

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Systém vyvažování průzkumné miniponorky

A balance system of reconnaissance mini-submarine

Diplomová práce

Autor: Bc. Martin Peklák
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Holada, Ph.D.

V Liberci 15. 5. 2013



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Peklák**
Osobní číslo: **M11000262**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu: **System vyvažování průzkumné miniponorky**
Zadávací katedra: **Ústav informačních technologií a elektroniky**

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

1. Nastudujte problematiku vyvažování v plavidlech, především v ponorkách.
2. Navrhněte systém, který umožní dovažování průzkumné miniponorky na pracovišti školitele.
3. Navržený systém mechanicky realizujte a naprogramujte řídicí mikrokontrolér.
4. Realizovaný prototyp otestujte v reálných podmínkách.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Miroslavu Holadovi, Ph. D. za možnost podílet na vývoji průzkumné miniponorky, za poskytnuté informace a cenné rady. Dále děkuji celému týmu studentů, kteří se na projektu ponorka podílejí a díky nimž došlo k velikému pokroku jak v hardwarové tak v softwarové části ponorky.



Abstrakt

System vyvažování průzkumné miniponorky

Projekt miniponorka vznikl v roce 2010. Výsledkem tohoto projektu je v současnosti prototyp robota, který se dokáže ponořit pod vodní hladinu. Pod hladinou je robot schopen vykonávat pohyb a pořizovat digitální videozáznam. Projekt miniponorka tvoří platformu, která díky trendu zdokonalování projektu přináší řadu nových problematik. S tím přicházejí zajímavá témata pro závěrečné práce či ročníkové projekty.

Miniponorku lze hardwarově separovat na několik samostatných systémů. Tato práce se zaměřuje na systém vyvažování ponorky resp. inovací jeho původní koncepce, která nahrazuje jednokomorový systém dvoukomorovým. Díky nové koncepci systému vyvažování je možné ponorku potopit a navíc oproti původní koncepci podélně naklápět. Díky tomu dojde ke zvětšení zorného pole kamery a bude také možné provést rychlé dynamické ponořování resp. vynořování. Dále uživatel získává přehled o jednotlivých výškách hladin v balastních komorách díky čidlům výšky hladiny. Jedná se o šestistavová čidla, fungující na principu vodivosti. S využitím detektoru náklonu resp. akcelerometru je možné získat informaci o aktuálním podélném a příčném náklonu ponorky. Ovládání systému vyvažování je realizováno pomocí ovládací aplikace, kterou má k dispozici uživatel na souši. V této aplikaci je zobrazen stav výšky hladiny v obou komorách, podélný a příčný náklon ponorky. Dále program obsahuje prvky pro ruční ovládání systému vyvažování a automatickou regulaci.

Dvoukomorový systém se v praxi velmi osvědčil. Jeho nadstavbou je již zmíněná automatická regulace podélného náklonu. Uživatel má možnost zadat požadovaný náklon v realizovatelném rozsahu a regulátor se postará o jeho dosažení.

Klíčová slova:

ponorka, balastní komora, akcelerometr, čidlo, výška hladiny, podélný náklon, vyvažování, regulace



Abstract

A balance system of reconnaissance mini-submarine

The project mini-submarine began in 2010. The result of this project is prototype of robot, which can sink under the water. Under the water the robot is able to move and capture digital record. The project mini-submarine is a platform which, thanks to a trend of project improvement brings series of new issues. With that comes interesting topics for final thesis and year projects.

The mini-submarine can be separated by its hardware into some separate systems. This thesis is focusing on the balance system of the mini-submarine or to be specific on the innovation of its original concept, which replaces unicameral system by bicameral system. Thanks to the new concept of balancing, it is possible to sink the submarine and even do longitudinal tilt. This causes, that a field of vision of the camera is now bigger and it's possible to make fast and dynamic immersion or emersion. Next thing is that the user knows about the individual level heights in ballast chambers thanks to sensors of level heights. Sensors are six-condition sensors, they work on the principle of conductivity. Using the detector of tilt or accelerometer it is possible to have the information about actual longitudinal and transverse tilt of the submarine. The controlling of balance system is handled by the controlling application, which the user uses from land. This application contains parts for manual control of the balance system and automatic regulation.

Bicameral system has proven to be very good. Its superstructure is already mentioned automatic regulation of longitudinal tilt. The user has the opportunity to enter the wanted tilt in possible range and the regulator will take care of it.

Keywords:

submarine, ballast chamber, accelerometer, sensor, level height, longitudinal tilt, balance, regulation



Obsah

Zadání	Chyba! Záložka není definována.
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam značek, zkratk a termínů.....	10
Úvod.....	11
1 Problematika vyvažování ponorky.....	12
1.1 Statické vyvažování	12
1.2 Dynamické vyvažování.....	13
2 Návrh systému vyvažování	14
2.1 Prezentace průzkumné miniponorky.....	14
2.2 Výběr vhodného systému vyvažování	16
2.3 Detekce náklonu.....	17
2.4 Měření výšky hladiny v balastních komorách	17
2.4.1 Principy měření výšky hladiny.....	18
2.4.2 Výběr vhodného principu detekce hladiny	20
3 Realizace systému vyvažování.....	21
3.1 Čidlo výšky hladiny	21
3.1.1 Konstrukční provedení	21
3.1.2 Princip vyhodnocení stavů	22
3.1.3 Dekódování stavu čidla	23
3.2 Detekce náklonu ponorky	25
3.2.1 Parametry senzoru	26
3.2.2 Výpočet náklonu	27
3.3 I/O řídící deska.....	29
3.3.1 Schéma zapojení.....	30
3.3.2 Rozhraní I2C a komunikace s akcelerometrem	31



3.3.3	Vyhodnocení výšky hladiny.....	32
3.3.4	Ovládání čerpadel.....	32
3.3.5	Komunikace s ovládacím softwarem	34
3.4	Balastní komory	34
3.4.1	Umístění elektroniky systému vyvažování	36
3.5	Ovládací aplikace	37
3.6	Testovací model systému vyvažování.....	39
3.7	Regulace	39
3.7.1	Identifikace systému vyvažování	40
3.7.2	Návrh regulátoru	41
4	Testování systému vyvažování v reálných podmínkách.....	45
	Závěr	46
	Seznam použité literatury	47
	Přílohy.....	49
	Příloha A – Přiložené CD.....	49
	Příloha B – Umístění systému vyvažování v ponorce	49



