstředivé čerpadlo

Zubové čerpadlo bylo zvoleno, vzhledem k tak již finančně náročnému rozpočtu projektu a k obecně nižší dostupnosti malých zubových čerpadel na trhu, klasické zubové čerpadélko ostříkovačů z osobních vozů Škoda Favorit. Nespornou výhodou tohoto řešení je velice nízká pořizovací cena. Nevýhodou je relativně vysoká hlučnost čerpadla za chodu a v neposlední řadě i předpokládaná nízká životnost čerpadla, jelikož toto čerpadlo bylo konstruováno pro krátkodobý běh. Při výuce se dá předpokládat, že toto čerpadlo bude dlouhodobě přetěžováno a vlivem únavy ložisek bude muset být pravidelně vyměňováno kus za kus. Toto čerpadlo odebírá v tomto konkrétním použití při napájení 12 V ss oproti čerpadlu odstředivému relativně vysoký proud 3,4 A. Proto bude řízeno i vzhledem k hlučnosti a opotřebovatelnosti v rozsahu $\langle 0, 8 \rangle$ V, kdy je max. odběr 2 A.

3.3 Mechanická konstrukce modelu

Mechanická konstrukce modelu vychází opět z diplomové práce (HANZLÍK, J., 2008). Vzhledem k přidání další věže s regulovanou hladinou, ventilu i čerpadla je celý model o něco zvětšen. Samotné rozložení zůstalo podobné, nicméně umístění některých prvků systému se změnilo. Porovnání modelu Jiřího Hanzlíka a nového modelu ilustruje obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Porovnání původního a nového modelu vodního hospodářství

V následujících částech je popsán postup návrhu modelu systému vodního hospodářství, tvorba jeho 3D modelu, příprava výrobních výkresů a poté i samotné slepení modelu.

3.3.1 Úprava původního modelu

Práce začala tím, že byl vytvořen v programu Solid Edge V20 (SIEMENS, 2011) 3D model původního modelu (HANZLÍK, J., 2008) podle originální výkresové dokumentace od jeho autora. Z tohoto 3D modelu, viz obr. 3.4(a), bylo teprve řádně zjištěno, jak je systém poskládán z jednotlivých komponent a jak celý systém funguje. Jakmile bylo detailně pochopeno, jak autor navrhl původní laboratorní model, mohlo se začít s jeho úpravou tak, aby bylo vyhověno zadání této absolventské práce.

Spolu s vedoucím absolventské práce se na papír kreslily možné varianty nového rozložení vodárny. Padaly zajímavé varianty, například rozložit věže do trojúhelníkového tvaru, nicméně postupně se ukazovalo, že původní rozložení má své nesporné výhody a proto se nakonec rozhodlo, že se třetí věž umístí do řady vedle dvou původních.

Každá věž modelu musí mít ve své spodní části připojeno čidlo hydrostatického tlaku. Jelikož čidla doslova trčí z věží ven několik centimetrů, je lineární rozložení věží jediné možné. Jinak by totiž model musel být mnohem více roztažen do plochy, což by komplikovalo jeho umístění na běžném stole.

Model musí v novém uspořádání mít více než o 1/3 větší zásobník provozní kapaliny. To je docíleno přesunutím zásobníku čistě do zadní části modelu. Elektronika je přesunuta zcela do přední části, tím je opuštěna i původní koncepce (HANZLÍK, J., 2008) s použitím kabelového tunelu skrze zásobník s kapalinou.

Původní model je stejně jako nový kompletně vyroben z plexiskla. Jelikož se tento model vyrábí v podmínkách školních dílen, bylo nutno ustoupit od některých konstrukčních provedení, která můžeme nalézt u původního modelu. Například se musely všechny dlouhé hrany navrhnout v provedení natupo, oproti původnímu provedení pod úhlem 45°. Celé plexisklové krytování je vyrobeno pouze ze dvou variant tloušťky plexiskla. Zvolilo se 5 a 10mm. Reálně bylo k dispozici nakonec místo tloušťky 5 a 10mm jen plexisklo v tloušťce 4,5 a 9,5mm. Komponenty s původní tloušťkou 8mm jsou nyní vyrobeny v tloušťce 9,5mm. Z toho vyplývá, že model bude i tímto zásahem vážit více, což ztěžuje jeho případnou manipulaci.

3.3.2 Výrobní výkresy

Výrobní výkresy byly zpracovány podle doporučení konzultanta této absolventské práce Ing. Jaroslava Svobody v programu Solid Edge V20 přímo z 3D modelu. Jsou členěny podle standardních požadavků na výrobu svařované sestavy. I když se v tomto případě při výrobě svařovat nebude. V obecné rovině můžeme proces lepení zahrnout spolu se svařováním do podobného výrobního procesu.

Celý model můžeme nazvat celkovou sestavou několika další podsestav. Výrobní výkresy tudíž ve své podstatě kopírují montážní postup modelu. Jednotlivé podsestavy popisují menší celky modelu, jejich vzájemné propojení se pak označuje jako celková sestava.

Z výsledné konstrukce lze celkem jednoduše odvodit i skladbu technické dokumentace. Každá věž modelu je pro konstruktéra jednou podsestavou celkové sestavy. Podle této podsestavy lze zjistit, jak budou vůči sobě jednotlivé komponenty podsestavy umístěny, kolik a jaké takové komponenty daná podsestava obsahuje. Jednotlivé komponenty, tedy třeba stěny věže, jsou pak již dílčí technické výkresy dané podsestavy, které jsou rozkresleny pro jejich vlastní výrobu.

Schéma podsestavy věže 1 je následující:


S01

- 11 ZADNÍ ČÁST
- 12 LEVÝ BOK
- 13 PŘEPAD BOK
- 14 PŘEPAD ČELO
- 15 PRAVÝ BOK
- 16 ZESÍLENÍ
- 17 PŘEDNÍ ČÁST
- 18 ODDĚLENÍ ČERPADLA

kde S01 je název sestavy, 11 ZADNÍ ČÁST je označení zadní stěny věže, kde 11 je číslo pozice na výkresu sestavy. Toto číslo je složeno následujícím způsobem: 1 je označení sestavy 1 a 1 pak již konkrétní pozice v této sestavě, složením těchto číslic získáme číslo výrobního výkresu komponenty, například pozice 3 v sestavě 4 je označeno jako 43. Tímto

způsobem se dá pak velice lehce dohledat konkrétní výkres komponenty dané sestavy. Toto značení je umístěno do popisového pole, viz obr. 3.5, které se umísťuje vpravo dole na každém výrobním výkresu.

Celková sestava modelu pak obsahuje nejen plexisklové díly, ale i všechny další komponenty výsledné sestavy. Například tedy i všechny šroubky, ventily nebo třeba těsnění. Toto se zapisuje do takzvaného kusovníku, viz obr. 3.6, kde se najdou vždy všechny komponenty jednotlivé sestavy. Kusovník obsahuje u každé položky číslo její pozice na výkresu, jméno, polotovar (pokud se vyrábí) a počet kusů.

				Přesnost	Materiál	T.O.
				Tolerování	Polotovar	
				Promítání 	Hrubá hmotnosť	
				VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí Budějovická 421		
Změna	Datum	Index	Podpis			
Navrhl Šikýř	Poznámka	Měřítko 1:2 (1:5)	Název	VĚŽ_1		
Pře zkoušel						
Technolog						
Normalizace	Starý výkres	Číslo výkresu		VOŠ3_2010 S1A3		
Schválil	Číslo seznamu					
Datum 27.12.2010	Číslo sestavy					

Obrázek 3.5: Popisové pole sestavy věže 1

Poz.	Název	Polotovar	Norma	Množ.
11	ZADNÍ ČÁST	TL.5-75x845	PLEXI	1
12	LEVÝ BOK	TL.5-50x845	PLEXI	1
13	PŘEPAD BOK	TL.5-10x795	PLEXI	1
14	PŘEPAD ČELO	TL.5-15x795	PLEXI	1
15	PRAVÝ BOK	TL.5-50x845	PLEXI	1
16	ZESÍLENÍ	TL.5-50x64	PLEXI	1
17	PŘEDNÍ ČÁST	TL.5-60x845	PLEXI	1
18	ODDĚLENÍ ČERPADLA	TL.5-50x64	PLEXI	1

Obrázek 3.6: Kusovník sestavy věže 1

Veškerá dokumentace potřebná pro výrobu modelu je v příloze a také na přiloženém DVD ve formátech PDF (Adobe Acrobat) i DFT (Solid Edge). Na uvedeném DVD jsou k dispozici také 3D modely ve formátu PAR (Solid Edge) a sestavy těchto modelů ve formátu ASM (Solid Edge) k případnému dalšímu využití.

3.3.3 Výroba dílů

Plexisklo na výrobu dílů dle výkresové dokumentace bylo objednáno u firmy Lanit Plast s.r.o., lepidlo následně, vzhledem k momentální nedostupnosti na skladu jmenované společnosti, objednáno u firmy Řempe Holoubek a.s. Chrudim. Polotovary dílů byly rozřezány firmou Röchling Machined Plastics s.r.o. Následně se jednotlivé díly vyráběly ve školních dílnách. Rozřezání a samotnou výrobu zajistil Ing. Jaroslav Svoboda jako vedoucí úseku praktického vyučování. Finanční a hodinový rozpočet projektu je součástí příloh.