Seznam obrázků

Obr. 1: Ponorka - pohled na před'	15
Obr. 2: Ponorka – pohled z boku	15
Obr. 4: Optické čidlo	19
Obr. 5: Čidlo výšky hladiny	22
Obr. 6: Detekce stavu hladiny – vstupní inverterová část	23
Obr. 7: Stavový dekodér – schéma zapojení	24
Obr. 8: Dělič napětí - výstupní inverterová část obvodu	24
Obr. 9: Akcelerometr KAmoMEMS2 [7]	26
Obr. 10: Blokové schéma vyhodnocovací elektroniky akcelerometru [8]	26
Obr. 11: Orientace os	27
Obr. 12: Přeskolování hodnot	27
Obr. 13: Modelová situace pro výpočet úhlu natočení	28
Obr. 14: I/O řídicí deska	30
Obr. 15: schéma zapojení I/O řídicí desky	31
Obr. 16: H-můstek čerpadel [12]	33
Obr. 17: Schéma komunikace ovládací software – mikroprocesor	34
Obr. 18: balastní komory	36
Obr. 19: Umístění elektroniky systému vyvažování	37
Obr. 20: Ovládací software systému vyvažování	38
Obr. 21: testovací model systému vyvažování	39
Obr. 22: Přechodová charakteristika testovacího modelu a identifikovaného modelu	41
Obr. 23: Regulační obvod	42
Obr. 24: Regulační pochody pro různá zesílení P regulátoru	43
Obr. 25: Regulační pochody testovacího a identifikovaného modelu	44
Obr. 26: Umístění systému vyvažování v ponorce	49



Seznam značek, zkratek a termínů

TUL	Technická univerzita v Liberci
PC	Označení pro osobní počítač
I/O	Input/Output - vstup/výstup
GND	Zemní potenciál
PWM	Pulzně šířkové modulace
DPS	Deska plošných spojů
AL	Hliníkový materiál
M6, M8	Závit o průměru 6, 8 mm
L, H	Logické úrovně
A/D	Konverze analogových hodnot na digitální
D/A	Konverze digitálních hodnot na analogové
E24	Označení řady odporů s tolerancí 1 %
SISO	System s jedním vstupem a výstupem
P, PI	Proporcionální, proporcionálně integrační regulátor
PSH	Tvrzený polystyrén
RC	Dálkové ovládání
C#	Objektově orientovaný programovací jazyk
I ² C	Sériová sběrnice



Úvod

Tato práce se zabývá problematikou projektu miniponorka. Projekt miniponorka vznikl v roce 2010 a od tohoto roku do současnosti prošel úspěšným vývojem. Hlavní myšlenkou bylo vytvořit robota, schopného ponořit se pod vodní hladinu a zde pořizovat digitální záznam.

Robota lze separovat do několika samostatných subsystémů, které ovšem musejí spolupracovat a vytvářet tak funkční celek. Mezi jednotlivé subsystémy patří pohon ponorky, systém vyvažování, kamerový systém, systém osvětlení scény, systém napájení a systém řízení resp. ovládání ponorky. Současným trendem projektu miniponorka je neustálé vylepšování nedostatků jednotlivých systémů.

Vylepšení systému vyvažování bude cílem této práce. Konkrétněji pak půjde o inovaci původní koncepce systému vyvažování. Bude zpracován návrh nového systému, který na základě znalostí, získaných testováním původní koncepce odstraní nedostatky a přinese nové výhody systému vyvažování.

Prvním požadavkem na novou koncepci systému vyvažování je možnost měnit podélný náklon ponorky. S touto vlastností přicházejí výhody v podobě rozšíření zorného pole kamery a možnosti provádět dynamické ponoření resp. vynoření. Ponorka bude vybavena detektorem náklonu, který bude tvořit pro uživatele zpětnou vazbu. Uživatel tak bude mít stále k dispozici informaci o aktuálním podélném náklonu ponorky, jehož hodnotu bude moci měnit pomocí ovládacího softwaru.

Dalším požadavkem na novou koncepci bude navýšení kapacity komory popř. komor, kdy u předchozí koncepce byla k dispozici kapacita s maximální hodnotou jeden litr. Pro zvýšení bezpečnosti systému při napouštění resp. vypouštění bude aplikováno měření výšky hladiny v balastní komoře popř. komorách. Díky měření výšky hladiny bude možné ze známého tvaru nádoby určit množství napuštěné vody v ponorce.

V případě úspěšného návrhu, realizace a otestování nové koncepce systému vyvažování bude zavedena možnost automatické regulace podélného náklonu ponorky.



1 Problematika vyvažování ponorky

Jednou z nejdůležitějších vlastností ponorky je schopnost se potopit. Potopení lze dosáhnout dvěma způsoby a to buď staticky nebo dynamicky. Pro každý ze způsobů potopení je nutné ponorku správně vyvážit.

S pojmem vyvážení ponorky souvisejí dva hlavní parametry, které nemusejí být na první pohled zřejmé. Jedná se o celkovou hmotnost ponorky a o polohu těžiště. S těmito dvěma parametry je nutné počítat při statickém i dynamickém vyvažování. Změna hmotnosti ponorky způsobí změnu gravitační síly. Při navyšování hmotnosti dojde v určitém okamžiku k situaci, kdy gravitační síla překoná velikost vztlakové síly a dojde tak k ponoření ponorky. Posun těžiště v podélném směru ponorky způsobí naklonění, díky kterému je možné ponorku uvést do vodorovné polohy nebo jí cíleně naklonit.

Z výše uvedeného vyplývá, že pojmem vyvážení ponorky je myšleno jak ponořování, tak i náklon.

Další podstatnou vlastností ponorky je stabilita resp. odolnost proti překlopení. Se stabilitou je nutné počítat již při návrhu trupu, kde správnou volbou tvaru lze dosáhnout vysoké stability. Stabilita je také ovlivněna polohou těžiště ve směru vertikální osy. Obecně platí, že čím bude těžiště umístěno níže ve směru vertikální osy, tím bude plavidlo stabilnější. Tuto skutečnost je nutné uvažovat při rozmísťování vybavení v ponorce.

1.1 Statické vyvažování

Jedná se o nejjednodušší variantu vyvažování ponorky. Při tomto principu je z pravidla ponorka vybavena jednou balastní komorou, která představuje prostor pro načerpání vody do ponorky. Napouštěním resp. vypouštěním vody zajišťuje akční člen, který je realizován z pravidla čerpadlem. Voda však může být přepravována také pístkem, který vytváří v komoře přetlak nebo podtlak což způsobí napouštění resp. vypouštění vody.

Při statickém vyvažování je vhodné umístit balastní komoru do těžiště ponorky. Tím docílíme zachování konstantního podélného náklonu popř. konstantní vodorovné polohy. Pokud bude komora umístěna mimo těžiště ponorky, dojde při ponořování také k náklonu, což může být nežádoucí jev.



Výhodou statického vyvažování je jeho jednoduchost v podobě konstrukční nenáročnosti, kdy si z pravidla vystačíme s jednou balastní komorou a jedním čerpadlem. Statické dovažování je díky jednoduchosti možné reaktivně snadno ovládat.

1.2 Dynamické vyvažování

Z pohledu těžiště nám dynamické vyvažování umožní změnu jeho polohy. Prakticky toho lze docílit více způsoby. Nejpoužívanějším způsobem je užití dvou a více balastních komor, rozmístěných tak, že při jejich nezávislém napouštění je možné ponorku v určitém rozsahu libovolně naklápět. Další možností je využít jednu balastní komoru v kombinaci s posuvným závažím. Komora má na starost změnu hmotnosti resp. ponořování. Závaží slouží k naklonění ponorky v podélném směru resp. ke změně polohy těžiště. Tento systém se v praxi zdaleka neosvědčil tak, jako vícekomorové systémy, které se používají dnes prakticky ve všech typech ponorek.