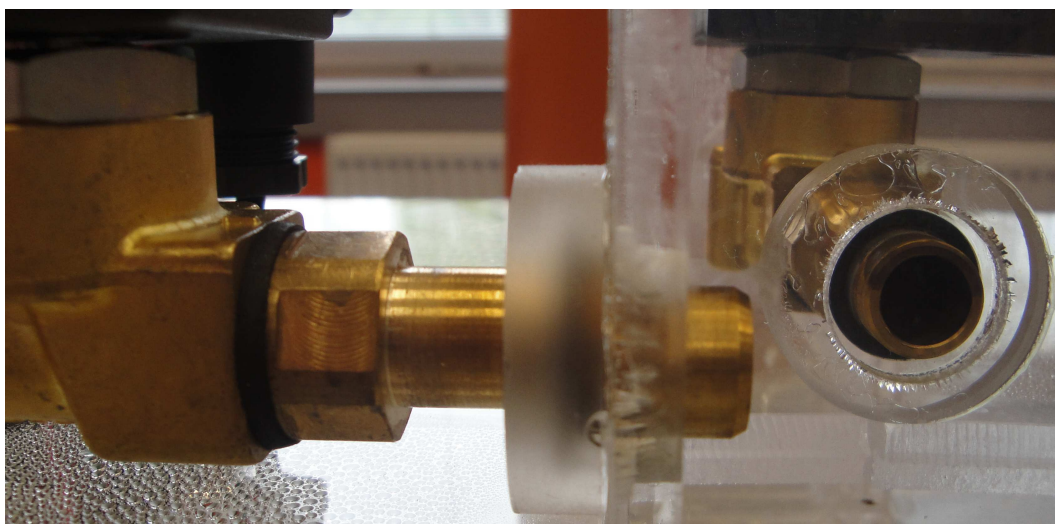
Na výrobě se podíleli Daniel Krž, Jaroslav Dvořák, Jiří Vrkoč a Miroslav Vrzala. Vždy se snažili vyjít maximálně vstříc, patří jim za to veliké díky. Obrábění plexiskla není zcela ideální záležitostí, proto postupovala výroba poměrně pomalu a opatrně. Výkresová dokumentace se ukázala být jako poměrně dobře připravená, nicméně několik drobných chyb se i tak vloudilo a proto bylo nutno u několika dílů provést dodatečné úpravy. Typickým problémem se ukázala příliš velká přesnost výroby, kde po slepení několika součástí k sobě došlo ke zvětšení rozměrů výsledné sestavy dílů, tudíž nadřazený prvek, například vrchní deska, nesedla mezi jednotlivé věže a musela být opětovně zfrézována řádově o 0,5 až 1mm.

3.3.4 Lepení modelu

Kvalita slepení modelu je z hlediska výsledného vzhledu modelu vodního hospodářství rozhodujícím faktorem. Jednotlivé díly se podařilo vyrobit kvalitně, i další dodatečné úpravy se podařilo dodělat včas a celé lepení se dařilo díky tomu zvládnout během několika týdnů. Lepení se původně zdálo jako největší výzva, ukázalo se ale, že při dostatečné pečlivosti jak při lepení, ale především při teoretické přípravě, jde tento úkon zvládnout poměrně rychle, bezchybně a relativně v krátkém čase. S lepením modelu vodního hospodářství pomáhali Jaroslav Dvořák, Josef Hrstka a Jan Pumpr. Opět jim za to patří velký dík.

I při lepení došlo k několika problémům. Typicky nejvíc potrápilo lepidlo, které bylo po přiložení dílů vytlačeno nežádoucím směrem. Lepidlo je po vytvrnutí viditelné i tam, kde být původně vůbec nemělo. Jelikož je ale poměrně transparentní, není tento stav nějakým zásadním problémem. Zásadní otázkou se stala tedy především volba, kolik lepidla na daný úsek hrany nanést a jak poté k sobě díly správně přiložit a adekvátně zatížit nebo minimálně alespoň udržet jejich požadovanou polohu po stanovený čas potřebný k dostatečnému zavadnutí lepidla.

V místech, kde se po vytvrdnutí lepidla zdálo, že by mohlo dojít k prosáknutí provozní kapaliny spojem, se přistoupilo k opětovnému preventivnímu nanesení dodatečné vrstvy lepidla. U prostřední přepážky bylo nakonec uchycení v bocích realizováno transparentním tmelem. Docílilo se tak její ideální polohy vzhledem ke zvolenému usazení všech věží, ke kterým je tato přepážka pevně přilepena. Důležité z hlediska budoucí těsnosti připojených ventilů bylo usazení věží do základní desky modelu, u kterého se použil postup současného usazení všech věží propojených ventily naráz. Tento postup zajistil souosost otvorů pro ventily, která je důležitá, protože ventily jsou těsněny o-kroužky (viz obr. 3.7), které jsou při nepřesnosti usazení náchylné k netěsnostem. Případnou netěsnost lze odstranit použitím silikonu.



Obrázek 3.7: Detail připojení ventilů – střední věž

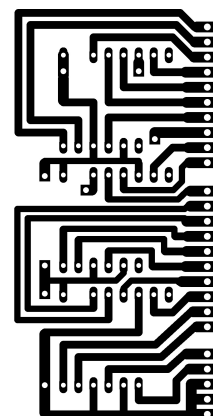
3.3.5 Provozní kapalina

Během testování funkčnosti modelu byla zvolena jako provozní kapalina destilovaná voda pro technické použití. Ukázalo se však, že tato destilovaná voda není sama o sobě zcela vhodná. Na dně zásobníku se po čase začal tvořit mazlavý povlak tvořený aktivitou mikroorganismů. K odstranění tohoto nežádoucího jevu by mohl posloužit přípravek Savo, který se ve vhodném poměru ředí s destilovanou vodou.

Kapitola 4

Elektronika pro řízení a ovládání modelu

Řízení a ovládání laboratorního modelu zajišťuje elektronická část, která podle zadání této absolventské práce umožňuje jak ruční ovládání tak i ovládání modelu z počítače s kartou MF624. Návrh elektroniky respektoval především požadavky související s budoucím používáním modelu vodního hospodářství ve školní laboratoři. Ruční ovládání modelu umožňuje přehledný displej, který je umístěn v přední části modelu. Řízení z počítače dovoluje konektor pro připojení vstupně-výstupní karty MF624 od firmy Humusoft. Skrze tuto kartu lze model pohodlně ovládat v programovém prostředí MATLAB/Simulink.



Elektronika je navržena bez využití mikrokontroleru a výsledný návrh razí cestu maximální jednoduchosti a účelovosti. Vstupní a výstupní signály jsou od sebe pro maximální bezpečnost a dlouhou životnost odděleny optočleny. Umístění osazených desek plošných spojů v přední části modelu znemožňuje případný kontakt provozní kapaliny s aktivními částmi elektroniky při připojení k napájení. Samotný napájecí zdroj je umístěn zcela mimo laboratorní model a nechává tak uvnitř modelu více prostoru pro chlazení výkonových prvků elektroniky. Tyto výkonové prvky jsou umístěny na odpovídajících chladičích, které zajišťují jejich optimální teplotu.

Elektronika byla navržena a odsimulována v programu MultiSim. Desky plošných spojů byly navrženy v programu Eagle. V dalších částech bude popsán postup návrhu elektroniky, počáteční požadavky a ověřené parametry senzorů a akčních členů. Součástí popisu jsou přímo elektrická schémata.

4.1 Požadavky na řízení

Před samotným návrhem elektroniky se po teoretické přípravě vznesly následující požadavky na řízení jednotlivých komponent. Tyto požadavky vycházejí z manuálů k jednotlivým prvkům.

Snímač výšky hladiny LMP 331 napájet v rozsahu $\langle 12, 36 \rangle$ V – volit 24 V, napěťový výstup bude v rozsahu $\langle 0, 10 \rangle$ V a bude kalibrován tak, aby $1 \text{ m} \approx 10 \text{ V}$. Proporcionální ventil bude řízen proudově, je plně zavřen při $I \leq 350 \text{ mA}$ a plně otevřen při $I \geq 600 \text{ mA}$. Diskrétní ventil bude řízen napěťově, bude plně zavřen při $U \leq 10 \text{ V}$ a plně otevřen při $U = 24 \text{ V}$ (odběr $I = 0,3 \text{ A}$). Zubové čerpadlo Favorit bude řízeno spojitě napěťově, bude vypnuto při $U = 0 \text{ V}$ a plný chod bude při $U = 12 \text{ V}$. Odstředivé čerpadlo CM10P7-1 bude řízeno spojitě napěťově, bude vypnuto při $U = 0 \text{ V}$ a plný chod bude při $U = 24 \text{ V}$ (odběr $0,54 \text{ A}$).

Po slepení modelu jsou tyto teoretické předpoklady v další části konfrontovány s realitou. U některých parametrů muselo dojít, vzhledem k naměřeným parametrům, ke změně.

4.1.1 Změřené parametry akčních členů a senzorů

Po slepení modelu a jeho osazení senzory a akčními prvky byly naměřeny referenční hodnoty jednotlivých komponent, podle kterých byly navrženy obvody elektroniky pro jejich korektní funkci. Naměřené hodnoty jednotlivých prvků jsou uvedeny v následujícím seznamu.

Snímač výšky hladiny LMP 331 pravý

- $h = 0,664 \text{ m} \approx U = 7,400 \text{ V}$
- $h = 0,332 \text{ m} \approx U = 4,410 \text{ V}$
- $h = 0,000 \text{ m} \approx U = 0,898 \text{ V}$

Snímač výšky hladiny LMP 331 prostřední

- $h = 0,664 \text{ m} \approx U = 7,390 \text{ V}$
- $h = 0,332 \text{ m} \approx U = 4,140 \text{ V}$
- $h = 0,000 \text{ m} \approx U = 0,878 \text{ V}$

Snímač výšky hladiny LMP 331 levý

- neměřen, předpokládají se přibližně stejné hodnoty jako u předchozích snímačů

Proporcionální ventil

- řídit proudem $I \in \langle 350, 600 \rangle$ A
- odpor cívky ventilu 32Ω

Diskrétní ventil

- při $U = 24$ V odběr $I = 0,3$ A

Zubové čerpadlo Favorit

- při $U = 8$ V odběr $I = 2$ A
- při $U = 12$ V odběr $I = 3,5$ A
- napájet napětím $U \in \langle 0, 8 \rangle$ V, aby byl za chodu omezen hluk čerpadla a také proud vzhledem k prodloužení jeho životnosti

Odstředivé čerpadlo CM10P7-1

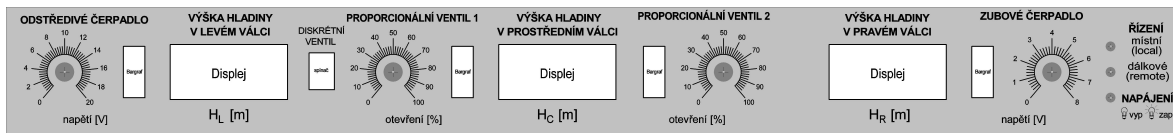
- při $U = 24$ V odběr $I = 0,4$ A
- napájet napětím $U \in \langle 0, 20 \rangle$ V z důvodu velkého tlaku tak, aby stíhala kapalina případně odtékat přepadem

Změřené hodnoty uvedené výše jsou hodnotami referenčními pro samotný návrh elektroniky. Jak z předchozích dvou částí vyplývá, oproti původním teoretickým předpokladům došlo k drobným změnám v požadavcích na řízení. Tyto změny vycházejí především z praktických zkoušek jednotlivých komponent, u kterých se ukázalo, že některé parametry bude vhodné upravit.

4.2 Návrh vzhledu předního ovládacího panelu

Model je navržen jak pro ovládání z PC tak pro ovládání v ručním režimu. Toto ovládání dovoluje přední panel, kde jsou umístěny ovládací prvky a také kontrolky stavu modelu.

Celý panel má rozměry 600 krát 65 mm. Regulaci chodu čerpadel a míry otevření proporcionálních ventilů umožňují zabudované potenciometry. Jejich aktuální stav ukazují sloupcové LED zobrazovače. Otevření a zavření diskretního ventilu dovoluje příslušný spínač s indikací otevření/zavření tohoto ventilu. Výšku hladin v jednotlivých nádržích ukazují sedmissegmentové displeje. To, zda je model v režimu remote (řízen z PC) nebo local (řízen ručně), znázorňují LED diody umístěné zcela vpravo. Na tomto místě je také indikace, zda-li je model připojen k napájení či nikoliv. Přesné rozložení prvků na předním panelu ukazuje obr. 4.1, který je na příloženém DVD ve formátu EPS (zapouzdřený Post Script).



Obrázek 4.1: Schéma rozvržení předního panelu

4.3 Potřebná napájecí napětí

Model je napájen z externího napájecího zdroje a s PC komunikuje prostřednictvím softwarového prostředí MATLAB/Simulink a vstupně/výstupní karty MF624 od firmy Humusoft. Seznam potřebných napájecích napětí zdroje a počítačové karty je v následujícím soupisu.

Externí napájecí zdroj

- +24 V
- +12 V
- +5 V
- 0 V
- -12 V
- -5 V

Karta MF624

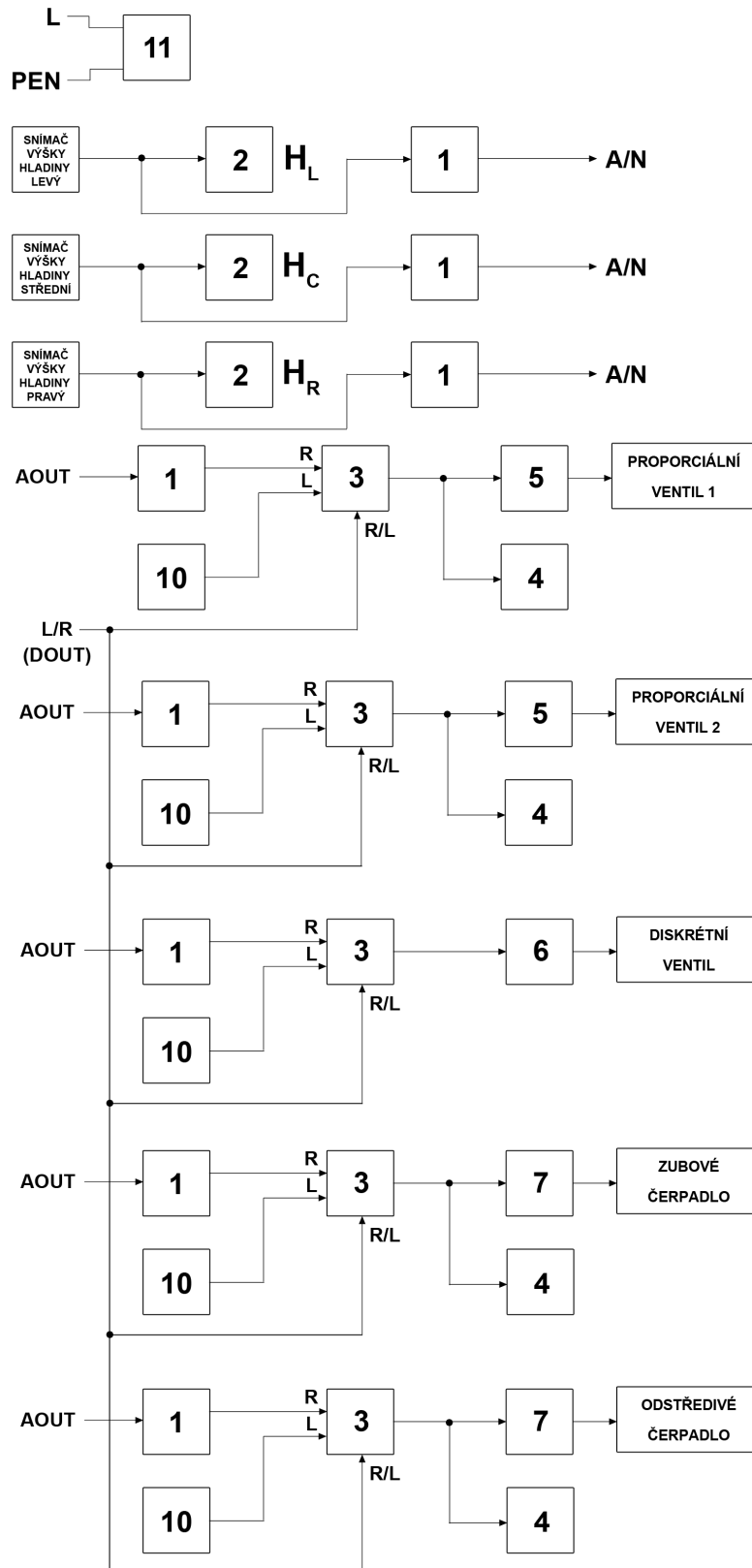
- +12 V
- 0 V
- -12 V
- TTL¹ digitální vstupy a výstupy s jmenovitou úrovní 0 V a 5 V
- analogové vstupy a výstupy s jmenovitým rozsahem napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V

4.4 Blokové schéma elektroniky

Elektronika se skládá celkem z 11 funkčních bloků. Seznam těchto bloků je uveden níže a vzájemné propojení ukazuje obr. 4.2. Bližší popis jednotlivých bloků je uveden v dalších částech této kapitoly včetně schématu jejich vnitřního zapojení a případně i včetně jejich změřené linearitě převodu signálů.

- 1 Optoelektronický oddělovač s kompenzací nuly a linearitě převodu
- 2 A/D převodník pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů
- 3 Logika řízení local/remote
- 4 A/D převodník pro sloupcové zobrazovače
- 5 Převodník U/I pro řízení proporcionálního ventilu
- 6 Elektronický spínač pro řízení diskretního ventilu
- 7 Převodník U/U pro řízení zubového čerpadla
- 8 Převodník U/U pro řízení odstředivého čerpadla
- 9 Obvody indikace napájení a typu řízení
- 10 Obvody ručního ovládání
- 11 Sestava bloků stabilizovaného napájecího zdroje

¹Tranzistorové Tranzistorová Logika (VOBECKÝ, J. a ZÁHLAVA, V., 2005)



Obrázek 4.2: Blokové schéma elektroniky laboratorního modelu

4.4.1 Požadavky na jednotlivé funkční bloky

Návrh funkčních bloků respektoval vznesené požadavky na jejich funkci tak, jak je uvádí následující seznam.

1. Optoelektronický oddělovač s kompenzací nuly a linearity převodu
 - vstupní napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V, vstupní proud zanedbatelný (jednotky μA)
 - výstupní napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V, výstupní proud max. jednotky mA
 - možnost dostavit nulu napětí a linearitu převodu
2. A/D převodník pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů
 - možnost přesného dostavení nuly napětí a součinitele převodu
 - každý zobrazovač je sestaven z trojice sedmiprvkových segmentovek
 - zobrazovače udávají výšku hladiny v metrech
3. Logika řízení local/remote
 - přepínání řízení remote/local se provádí TTL signálem z počítačové karty (jeden z výstupů DOUT)
 - při log. 0 (0 V) je zapnuto ruční řízení (local)
 - při log. 1 (+5 V) je zapnuto dálkové (remote) řízení z počítače
4. A/D převodník pro sloupcové zobrazovače
 - převádí vstupní napětí na desetisegmentový sloupcový zobrazovač
5. Převodník U/I pro řízení proporcionálního ventilu
 - vstupní napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V, vstupní proud zanedbatelný (jednotky μA)
 - výstupní proud $I \in \langle 350, 600 \rangle$ mA
 - možnost dostavit nulu a součinitel převodu
6. Elektronický spínač pro řízení diskrétního ventilu
 - vstupní napětí 0 V/5 V (TTL)
 - výstupní spínané napětí +24 V/max. 0,4 A (proudová zátěž počítána s rezervou 25 %)

7. Převodník U/U pro řízení zubového čerpadla

- vstupní napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V, vstupní proud zanedbatelný (jednotky μ A)
- výstupní napětí $U \in \langle 0, 8 \rangle$ V, max. 2,5 A (proudová zátěž počítána s rezervou 25 %)

8. Převodník U/U pro řízení odstředivého čerpadla

- vstupní napětí $U \in \langle 0, 10 \rangle$ V, vstupní proud zanedbatelný (jednotky μ A)
- výstupní napětí $U \in \langle 0, 24 \rangle$ V, max. 0,5 A (proudová zátěž počítána s rezervou 25 %)

9. Obvody indikace napájení a typu řízení

- obsahuje tři LED diody pro indikaci napájecího napětí, místního (local) a dálkového (remote) řízení

10. Obvody ručního ovládání

- obsahují potenciometry a spínač pro ruční ovládání jednotlivých prvků systému

11. Sestava bloků stabilizovaného napájecího zdroje

- výstupní stabilizovaná napětí a odhadnuté maximální proudové odběry:
 - +24 V/1,92 A
 - +12 V/2,89 A
 - +5 V/0,86 A
 - -12 V/0,72 A
 - -5 V/0,04 A
 - 0 V/6,43 A