Vlastnosti dynamického vyvažování lze velmi dobře využít také při ponoru. Využití spočívá v možnosti ponořování resp. vynořování pomocí pohonných jednotek. Pokud ponorku podélně nakloníme a aktivujeme pohyb vpřed, začne se ponorka v kapalině pohybovat pod úhlem náklonu. V tomto případě se však musí tíhová síla ponorky blížit vztlakové síle, aby tah pohonu dokázal ponorku potopit.

Další možností ponoru pomocí pohonných jednotek je využití výškových kormidel, které fungují obdobně jako výškové klapky u letadla. Tento systém je s oblibou používán u rádiem řízených modelů, kdy tíhová síla ponorky je nastavena na hodnotu nepatrně nižší než vztlaková síla. Tím je zajištěno, že při selhání pohonů, vybití baterií či ztrátě signálu dojde k samovolnému vynoření ponorky.

Moderní ponorky, především pak bojové, využívají kombinace obou variant. Dynamika náklonu pomocí změny polohy těžiště je zpravidla pomalá a značně omezena, ovšem v kombinaci s výškovými kormidly lze dosáhnout většího náklonu a vyšších rychlostí ponoření resp. vynoření.

U průzkumných ponorek nejsou ve většině případů vyžadované rychlé a obratné pohybové schopnosti a s nimi spojené vysoké úhly náklonu. Dynamické vyvažování u průzkumných miniponorek lze uplatnit např. při manévrování ve stísněných prostorách. Dynamický náklon také přináší výhodu v podobě rozšíření zorného pole kamery.

2 Návrh systému vyvažování

Hlavním cílem této práce je právě návrh a realizace nového systému vyvažování. Při návrhu budou zohledněny veškeré cíle, požadavky a omezení, na základě kterých bude zvolen nejvýhodnější návrh jednotlivých částí systému vyvažování.

Výsledek této práce by měl uživateli zajistit možnost ovládat nový systém vyvažování. Uživatel bude moci ponorku potopit a nově i podélně naklonit. Dále bude mít k dispozici jako zpětnou vazbu informaci o aktuálním podélném náklonu ponorky.

Před navrhování nového systému vyvažování bude vhodné seznámit se s aktuálním stavem ponorky a původním systémem vyvažování.

2.1 Prezentace průzkumné miniponorky

Historie projektu miniponorka začíná v roce 2010, kdy vedoucí projektu Ing. Miroslav Holada, Ph.D. přišel s nápadem vytvořit mobilního robota, schopného pohybovat se a pořizovat záběry pod vodní hladinou. Tím vzniklo velké množství problematik, spojených s hydrostatikou, hydrodynamikou, dálkovým řízením, pohony atp. Projekt miniponorka proto nabídl již v zárodku řadu problematik a témat vhodných pro diplomové práce i projekty. Z počátku na ponorce pracovali tři studenti, kteří provedli studie o problematikách ponorek a zhotovili elektronické i konstrukční návrhy. V lednu roku 2011 vznikl korpus ponorky, který byl osazen předním kokpitem a pohonnými jednotkami. Následně byla v ponorce rozmístěna elektronika a ostatní komponenty. Na jaře 2011 byla ponorka vybavena prototypy elektronické výbavy a proběhly první úspěšné testy i ponory. Od této doby prošla výbava ponorky řadou vylepšení. Nejzásadnější bylo uspořádání veškeré vnitřní elektroniky, které vneslo do ponorky určitý standard a řád oproti původnímu prototypu, který připomínal „kabelový zmatek“. Dále byla nahrazena řídicí karta K8055 řídicí deskou s mikroprocesorem Picaxe. Aktuální stav průzkumné miniponorky je zaznamenán na obrázku (Obr. 1) a (Obr. 2).

Ponorku lze segmentovat na několik samostatných systémů. Systém pohonný je reprezentován pomocí dvou stejnosměrných pomaloběžných motorů, demontovaných ze stahování okének z automobilu Peugeot. Motory jsou umístěny ve dvou podélných trubkách a pomocí kombinací jejich spínání lze s ponorkou vykonávat pohyb vpřed,

vzad, zatáčet nebo se otáčet na místě. Oba motory jsou osazeny těsněním a tak mohou být přímo ponořeny ve vodě. Vrtule jsou použity z procesorového chladiče Intel.

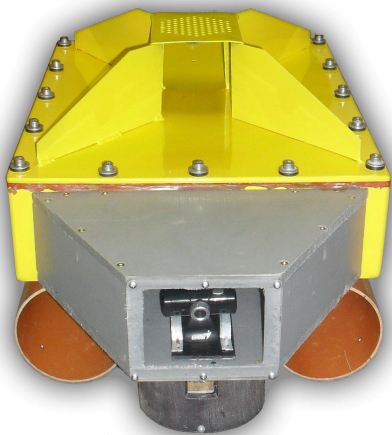
System vyvažování je realizován pomocí jedné balastní komory a čerpadla. Tento systém se v praxi osvědčil, ale jeho omezené vlastnosti vytvořili požadavek na jeho inovaci.

Kamerový systém je představován digitální webkamerou Creative Live! Cam Connect HD. Kamera dokáže pořizovat video v rozlišení 1280 x 720 pixelů při třiceti snímcích za sekundu. Objektiv kamery je vybaven automatickým ostřením. Kamera je umístěna v kokpitu ponorky za čirým plexisklem. Umožňuje tak uživateli pozorování podvodní hladiny.

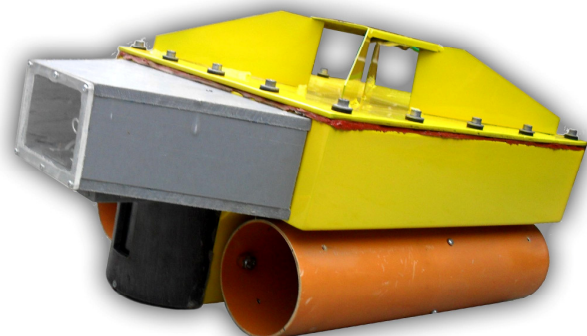
Pro osvětlení scény je použit systém osvětlení, který je tvořen 36 bílými led diodami o průměru 5 mm.

Srdcem celé ponorky je řídicí notebook, umístěný přímo v trupu ponorky. Tento notebook je spojen pomocí ethernetového kabelu s ovládacím notebookem, který má k dispozici uživatel na souši. Povel od uživatele je tedy vyslán z ovládacího notebooku do řídicího notebooku v ponorce, který následně povel zpracuje a pomocí výkonových D/A převodníků přímo ovládá akční členy, kterými jsou pohonné jednotky, čerpadlo a světlomety.