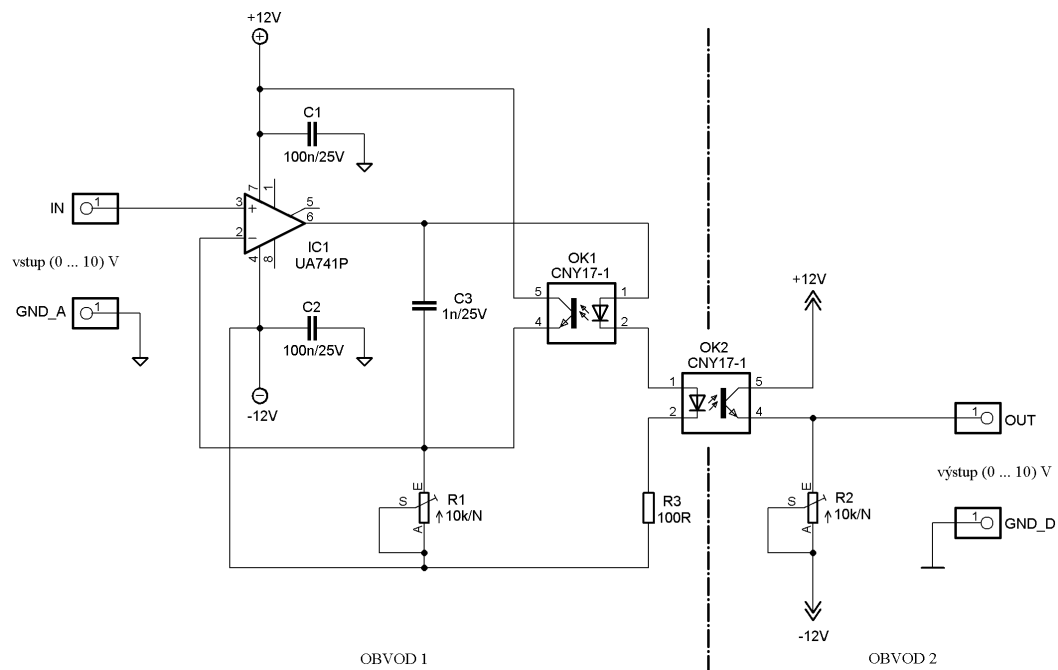
4.5 Elektrické zapojení jednotlivých funkčních bloků

V dalších částech bude popsáno jednotlivé zapojení použitých funkčních bloků. Bude stručně vysvětlen jejich princip a také postup správného nastavení těchto obvodů. Popis

obvodů je pro názornost a snažší pochopení doplněn přímo schématem zapojení, případně i jejich linearitou.

4.5.1 Optoelektronický oddělovač s kompenzací nuly a linearity převodu

Optoelektronický oddělovač je použit ke galvanickému oddělení zdroje a dalšího obvodu. Protože přenášíme analogický signál, bylo nutno do zapojení zabudovat kompenzaci nelinearity přenosu. To je docíleno (BELZA, J., 2004) dvojicí optočlenů, z nichž jeden je ve vazbě operačního zesilovače. Přesné nastavení nulového výstupního napětí při nulovém vstupním napětí se nastaví trimrem R1. Kapacitor C3 je blokovací kapacitor bránící samovolnému rozkmitání obvodu, R1 je trimr pro dostavení nuly výstupního napětí a R2 je trimr pro dostavení linearity převodu napětí. Schéma zapojení ukazuje následující obrázek.

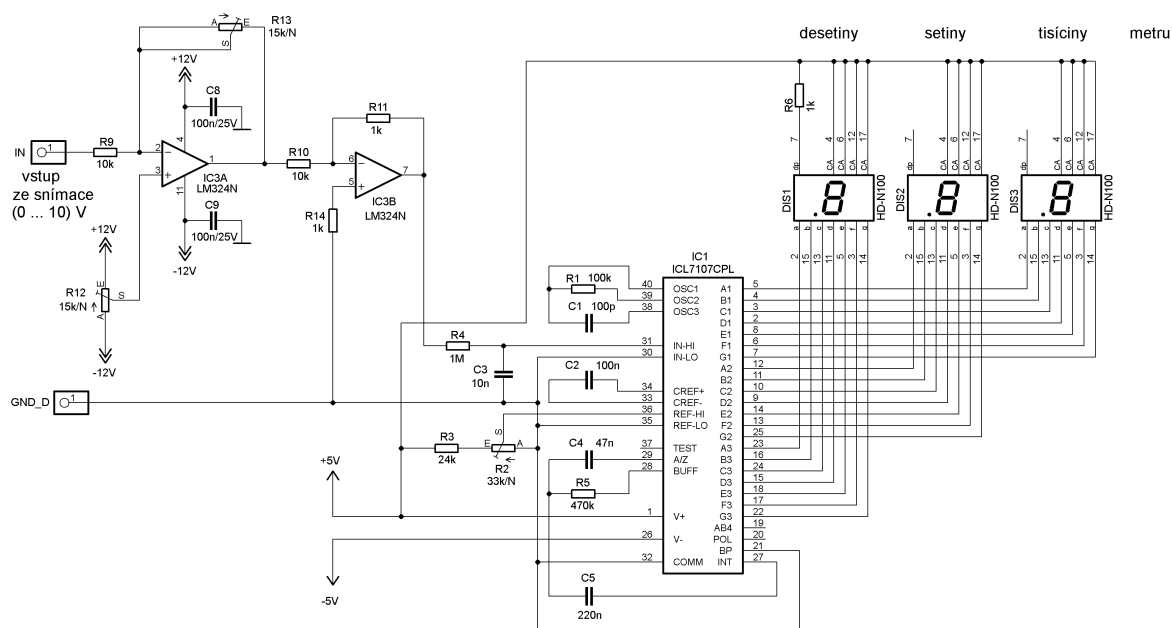


Obrázek 4.3: Schéma optoelektronického oddělovače

Korektní nastavení funkčního bloku je toto. Uzemníme vstup IN (tj. $U_{\text{vst}} = 0,00 \text{ V}$) a laděním trimru R1 nastavíme nulové výstupní napětí (tj. $U_{\text{vyst}} = 0,00 \text{ V}$). Dále na vstup IN připojíme napětí $U_{\text{vst}} = 10,00 \text{ V}$ a laděním trimru R2 nastavíme výstupní napětí $U_{\text{vyst}} = 10,00 \text{ V}$. Linearitu ověříme ve více bodech (2 V, 4 V, 6 V, 8 V).

4.5.2 A/D převodník pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů

A/D převodník pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů je složen ze tří částí. První částí je sledovací zesilovač se zesílením rovným jedné obsahující dva obvody LM324N. Výstupní napětí v rozsahu 0 až 2 V je vedeno na vstup IN integrovaného převodníku 7107. Obvod ICL 7107 je 3,5místný A/D převodník k buzení sedmissegmentových zobrazovačů. Poslední částí obvodu je trojice sedmissegmentových zobrazovačů se společnými anodami buzená výstupy převodníku 7107. Zapojení A/D převodníku pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů ukazuje následující obrázek. Trim R12 je pro dostavení nulové výšky hladiny, R13 je trimr pro dostavení koeficientu převodu a R2 je trimr pro dostavení referenčního napětí A/D převodníku.

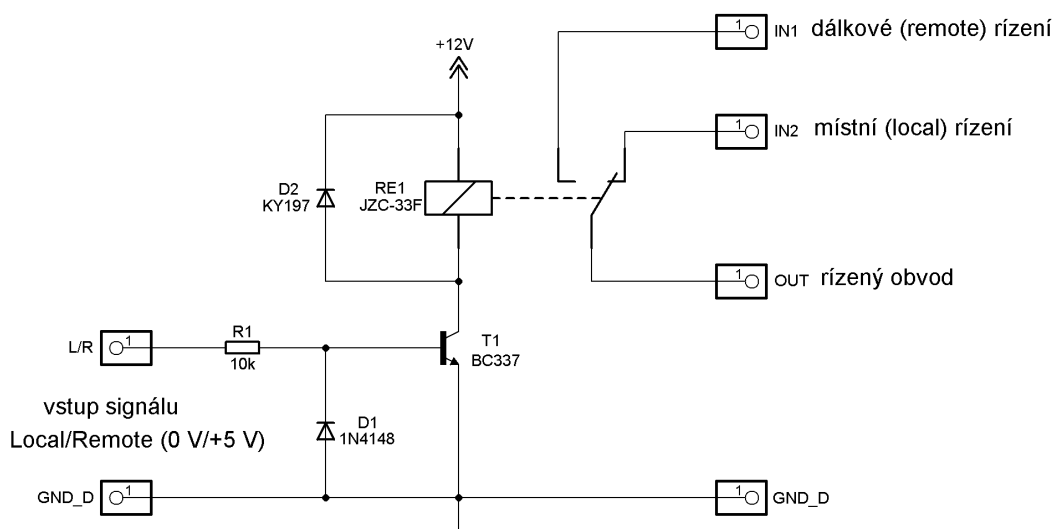


Obrázek 4.4: Schéma převodníku pro buzení sedmissegmentových zobrazovačů

Nastavení obvodu je následující. Laděním trimru R2 nastavíme na jeho jezdcí (tj. vývodu č. 36 IC1) napětí 1,00 V proti kostře. Dále na vstup IN připojíme snímač výšky hladiny ve válci a napustíme do věže tolik vody, aby výška hladiny odpovídala tzv. nulové hladině. Laděním trimru R12 nastavíme při nulové hladině nulový údaj na příslušném displeji. Do válce načerpáme maximum vody. Laděním trimru R13 nastavíme na příslušném displeji odpovídající výšku hladiny. Poznámka: Postupné nastavení trimrů R12 a R13 je nutno několikrát opakovat pro dosažení vyhovující přesnosti nastavení převodníku.

4.5.3 Logika řízení local/remote

Přepínací obvod mezi řízením local a remote je tvořen spínacím zesilovačem s bipolárním tranzistorem v zapojení se společným emitorem. V kolektoru tranzistoru BC337 je zapojeno vinutí přepínacího relé s rychlou ochrannou diodou KY197. Pokud na řídicím vstupu L/R je signál 0 V, je tranzistor zavřen, vinutím relé neteče žádný proud a výstup OUT je připojen na místní (local) řízení. Pokud je na řídicím vstupu L/R signál +5 V, je tranzistor sepnutý, relé je aktivní a výstup OUT je připojen na dálkové (remote) řízení. Zapojení je na dalším obrázku.

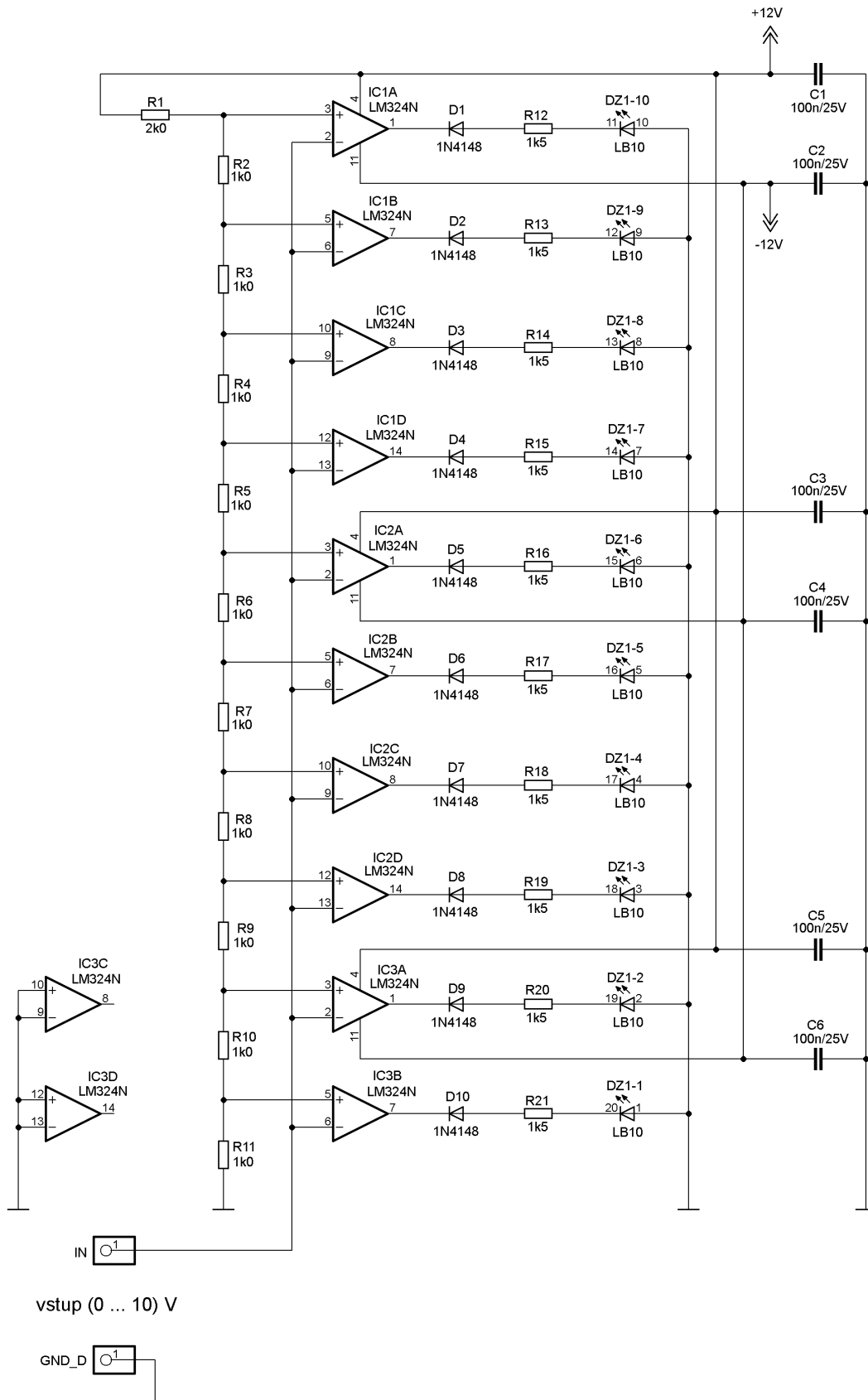


Obrázek 4.5: Schéma přepínacího obvodu local/remote

4.5.4 A/D převodník pro sloupcové zobrazovače

A/D převodník pro sloupcové zobrazovače je navržen v komparačním zapojení s desetibitovým výstupem na LED bargraf². Napětí přivedené na vstup převodníku je porovnáváno v paralelním zapojení komparátorů s jednotlivými napětími na odbočkách odporového děliče R1 až R11. Pokud v příslušném komparačním stupni je vstupní napětí větší než napětí na odpovídající odbočce odporového děliče, komparátor překloupí svůj výstup do záporné úrovně, čímž se otevře připojená spínací dioda 1N4148 a rozsvítí se příslušný segment bargrafu. Schéma ukazuje následující obrázek.

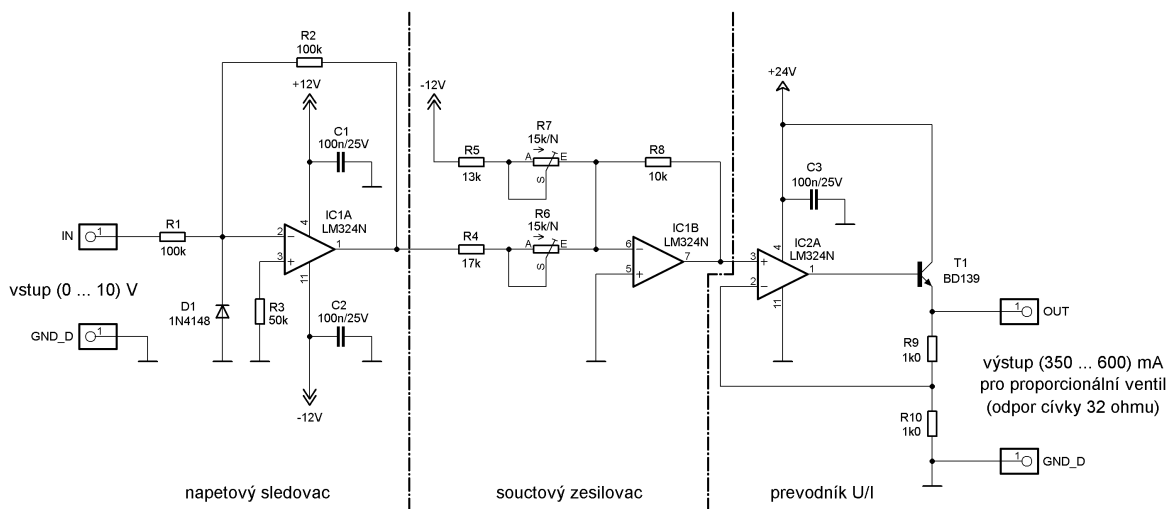
²LED sloupcový zobrazovač



Obrázek 4.6: Schéma převodníku pro sloupcové zobrazovače

4.5.5 Převodník U/I pro řízení proporcionálního ventilu

Převodník U/I pro řízení proporcionálního ventilu je složen ze tří částí. První částí je zapojení operačního zesilovače jako tzv. napěťového sledovače. V tomto zapojení má operační zesilovač zesílení rovné jedné. Obvod slouží k impedančnímu přizpůsobení celého zapojení vůči zdroji signálu (optoelektronický oddělovací obvod). Na obvod napěťového sledovače navazuje součtový zesilovač, který plní funkci převodníku napěťových úrovní. Výstup tohoto zesilovače budí vlastní převodník napětí/proud, který je složen z operačního zesilovače s nesymetrickým napájením a proudovým posílením výstupu tvořeným výkonovým tranzistorem BD139. Rezistory R9 a R10 zapojené v emitoru tohoto tranzistoru plní funkci snímacího odporového děliče invertujícího vstupu operačního zesilovače IC2A. Vlastní operační zesilovač IC2A poté pracuje jako napěťový komparátor. Zapojení převodníku U/I pro řízení proporcionálního ventilu ukazuje následující obrázek. Trimr R7 slouží pro dostavení minimálního proudu proporcionálním ventilem a R6 je trimr pro dostavení maximálního proudu proporcionálním ventilem.

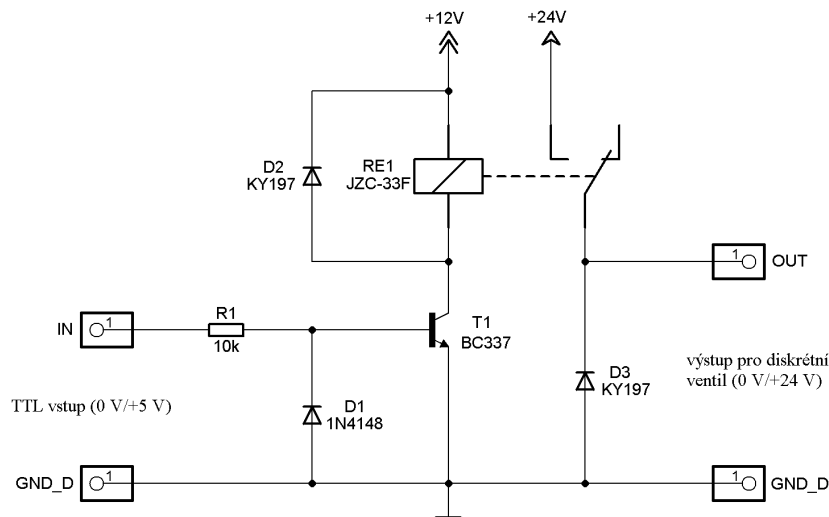


Obrázek 4.7: Schéma převodníku U/I pro řízení proporčního ventilu

Postup nastavení obvodu pro jeho korektní funkci je následující. Uzemníme vstup IN (tj. $U_{vst} = 0\text{ V}$) a laděním trimru R7 nastavíme proud ventilem na hodnotu 350 mA. V dalším kroku na vstup IN připojíme napětí $U_{vst} = 10,00\text{ V}$. Laděním trimru R6 nastavíme proud ventilem na hodnotu 600 mA. Postupné nastavení trimrů R7 a R6 je třeba opakovat několikrát pro dosažení vyhovující přesnosti nastavení převodníku.