System napájení je tvořen dvěma olověnými akumulátory o napětí 12 V a kapacitě 7,2 Ah, což představuje pro ponorku dostatečný zdroj energie na dobu cca 1 h provozu. [1]



Obr. 1: Ponorka - pohled na před [1]



Obr. 2: Ponorka – pohled z boku [1]

2.2 Výběr vhodného systému vyvažování

V první kapitole byly podrobněji srovnány možnosti vyvažování ponorky a s nimi spojené výhody a nevýhody. Jako nejvhodnější varianta pro náhradu současněho jednokomorového systému vychází dynamický vícekomorový systém. Vzhledem ke konstrukční nenáročnosti a omezení v podobě velikosti vnitřních prostor ponorky bude zvolen dvoukomorový systém vyvažování. Oproti původnímu systému získáme výhodu v podobě možnosti podélného náklonu ponorky.

Nevýhodou původního systému byla také skutečnost, že komora byla hermeticky uzavřena a při napouštění vodou docházelo ke stlačování vzduchu v komoře. Díky tomu nebylo možné využít celou kapacitu komory, ale cca 50 % objemu. Při překročení této úrovně by hrozil vysoký přetlak, který by mohl komoru roztrhnout.

Nový dvoukomorový systém bude fungovat odlišně. Při napouštění komor se bude stlačovat vzduch v celé ponorce, což přináší určité výhody i nevýhody. Pro stlačování vzduchu v celé ponorce budou obě komory vybaveny vzduchovou průchodkou, pomocí které bude vytlačovaný vzduch unikat do prostoru ponorky. Tím však nastává riziko, kdy by se touto cestou mohla dostat do trupu ponorky voda. Je nutné počítat s touto hrozbou při návrhu balastních komor. Naproti tomu toto stlačování vzduchu v celé ponorce přinese hned dvě výhody. První výhodou je možnost naplnění obou balastních komor na cca 90% objemu právě díky stlačování většího objemu vzduchu. Druhou výhodou je samotné zvýšení tlaku, které poslouží jako opora uvnitř ponorky, působící proti hydrostatickému tlaku na trup. Tím dojde ke snížení tlakové difference při ponoru. Teoreticky by došlo ke zvýšení maximální dosažitelné hloubky ponoru.

Balastní komory bude vhodné rozmístit v podélném směru ponorky co nejdále od osy těžiště. V ideálním případě by jejich vzdálenost od osy měla být stejná. Tím bude docíleno stejných přírůstků náklonu v obou směrech rotace při napouštění jednotlivých balastních komor. Při současném rovnoměrném napouštění komor pak zachováme konstantní náklon resp. vodorovný stav. [2]

2.3 Detekce náklonu

Nový systém vyvažování bude dále vybaven zpětnou vazbou, která bude poskytovat informaci o aktuální hodnotě podélném náklonu ponorky. Díky tomu získá uživatel informace o náklonu i pod vodní hladinou, kdy už není možné náklon odhadnout pohledem. Dále bude možné díky zpětné vazbě systém regulovat. Uživatel bude mít možnost zadat úhel náklonu v realizovatelném rozsahu a regulátor se postará o jeho dosažení. Jako detektor lze použít akcelerometr nebo gyroskop.

Akcelerometr je zařízení, které měří sílu, působící na senzor akcelerometru. Síla je úměrná zrychlení, působící na senzor dle vztahu (1). Lze s ním tedy měřit i gravitační zrychlení, které lze následně přepočítat pomocí goniometrických funkcí na náklon v prostoru. Naproti tomu gyroskop je zařízení, které měří rychlost rotace senzoru. Pro zjištění náklonu z tohoto senzoru je nutné hodnotu derivovat. Výpočet derivace a zaokrouhlování v každém vzorkovacím kroku vede ke kumulující se chybě. Z tohoto důvodu je gyroskop méně vhodný pro měření gravitačního zrychlení. Obecně má však lepší odolnost proti lineárním šumům resp. mechanickým vibracím. Cenově jsou gyroskopy i několikanásobně dražší než akcelerometry.

Z výše uvedeného vychází jako vhodný detektor náklonu akcelerometr. [3]

$$F = m * a \tag{1}$$

2.4 Měření výšky hladiny v balastních komorách

V praxi se ukázalo, že neznalost alespoň přibližné hodnoty výšky hladiny v komoře může vést k problémům. Pokud se jedná o čerpání, je nutné nepřekročit určitou kritickou mez, jejíž překročení může vést k roztržení u hermeticky uzavřené komory popř. k zatopení u otevřené komory. U vypouštění může neznalost výšky hladiny vést k situaci, kdy v komoře dojde voda a začne se odčerpávat vzduch. Tím vznikne v komoře podtlak, který po vypnutí odčerpávání natáhne zpět do komory vodu. Tento nežádoucí jev může vést až k situaci, kdy už není možné vodu z komory odčerpat a není možné vynoření ponorky.

Aby se u nového dvoukomorového systému těmto problémům předešlo, je nezbytné měřit výšku hladiny v obou balastních komorách.

2.4.1 Principy měření výšky hladiny

Problematice měření výšky hladiny v balastní komoře byla věnována pozornost v Projektu miniponorka – možnosti statického a dynamického dovažování, na který navazuje tato diplomová práce. Existuje řada metod pro měření výšek hladin. V tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny nejpoužívanější snímače hladiny. Jednotlivé metody snímání mají své výhody i nevýhody a je nutné uvážit, kterou v jakém případě použít. [4]

Tab. 1: Druhy snímačů hladiny

mechanické	plovákové
hydrostatické	tlakové
	hmotnostní
elektrické	vodivostní
	kapacitní
	fotoelektrické
fyzikální	ultrazvukové
	radarové

Měření výšky pomocí ultrazvuku není vhodné pro aplikaci v úzkých nádobách, kdy se ultrazvukové vlny odrážejí nežádoucím způsobem od stěn. Navíc při aplikaci v balastní komoře a náklonu hladiny kapaliny dojde k odrazu ultrazvukové vlny pod úhlem a tím k dalšímu zkreslení. Obdobný problém nastává u radarových snímačů, které jsou analogií ultrazvukových s rozdílem, že pracují s vyššími frekvencemi vln.

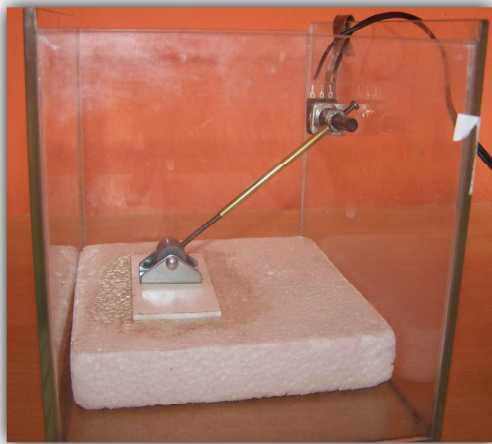
Tlakové snímače měří hydrostatický tlak u dna nádoby, který je přímo úměrný výšce hladiny. Nevýhodou je požadavek na nutnost měření malých tlaků resp. požadavek na vysokou citlivost čidla, která se projeví nežádoucím způsobem při vibracích od pohonů popř. čerpadel. Obdobný problém nastane u hmotnostního čidla, které by mohl představovat např. tenzometr, umístěný pod komorou. Umístění čidla mimo komoru představuje problém v podobě nedostatku místa v trupu ponorky.

Kapacitní čidlo využívá jako dielektrikum napouštěnou vodu. Kapacita je závislá na vodivosti dielektrika, která není ve všech vodních plochách stejná.

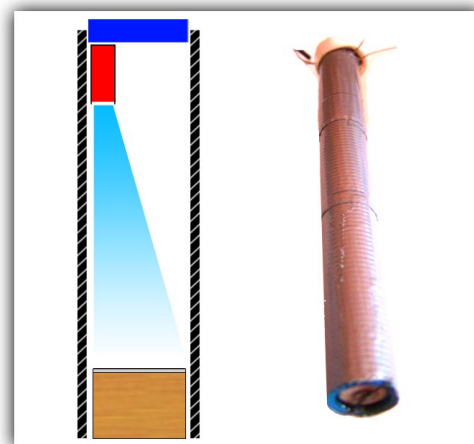
Jako první bylo v Projektu miniponorka testováno potenciometrické plovákové čidlo (Obr. 3). Šlo o plovák, spojený teleskopickou tyčkou a kloubovým spojením

s potenciometrem, čímž byl převeden vertikální pohyb plováku na rotační pohyb potenciometru. Čidlo vykazovalo téměř lineární charakter závislosti odporu na výšce hladiny. Při reálné aplikaci by však plovák musel být menší, aby bylo možné do komory nainstalovat vlnolamy. Následně by bylo nutné k plováku nainstalovat vodící tyče, pomocí kterých by se plovák mohl pohybovat pouze po vertikální ose. Potenciometr musí být při tomto principu přítomen přímo v balastní komoře. Díky tomu vzniká riziko zaplavení potenciometru. Eventuelně by jeho funkci mohla ovlivnit vlhkost v komoře. Z těchto důvodů byl tento princip zvolen jako nevhodný pro aplikaci v miniponorce.

Z fotoelektrických čidel byl v Projektu miniponorka testován prototyp optického čidla s netradičním principem snímání výšky hladiny (Obr. 4). Čidlo je tvořeno plastovou trubicí, v níž se pohybuje korkový plováček s reflexní fólií. V horní části čidla je umístěna bílá LED dioda 5 mm, která slouží jako zdroj světla. Je odstíněna tak, aby svítila pouze svisle dolů na plováček, od kterého se světlo odráží svisle nahoru a jeho intenzita je vyhodnocována fotoodporem. Závislost odporu na výšce hladiny vykazovala nelineární charakter. V několika případech testování plováček zůstal přilepený v trubici. Optická metoda v tomto konstrukčním provedení byla nespolehlivá a pro aplikaci v miniponorce nepoužitelná. [5]



Obr. 3: Potenciometrické plovákové čidlo [5]



Obr. 4: Optické čidlo [5]



2.4.2 Výběr vhodného principu detekce hladiny

V předchozí kapitole byly porovnány výhody a nevýhody nejznámějších metod měření výšky hladiny. Každá ze zmíněných metod nesla určité nevýhody. Díky fatálním následkům, které mohou nastat při špatné detekci výšky hladiny v komorách je očekávána od čidla stoprocentní spolehlivost a robustnost.

Byl použit dosud nezmiňovaný princip měření výšky hladiny, založený na vodivosti kapaliny. Na vodu lze nahlížet jako na elektrický odpor, který lze využít pro detekci hladiny v určité výšce. Tento princip se v praxi užívá např. jako detekce maximální výšky hladiny v nádrži.

Pro správnou funkci této metody je nezbytná dostatečná vodivost kapaliny. Proto byl proveden test vodivosti v několika vodních plochách. Bylo zjištěno, že odpor vody se pohybuje v hodnotách do 0,7 MΩ.

Jak už bylo řečeno, spojitě měření výšky v komorách není podmínkou. Důležitou hodnotou je minimální a maximální výška hladiny. Čidlo bude obsahovat šest detekčních stavů. Dvě hodnoty budou informovat o maximu a minimu výšky hladiny. Zbylé čtyři stavy nejsou nutné, ale poslouží uživateli k orientační představě o výšce hladin v komorách.

3 Realizace systému vyvažování

Nová koncepce systému vyvažování bude konstrukčně uzpůsobena tak, aby jí bylo možné umístit do průzkumné miniponorky. Elektronika systému vyvažování bude vytvářena takovým způsobem, aby nepředstavoval riziko pro ostatní elektroniku ponorky. V úvahu bude bráno také omezení v podobě nedostatku volného prostoru uvnitř korpusu ponorky.

3.1 Čidlo výšky hladiny

3.1.1 Konstrukční provedení

Tělo čidla je tvořeno hliníkovou trubicí o vnějším průměru 8 mm a tloušťce stěny 1 mm. Celková délka čidla je 135 mm a vychází z konstrukčních rozměrů balastních komor, které budou popsány v jedné z následujících kapitol.

AL trubice sloužit jako zemnicí elektroda. V horní části je trubice opatřena závitem M8, který poslouží pro upevnění čidla do balastní komory. V trubici byly vytvořeny otvory s rozstupem 22 mm, do kterých byly umístěny stavové elektrody, tvořené pozinkovanými šroubky o průměru 2 mm a délce 4 mm. K hlavičkám šroubů byly připájeny vodiče, které bylo nutné táhnout ven z čidla jedním směrem. Na šroubky byla natočena červená bužířka, která sloužící jako izolace stavových elektrod od zemní elektrody a zároveň zajišťuje vystředění. Stavové elektrody byly upevněny použitím kombinace vteřinového a tavného lepidla.

V praxi by funkce čidla měla být taková, že voda svým odporem spojí jednotlivé stavové elektrody se zemní elektrodou. Při testování čidla byl zjištěn zásadní nedostatek v podobě spojení stavové a zemní elektrody i bez přítomnosti vodní hladiny. Tato situace nastala především při snižující se výšce hladiny, kdy na stavové elektrodě zůstala kapka vody a způsobila tak propojení se zemní elektrodou. Tento problém byl vyřešen izolačním nátěrem. Celé čidlo bylo natřeno vrstvou emailové barvy Hammerite. Pouze konce stavových elektrod byly ponechány bez nátěru. Zemní elektrodu bylo nutno také opatřit místem pro kontakt s vodou. Na spodní hraně trubice bylo ponecháno malé místo bez nátěru. Konstrukční provedení čidla před a po nátěru je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 5).