4.5.6 Elektronický spínač pro řízení diskretního ventilu

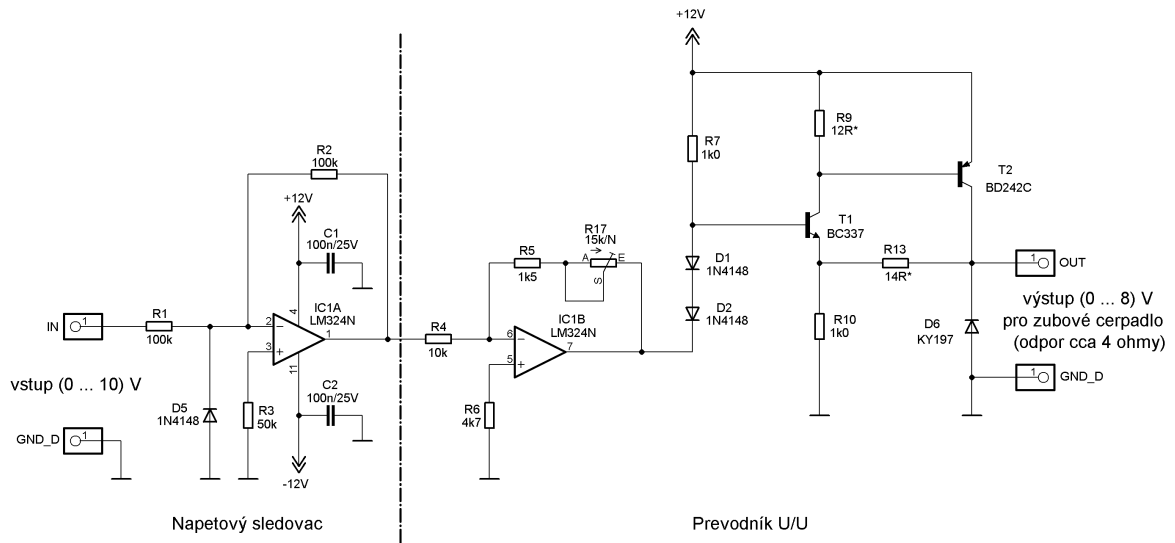
Elektronický spínač pro řízení diskretního ventilu je tvořen spínacím zesilovačem s bipolárním tranzistorem v zapojení se společným emitorem. V kolektoru tranzistoru BC337 je zapojeno vinutí spínacího relé s rychlou ochrannou diodou KY197. Pokud je na řídicím vstupu signál 0 V, je tranzistor zavřen, vinutím relé neteče žádný proud a diskretní ventil je odpojen od zdroje napájení. Pokud je na řídicím vstupu je signál +5 V, je tranzistor sepnutý, relé je aktivní a kontakt relé je sepnutý. Diskretní ventil je připojen na zdroj napětí +24 V. Diody D1 až D3 tvoří ochranu elektronického obvodu proti záporným napěťovým špičkám. Schéma elektronického spínače pro řízení diskretního ventilu je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.8: Schéma elektronického spínače pro řízení diskretního ventilu

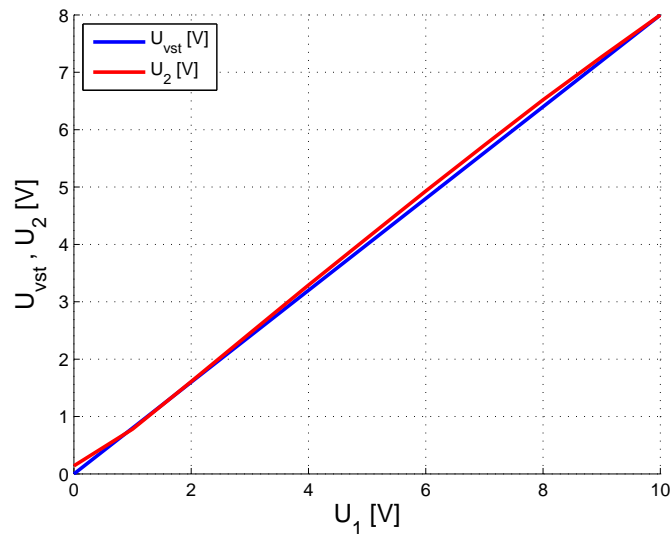
4.5.7 Převodník U/U pro řízení zubového čerpadla

Převodník U/U pro řízení zubového čerpadla provádí konverzi vstupního napětí v rozsahu 0 až 10 V na výstupní napětí pro napájení zubového čerpadla v rozsahu 0 až 8 V při proudovém odběru až 2 A. Vlastní obvod napěťového převodníku se skládá ze vstupního napěťového sledovače s přenosem rovným 1 a navazujícího převodníku napětí/napětí. Diody D1 a D2 slouží k potlačení počátečních nelinearit VA charakteristik bipolárních tranzistorů T1 a T2. Rychlá křemíková dioda D6 slouží k ochraně koncového stupně převodníku proti záporným napěťovým špičkám způsobenými indukčností zubového čerpadla. Trimr R17 umožňuje nastavení zesílení převodníku a R9, R13 umožňuje dostavení linearity převodu. Zapojení bloku převodníku U/U pro řízení zubového čerpadla zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 4.9: Schéma převodníku pro řízení zubového čerpadla

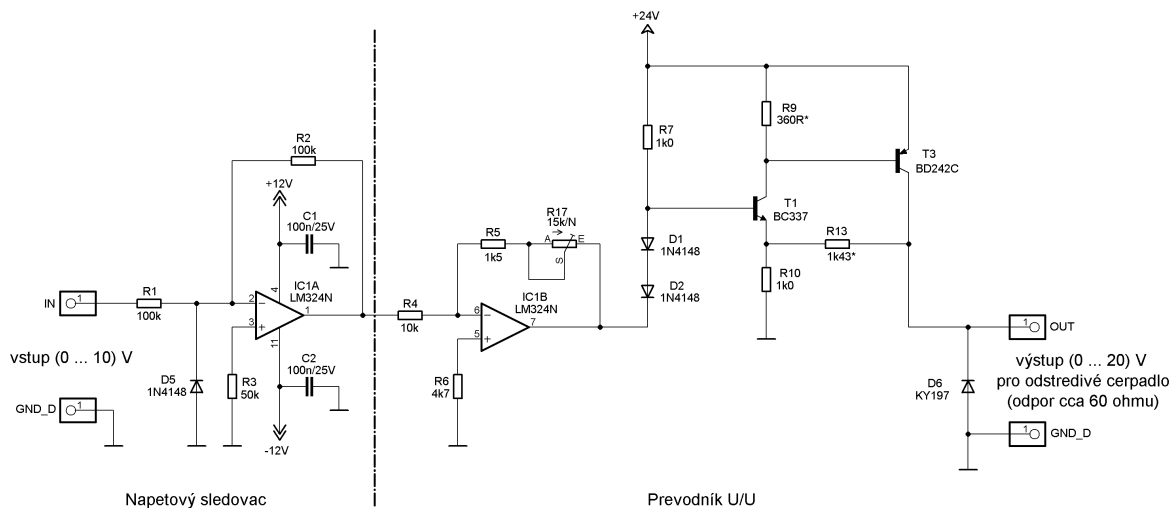
Nastavení převodníku pro správnou funkci je následující. Na vstup IN připojíme napětí $U_{vst} = 10,00 \text{ V}$ a laděním trimru R17 nastavíme ss napětí na čerpadle $U_{vyst} = 8,00 \text{ V}$. Dále na vstup IN připojíme napětí $U_{vst} = 5,00 \text{ V}$ a laděním R9 nastavíme napětí na bázi T2 na hodnotu $11,26 \text{ V}$ vůči zemi. Laděním R13 dostavíme napětí na čerpadle na hodnotu $4,11 \text{ V}$. Ověříme konečnou linearitu měřením závislosti napětí U_{vyst} na napětí U_{vst} , které měníme od 0 V do 10 V s krokem 1 V . Odsimulovaná linearita převodníku je na dalším obrázku.



Obrázek 4.10: Statická charakteristika převodníku pro řízení zubového čerpadla

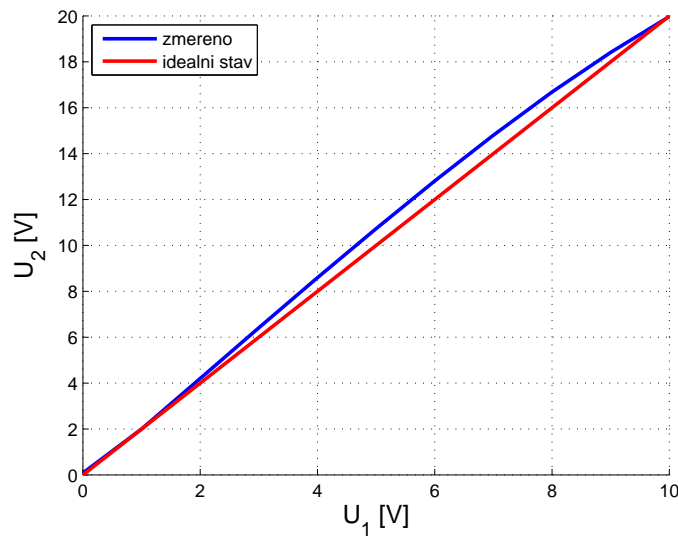
4.5.8 Převodník U/U pro řízení odstředivého čerpadla

Převodník U/U pro řízení odstředivého čerpadla mění vstupní napětí v rozsahu 0 až 10 V na výstupní napětí pro napájení odstředivého čerpadla v rozsahu 0 až 20 V při proudovém odběru až 0,5 A. Stejně jako v podkapitole 4.5.7 se i zde obvod napěťového převodníku skládá ze vstupního napěťového sledovače s přenosem rovným 1 a nava-
zujícím převodníkem napětí/napětí. Diody D1 a D2 slouží k potlačení počátečních ne-
linearit VA charakteristik bipolárních tranzistorů T1 a T2. Rychlá křemíková dioda
D6 slouží k ochraně koncového stupně převodníku proti záporným napěťovým špičkám
způsobenými indukčností odstředivého čerpadla. Pomocí rezistorů R9 a R13 se dostavuje
linearita převodu. Dále se v tomto zapojení trimrem R17 nastaví zesílení převodníku a re-
zistory R9 a R13 dostavují linearitu převodu. Celé schéma je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.11: Schéma převodníku pro řízení odstředivého čerpadla

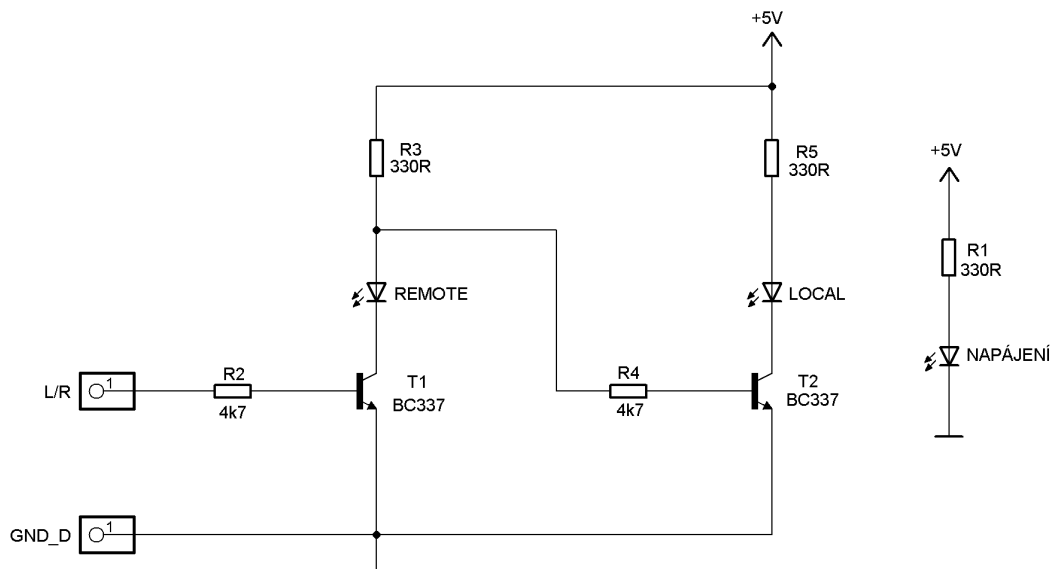
Nastavení převodníku U/U pro řízení odstředivého čerpadla se provede následujícím způsobem. Na vstup IN připojíme napětí $U_{vst} = 10,0$ V a laděním trimru R17 nastavíme ss napětí na čerpadle $U_{vyst} = 20,0$ V. Hodnoty rezistorů R9 a R13 se dohledají následujícím postupem. Na vstup IN připojíme napětí $U_{vst} = 5,00$ V a laděním R9 nastavíme napětí na bázi T2 na hodnotu 23,36 V vůči kostře. Laděním R13 dostavíme napětí na čerpadle na hodnotu 10,73 V. Ověříme konečnou linearitu měřením závislosti napětí U_{vyst} na napětí U_{vst} , které měníme od 0 V do 10 V s krokem 1 V. Linearitu převodníku naměřenou při simulaci obvodu ukazuje následující obrázek.



Obrázek 4.12: Statická charakteristika převodníku pro řízení odstředivého čerpadla

4.5.9 Obvody indikace napájení a typu řízení

Obvod indikace obsahuje 3 LED diody, které indikují stav napájení veškeré elektroniky a druh řízení (místní/dálkové). Jestliže je v provozu napájecí zdroj a pracuje bezchybně, svítí trvale kontrolka napájení. Obvod indikace typu řízení je složen ze dvou kaskádně zapojených tranzistorových spínačů. Jestliže je na řídicím vstupu L/R 0 V, je tranzistor

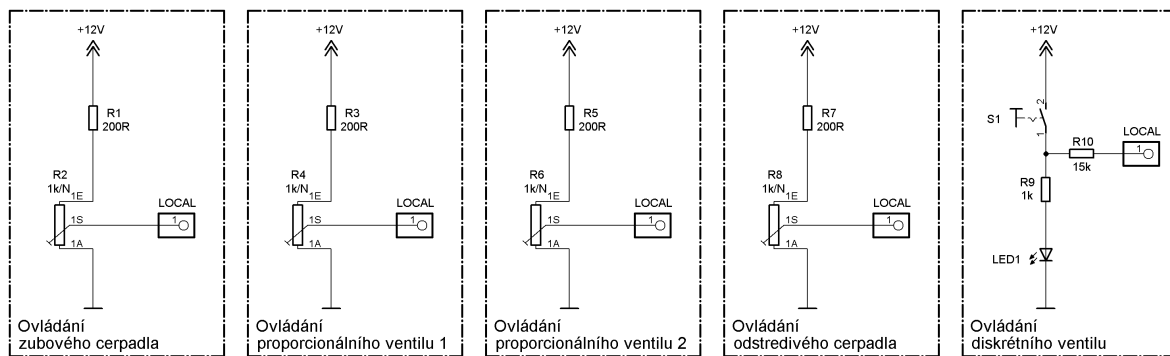


Obrázek 4.13: Schéma indikace napájení a typu řízení

T1 zavřen a tranzistor T2 naopak otevřen. Dioda REMOTE nesvítí a dioda LOCAL svítí a indikuje tím místní řízení modelu vodního hospodářství. Je-li na řídicím vstupu L/R napětí +5 V, je sepnut tranzistor T1 a tranzistor T2 rozepnut. Nyní svítí dioda REMOTE a dioda LOCAL je zhasnuta. Svit diody REMOTE indikuje vzdálené řízení elektroniky modelu vodního hospodářství. Zapojení lze nalézt na obr. 4.13.

4.5.10 Obvody ručního ovládání

Obvody ručního ovládání jsou složeny ze 4 potenciometrů pro ovládání čerpadel a proporcionálních ventilů a jednoho jednopólového spínače s prosvětlením svítivou diodou pro ovládání diskretního ventilu. Rezistory R1, R3, R5, R7 a R10 slouží k úpravě horních mezí regulovaných napětí. Schéma obvodů ručního ovládání ukazuje další obrázek.



Obrázek 4.14: Schéma obvodů ručního ovládání

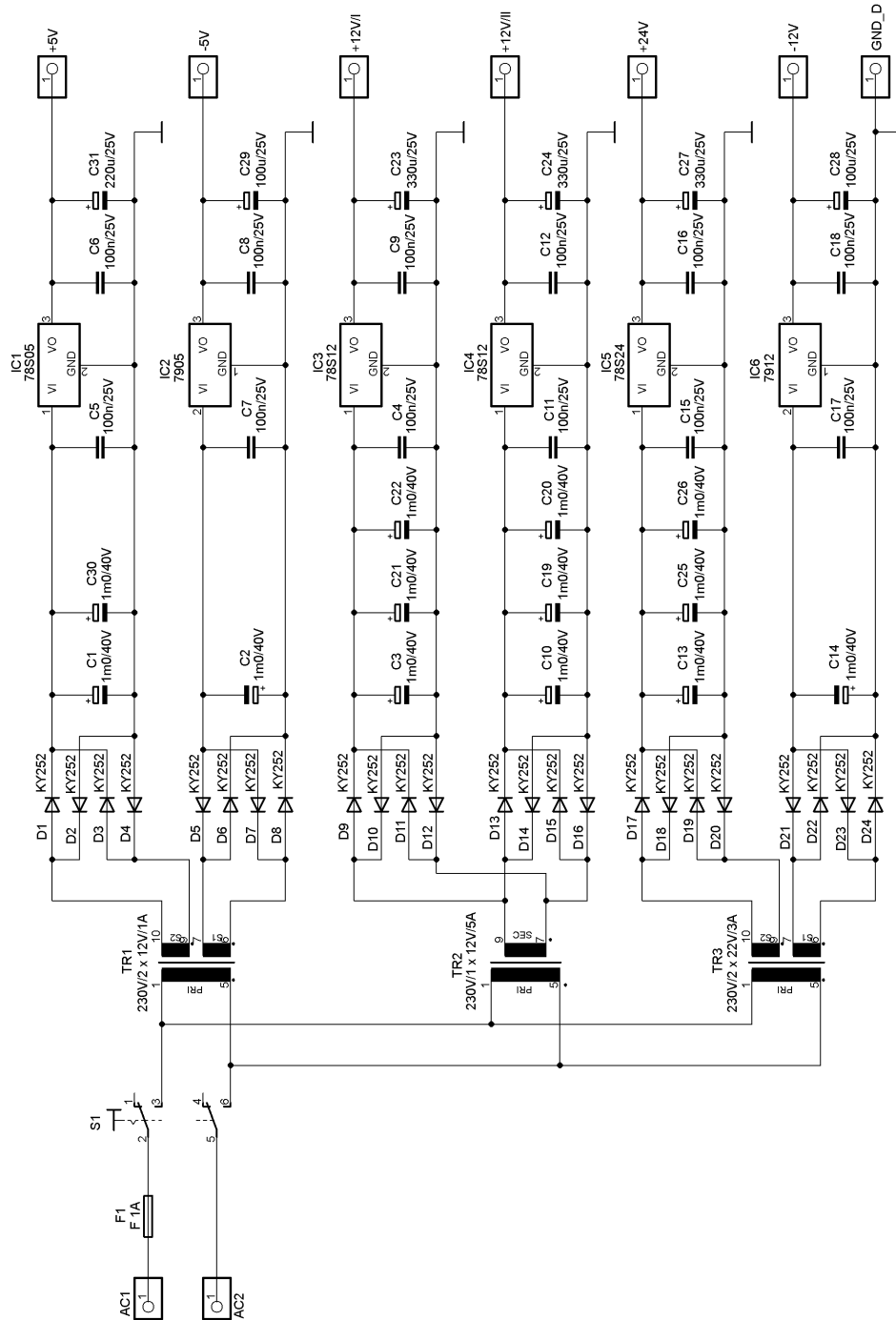
4.5.11 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj je připojen do sítě 230V/50Hz. Je složen ze tří toroidních transformátorů, šesti dvoucestných usměrňovačů v můstkovém zapojení za nimiž následují filtrační kondenzátory s kapacitou 1 mF až 3 mF napájející příslušné integrované stabilizátory. Výstupní stabilizovaná napětí celého zdroje jsou:

- +24 V/ max. 2 A
- dvakrát +12 V/ max. 2 A
- +5 V/ max. 2 A
- 0 V

- $-5\text{ V/ max. }1\text{ A}$
- $-12\text{ V/ max. }1\text{ A}$

Kompletní schéma napájecího zdroje zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 4.15: Schéma napájecího zdroje

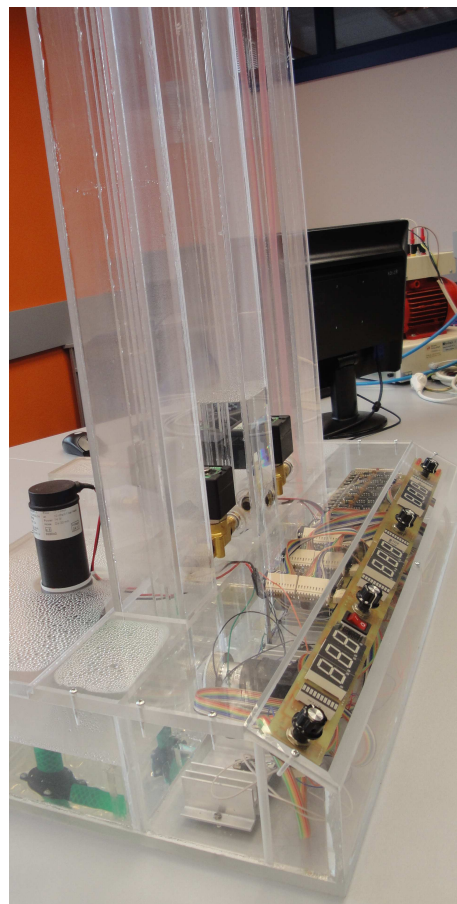
Kapitola 5

Závěr

V této absolventské práci se podařilo splnit všechny požadavky zadání. Nejprve byl vytvořen matematický, simulinkový a virtuální model systému vodního hospodářství. Součástí této práce je i popis laboratorního modelu, který může být využit studenty při výuce. Dále byly zpracovány podklady pro výrobu skutečného modelu vodního hospodářství dle norem tvorby technické dokumentace a byly pro něj vybrány i vhodné senzory a akční členy. V práci jsou popsány i rady a doporučení pro výrobu a slepení modelu. V poslední části je popsán návrh elektroniky pro řízení modelu. Součástí jsou schémata zapojení a nechybí i pokyny pro správné nastavení použitých obvodů.