Obr. 5: Čidlo výšky hladiny

3.1.2 Princip vyhodnocení stavů

Detekce stavu hladiny vychází ze schématu na obrázku (Obr. 6). Základem vyhodnocení je hradlo NOT resp. invertor. Na vstupu invertoru je napěťový dělič, tvořený pevně daným rezistorem R_1 a rezistorem R_2 , který reprezentuje odpor vody.

Pokud není přítomna voda, je hodnota odporu R_2 nekonečno a napětí U_{out} odpovídá hodnotě vstupního napětí. Na výstupu invertoru se objeví logická úroveň L.

V případě přítomnosti vody napětí U_{out} odpovídá hodnotě dle vztahu (2) pro výpočet napětí na děliči.

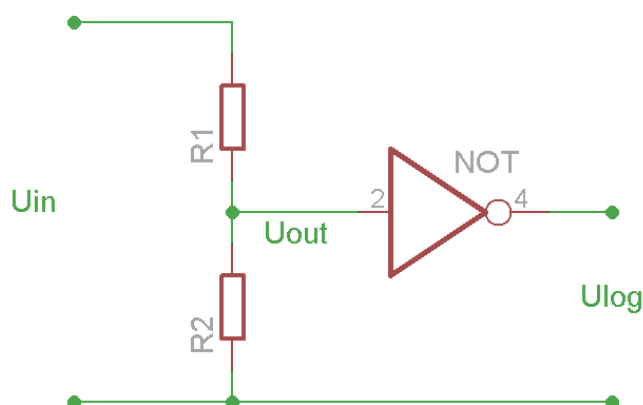
Pro správnou funkci obvodu je nutné vhodně zvolit hodnotu odporu R_1 . Vyjádřením R_1 z rovnice pro dělič napětí lze vypočítat jeho minimální hodnotu. Známa hodnota je napájecí napětí, které bylo v celém systému vyvažování zvoleno 3,3 V. Pro překlopení hradla do logické úrovně H je nutné, aby napětí U_{out} odpovídalo logické úrovni L. Této úrovni odpovídá standardně napětí 0,8 V. Pro použitý invertor byla naměřena hodnota překlopení z L do H 1,5 V. Jako maximální hodnota odporu vody, se kterou se lze při reálném nasazení ponorky setkat, byla zjištěna hodnota 700 k Ω . Pro tyto mezní hodnoty byla dle vztahu (3) vypočtena minimální hodnota odporu R_{1min} 840 k Ω . Maximální hodnota R_{1max} je vypočtena dle vztahu (4). Hodnota je limitována minimálním vstupním proudem do hradla, jehož hodnota musí dle datasheetu dosáhnout alespoň hodnoty 1 μ A. Horní hranice hodnoty odporu R_1 je tedy 3,3 M Ω .

Ze zjištěných limitací byl zvolen odpor R_1 s hodnotou 2 M Ω . [6]

$$U_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} * U_{in} \quad (2)$$

$$R1_{min} = R2 * \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} - 1 \right) = 700 * \left(\frac{3.3}{1.5} - 1 \right) = 840 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$R1_{max} = \frac{U_{in}}{I_{min}} = \frac{3.3}{1 * 10^{-6}} = 3.3 \text{ M}\Omega \quad (4)$$



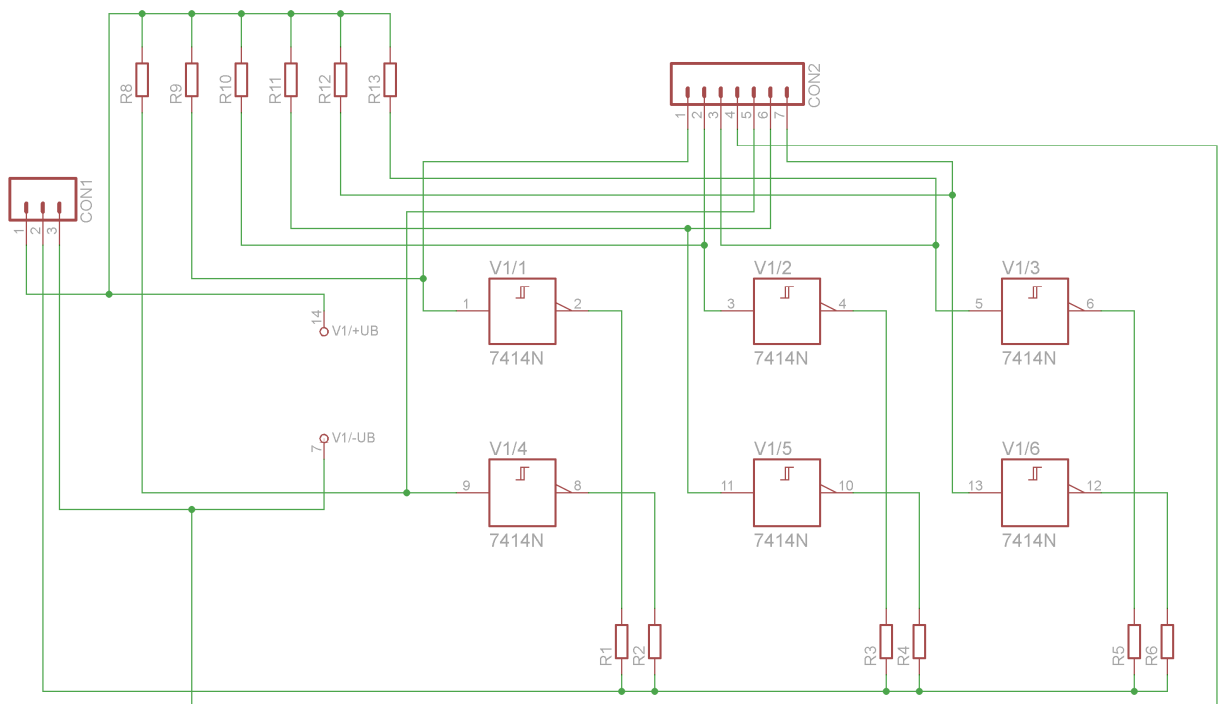
Obr. 6: Detekce stavu hladiny – vstupní invertorová část

3.1.3 Dekódování stavu čidla

Pro pohodlné určení výšky hladiny z šesti stavů čidla bylo nutné navrhnout ke každému čidlu příslušný DPS resp. stavový dekodér, který zajistí převedení výšky hladiny na elektrický signál. Stavový dekodér by měl obsahovat sedm vstupů z čidla (šest stavů a zem) a co možná nejmenší počet výstupů z důvodu snížení nároků na kabeláž. Dále by bylo neekonomická vyhodnocovat u čidla každý stav zvlášť, protože obě čidla by tak zabrala velké množství pinů u vyhodnocujícího mikroprocesoru.