Během tvorby modelu systému vodního hospodářství došlo i k několika problémům. Tyto problémy byly způsobeny většinou chybějícími zkušenostmi s realizací podobného modelu od samého počátku návrhu až po finální konstrukci a oživení.

Největší komplikace vznikaly při výrobě a lepení konstrukce modelu. Model byl navržen pro šířku plexiskla 5 a 10 mm, nicméně firma dodala plexisklo o 0,5 mm užší, na což se přišlo až během výroby a dokumentace se již tudíž nedala včas opravit. Naštěstí i přes tento problém lepení dopadlo vcelku dobře. Spoustu vrásek na čele způsobila občasná nedůslednost při lepení modelu, kde vznikaly nedostatečným zatížením lepených částí



větší šířky sestav komponent než se předpokládalo a muselo se tudíž dodatečně navazující prvky znovu obrábět, což u plexiskla není zrovna jednoduché. Občas se při lepení dostalo lepidlo i tam, kam nemělo, ale to už je vcelku drobnost a vzhledem k jeho vynikající transparentnosti problém kapku nepodstatný. Během testování se ukázalo, že případy věží by měly končit již těsně pod horním víkem. Při vyšší hladině kapaliny v zásobníku jinak dochází k bublání vytlačovaného vzduchu během plnění věže kapalinou. Také výroba a osazení desek plošných spojů někdy přinesla krušné chvíle při následném hledání nechtěně propojených vodivých cest a spojených nožiček integrovaných obvodů. Takto získané zkušenosti budou jistě v budoucnu dobře využity při návrhu dalších modelů do nové Laboratoře aplikované informatiky a fyziky.

Nad rámec této absolventské práce se podařilo tento model vyrobit a osadit jej vybranými senzory a akčními prvky. Podařilo se též vyrobit elektroniku potřebnou pro ruční ovládání modelu, případně lze skrze vstupně-výstupní kartu MF624 model ovládat z počítače v prostředí MATLAB/Simulink.

Velmi dobrý start do „života“ se tomuto modelu vodního hospodářství povedl již těsně po jeho dokončení dne 24.4.2011, kdy si užil svých pár vteřin slávy v poledních zprávách na stanici ČT 24 (<http://www.ct24.cz/vysilani/2011/04/24/211411012000424-12:00-poledni-udalosti/>), kde byl divákům ukázán v rámci reportáže z této školy, ve které se jej podařilo úspěšně navrhnout a vyrobit. Dva dny na to se ve škole konalo slavnostní otevření nové laboratoře aplikované informatiky a fyziky za účasti vedení školy, zástupců Jihočeského kraje, Českého vysokého učení technického v Praze, ředitelů vybraných středních škol a zástupců soukromých firem, kteří si tento model se zájmem prohlédli a hodnotili jej s pochvalných uznáním.

Budoucí výuka řízení na tomto modelu vodního hospodářství ukáže, zda-li se model povedl navrhnout kvalitně a jistě se podaří odstranit i případné nedokonalosti, na které se dosud vzhledem ke krátkému času testování nepřišlo. Tento model také jistě přispěje ke zlepšení výuky fyziky a řízení, což ocení především sami studenti. Jistě překonají počáteční nedůvěru, či snad odpor, k problematice moderní teorie řízení a i tento model jim k tomu budiž nápomocen.

Literatura

- BELZA, J. (2004), *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*, BEN – technická literatura. ISBN 80-7300-115-2.
- HANZLÍK, J. (2008), Distribuovaný řídicí systém s automaty rockwell automation, Master's thesis, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- KUPKA, L. (2007), *MATLAB & Simulink úvod do používání*, Lanškroun: JSPRINT CZ s.r.o. ISBN 978-80-239-8871-0.
- LEINVEBER, J. a VÁVRA, P. (2008), *Strojnické tabulky*, 4, Albra – pedagogické nakladatelství. ISBN 978-80-7361-051-7.
- ROUBAL, J., HOLEČEK, J. a HÁJEK, J. (2009), Laboratoř teorie automatického řízení [online]. [cit. 2011-05-02], <http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26/>.
- ROUBAL, J., HUŠEK, P. a KOL. (2010), *Regulační technika v příkladech*, Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-260-2.
- SIEMENS (2011), Solid edge. [cit. 2011-04-27], http://www.plm.automation.siemens.com/cz_cz/products/velocity/solidedge/.
- SMARIS (2005), *Hydrostatické měření výšky hladiny LMP 331 Nerezová vestavná sonda*, Smaris, Na záповědi 546 Uherské Hradiště 686 01.
- VOBECKÝ, J. a ZÁHLAVA, V. (2005), *Elektronika – Součástky a obvody, principy a příklady*, Grada Publishing. ISBN 80-247-1241-5.

Příloha A

Použitý software

Adobe Photoshop <http://www.adobe.com/cz/products/photoshop.html>

Corel Draw <http://apps.corel.com/int/cz/products/cdgs/>

GPL Ghostscript 8.64 <http://pages.cs.wisc.edu/ghost/doc/GPL/gpl864.htm>

GSview 4.9 <http://pages.cs.wisc.edu/ghost/gsview/>

MATLAB 7.3.0 (R2006b) <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

L^AT_EX 2_ε <http://www.miktex.org/>

Simulink <http://www.mathworks.com/products/simulink/>

Solid Edge V20 <http://www.solidedge.com/>

Virtual Reality Toolbox <http://www.mathworks.com/products/3d-animation/>

V-Realm Builder 2.0 <http://www.humusoft.com/>

WinEdt 6.0 <http://www.winedt.com/> – 30ti denní trialverze

Zoner Callisto <http://www.zoner.cz/>

Příloha B

Tvorba modelu v čase

- 24.03.2010 Začátek tvorby matematického popisu
- 13.04.2010 Poptávka elektricky ovládaných ventilů
- 15.04.2010 Cenový rozpočet senzorů a akčních členů
- 03.05.2010 Objednávka čerpadel, snímačů a ventilů
- 20.05.2010 K dispozici již 2 proporcionální ventily a zubové čerpadlo
- 18.06.2010 Dorazilo odstředivé čerpadlo a diskretní ventil
- 01.09.2010 Oficiální zadání AP
- 22.09.2010 První verze výkresové dokumentace
- 17.12.2010 Finální verze výkresové dokumentace
- 06.01.2011 Karta MF624 od firmy Humusoft nainstalována v počítači
- 15.02.2011 Nařezány plexisklové díly
- 24.02.2011 Začátek lepení modelu
- 11.03.2011 Slepny všechny věže
- 17.03.2011 Model kompletně slepen
- 21.03.2011 Osazeno zubové a odstředivé čerpadlo
- 22.03.2011 Dorazily konektory pro napájení modelu a komunikaci s počítačem

- 25.03.2011** Změřeny referenční hodnoty pro návrh elektroniky
- 04.04.2011** Navržen vzhled předního panelu
- 13.04.2011** Sraženy hrany u předního panelu ve firmě Röchling Machined Plastics s.r.o.
- 14.04.2011** Objednány elektronické součástky pro řízení modelu
- 20.04.2011** Převoz modelu do laboratoře
- 21.04.2011** Hotový přední panel a DPS optoelektronických oddělovačů
- 23.04.2011** Hotová DPS převodníků pro sedmissegmentové zobrazovače
- 26.04.2011** Provizorně zapojeno ruční ovládání části modelu včetně plně funkčního měření výšek hladin
- 27.04.2011** Slavnostní prezentace modelu v rámci celoškolské akce

Příloha C

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD s následující adresářovou strukturou:

- Absolventská práce v $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$
- Fotodokumentace
- Manuály sensorů a akčních členů
- Objednávky a faktury
- Schéma zapojení elektroniky
- Simulinkový model s virtuální realitou
- Výkresová dokumentace a 3D model
- Sikyr_AP_2010_2011.pdf

Příloha D

Rozpočet projektu

Následující tabulka uvádí finanční rozpočet modelu zahrnující nákupy jednotlivých součástí a zakázky realizované mimo školu. Ceny jsou uvedeny včetně DPH a obvykle včetně poštovného a balného.

Tabulka D.1: Finanční rozpočet projektu

Komponenta	Kusů	Cena za kus	Cena celkem
Odstředivé čerpadlo CM10P7-1	1	5 556,-	5 556,-
Zubové čerpadlo Škoda Favorit	1	252,-	252,-
Dvoustavový ventil SCG262C013	1	2 426,-	2 426,-
Proporcionální ventil SCG202A057V	2	4 358,-	8 716,-
Snímač výšky hladiny LMP331	3	7 756,-	23 269,-
Lepidlo Acrifix 192	1	411,-	411,-
Plexisklo	-	-	5 016,-
Nařezání plexiskla	-	-	2 500,-
Drobný materiál (těsnění, šroubky)	-	-	250,-
Provozní kapalina	-	-	100,-
Komponenty elektroniky	-	-	4 700,-
Celkem	-	-	53 196,-

Následující tabulka uvádí hodinový rozpočet práce na výrobě modelu realizované v rámci školy. Tabulka obsahuje zkratky, které znamenají: AP – absolventská práce, OV – úsek odborného výcviku, E – úsek elektro.

Tabulka D.2: Hodinový rozpočet projektu

Práce	Člověko- hodin	Pracovník
Simulinkový model + analýza	40	autor AP
Výkresové dokumentace	120	autor AP
Výkresové dokumentace	15	konzultant AP
Obrábění	36	učitelé OV
Lepení a montáž	40	autor AP, vedoucí AP, učitelé OV
Návrh elektroniky	45	autor AP, učitel E
Realizace elektroniky	70	autor AP, vedoucí AP, učitel E
Text AP	200	autor AP, vedoucí AP
Celkem	566	-

Jen pro ilustraci předpokládejme taxu 150,- Kč za hodinu, poté je celková cena práce 84 900,- Kč. Laboratorní model tedy celkově vyjde na 138 096,- Kč. Jen pro srovnání podobný profi model od firmy Amira (www.amira.de) přijde na cca. 220 000,- Kč.

Příloha E

Výkresová dokumentace

Na následujících stránkách je kompletní výkresová dokumentace vytvořená v programovém prostředí Solid Edge V20. Výkresy formátu A2 jsou z důvodu vazby vytištěny na formát A3.