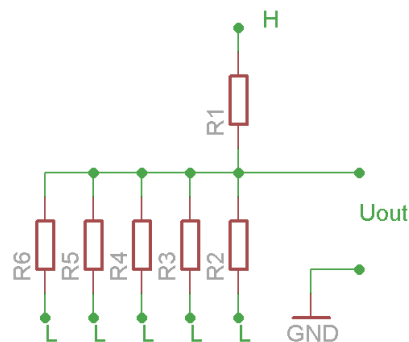
Schéma vyhodnocovací elektroniky je na obrázku (Obr. 7). Základem dekodovací elektroniky je integrovaný obvod SN74HC14. Jedná se obvod s šesti Schmittovými invertory. Každému invertoru přísluší jedna stavová elektroda. Popis zapojení vstupních částí invertorů je řešen v předchozí kapitole.

Odpory R8 až R13 mají hodnotu 1 M Ω a odpovídají tak pozici a hodnotě odporu R1 dle obrázku (Obr. 6). Konektor CON2 slouží pro připojení čidla.



Obr. 7: Stavový dekodér – schéma zapojení

Pro vyhodnocení stavů všech elektrod byly jednotlivé výstupy invertorů připojeny přes rezistory R1 až R6 do společného uzlu. Díky takovému spojení je možné vyhodnocovat všechny stavy na základě měření napětí v tomto společném uzlu. Při překlopení výstupu kteréhokoli hradla dojde k vytvoření děliče napětí. Princip funkce lze pochopit uvedením několika případů, které mohou nastat. Ve výchozím stavu, kdy není přítomna hladina u žádné stavové elektrody resp. kdy je na všech vstupech hradel logická H, je na všech výstupech logická L. Napětí na společné elektrodě bude v takovém případě 0 V. Pokud dojde k zaplavení jedné elektrody, dojde na výstupu jednoho hradla k překlopení do logické úrovně H a příslušný odpor se dostává do pozice horního odporu R1 v děliči napětí viz následující obrázek (Obr. 8).



Obr. 8: Dělič napětí - výstupní invertorová část obvodu

Pokud bychom uvažovali stejné hodnoty všech odporů, bude výstupní napětí U_{out} jedna šestina napájecího napětí. Pokud budou zaplaveny všechny elektrody, bude napětí U_{out} rovno napájecímu. V případě zvolení stejných hodnot odporů dojde k identickým přírůstkům napětí od jednotlivých elektrod, čímž nebude možné detekovat případné chyby čidla. Tento problém lze odstranit vhodnou volbou odporů.

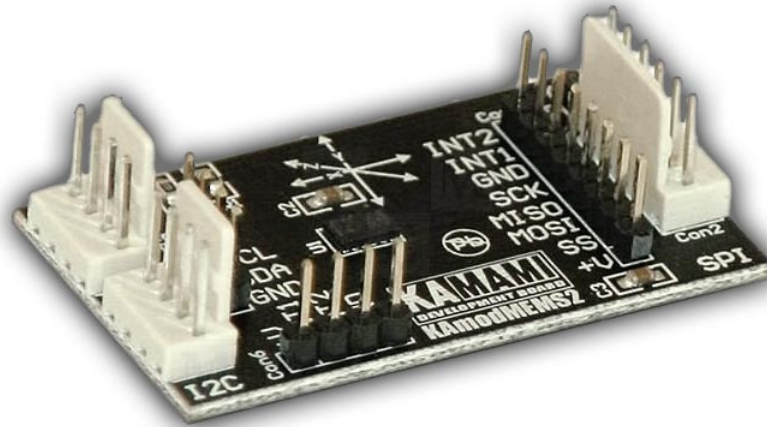
Bylo zjištěno, že volbou odporů ve smyslu dvojnásobení předchozí hodnoty je možné odlišit přírůstky napětí jednotlivých stavových elektrod. Volba odporů je uvedena v následující tabulce (Tab. 2). Z tabulky je patrné, že přírůstky jsou díky této volbě odporů také ve smyslu dvojnásobku předchozí hodnoty. Lze říci, že váhy jednotlivých přírůstků napětí odpovídají vahám bitů dvojkové soustavy. Pokud je napětí na společné elektrodě vyhodnocováno pomocí A/D převodníku, jsou stavy jednotlivých elektrod dekódovány do šestibitového slova.

Tab. 2: Přírůstky napětí stavových elektrod a volba odporů

Elektroda	Návrh odporu	Reálná hodnota E24	Přírůstek napětí při pozici R1
1	10 k Ω	10 k Ω	0,054 V
2	20 k Ω	20 k Ω	0,108 V
3	40 k Ω	39 k Ω	0,205 V
4	80 k Ω	82 k Ω	0,431 V
5	160 k Ω	160 k Ω	0,835 V
6	320 k Ω	330 k Ω	1,665 V

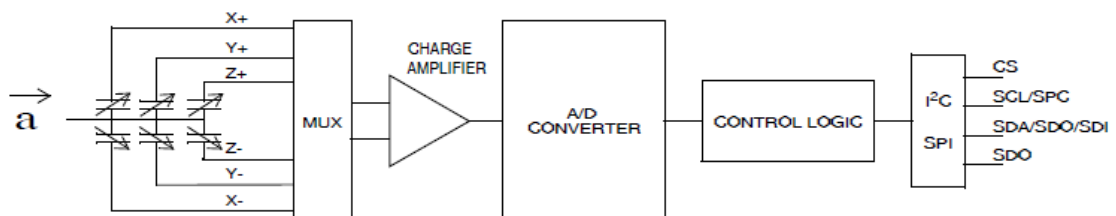
3.2 Detekce náklonu ponorky

V návrhu detekce náklonu byl zvolen jako detektor náklonu akcelerometr. Byl zvolen konkrétní modul KAmoMEMS2 (Obr. 9). Jedná se o modul tříosého akcelerometru ze stavebnice KAmo od firmy KAMAMI, vybaveného senzorem LIS35DE. Jde o kapacitní senzor zrychlení, pracující jako proměnný kondenzátor. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná, druhá je pohyblivá. Pokud na pohyblivou elektrodu působí zrychlení, začne se přibližovat resp. oddalovat od druhé elektrody a dojde ke změně kapacity. Pro tři osy jsou potřebné tři kondenzátory. [7]



Obr. 9: Akcelerometr KAmoMEMS2 [7]

Princip vyhodnocení je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 10). Kapacity jednotlivých os jsou převedeny blokem CHARGE AMPLIFIRE na napětí. Toto napětí je pomocí A/D převodníku dekodováno do osmibitového registru. Přístup k těmto registrům resp. komunikaci zajišťuje blok CONTROL LOGIC.



Obr. 10: Blokové schéma vyhodnocovací elektroniky akcelerometru [8]

3.2.1 Parametry senzoru

Pro komunikaci je modul vybaven digitálními rozhraními SPI a I2C. Z datasheetu senzoru LIS35DE bylo zjištěno, že volbu komunikace může uživatel ovlivnit přivedením napájecího napětí resp. GND na pin číslo 7.

Vlastní spotřeba senzoru dosahuje velmi ekonomické hodnoty do 1 mW. Senzor může pracovat s napájecím napětím v rozmezí 2,16 V až 3,6 V. Bylo zvoleno běžně používané napájecí napětí 3,3 V. Toto napětí je použito v celém systému vyvažování mimo výkonových částí.

LIS35DE nabízí uživateli dva citlivostní rozsahy. Je možné zvolit hodnotu ± 2 G nebo ± 8 G. Vhodnější citlivost je ± 2 G, protože náklon ponorky bude počítán z gravitačního zrychlení, které odpovídá hodnotě 1 G.

Senzor je vybaven několika vestavěnými frekvenčními propustmi a umožňuje dále několik nadstandardních funkcí jako je detekce kliknutí, popř. dvojkliku. Celkově se jedná o finančně dostupný akcelerometr s širokou škálou výhod a funkcí. [8]

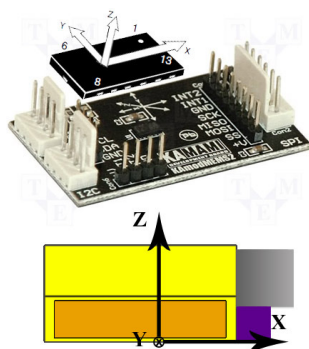
3.2.2 Výpočet náklonu

Na obrázku (Obr. 11) je znázorněna orientace os akcelerometru. Akcelerometr bude umístěn v ponorce tak, aby jeho osy byly orientovány právě dle tohoto obrázku.

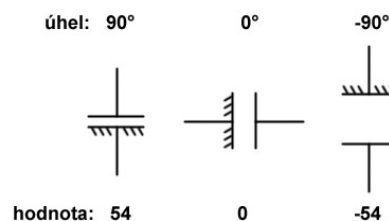
Budou uvažovány dva náklony ponorky. Jako hlavní a nejdůležitější z pohledu vyvažování je podélný náklon. Ve vodorovném stavu bude podélný náklon nula. Ve směru hodinových ručiček bude podélný náklon narůstat se zápornou hodnotou. Dále bude určován příčný náklon. Uživatel tak získá přehled o orientaci ponorky v prostoru.

Akcelerometr poskytuje tři osmibitové hodnoty, kde každá přísluší jedné ose. Podélný náklon je možné určit ze znalosti hodnoty X. Hodnota X se při zvoleném umístění mění pouze s podélným náklonem ponorky a příčný náklon tuto hodnotu neovlivní.

Dle zvoleného rozsahu ± 2 G by teoretická maximální hodnota z jedné osy při zatížení ± 1 G měla dosahovat hodnoty 127. Při reálném testu se ukázalo, že akcelerometr při hodnotě 1 G dává hodnotu 108. Bylo zvoleno přeškolení viz obrázek (Obr. 12), kdy hodnota 0 představuje úhel 0° , hodnota 54 představuje úhel 90° a hodnota -54 úhel -90° .



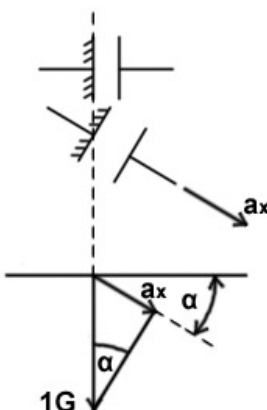
Obr. 11: Orientace os



Obr. 12: Přeškolení hodnot

Pro výpočet podélného náklonu bude uvažována situace dle následujícího obrázku (Obr. 13). Kondenzátor ve směru osy X byl natočen o úhel α . Je známa hodnota gravitačního zrychlení $1G$, která je dle akcelerometru hodnotou 54. Dále je známo zrychlení a_x , odpovídající výstupní hodnotě X akcelerometru, které působí na senzor ve směru náklonu pod úhlem α . Dle vztahu (5) je nyní možné určit podélný náklon ponorky.

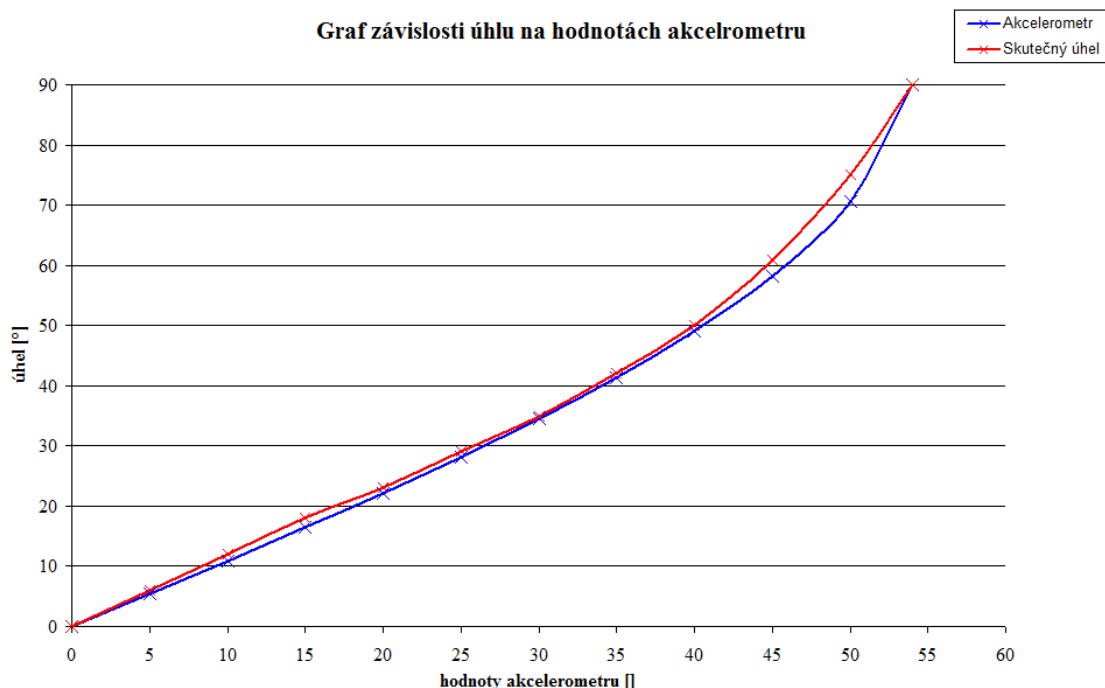
Příčný náklon ponorky je počítán stejným způsobem. K jeho výpočtu však slouží hodnota z osy Y.



Obr. 13: Modelová situace pro výpočet úhlu natočení

Hodnoty X a Y nám dovolí zjistit příslušné náklony pouze v rozmezí $\pm 90^\circ$. Pokud bychom např. překročili natočení 90° , došlo by místo zvyšování úhlu k jeho zpětnému snižování. Tento defekt je kompenzován pomocí hodnoty z osy Z. Hodnota Z je využita jako rozhodovací informace, zda jsme v rozmezí $\pm 90^\circ$ „přirozeně“ nebo $\pm 90^\circ$ „vzhůru nohama“.

$$\sin(\alpha) = \frac{X}{54} \rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{X}{54}\right) \quad (5)$$



Graf 1: Závislost úhlu natočení na hodnotách akcelerometru

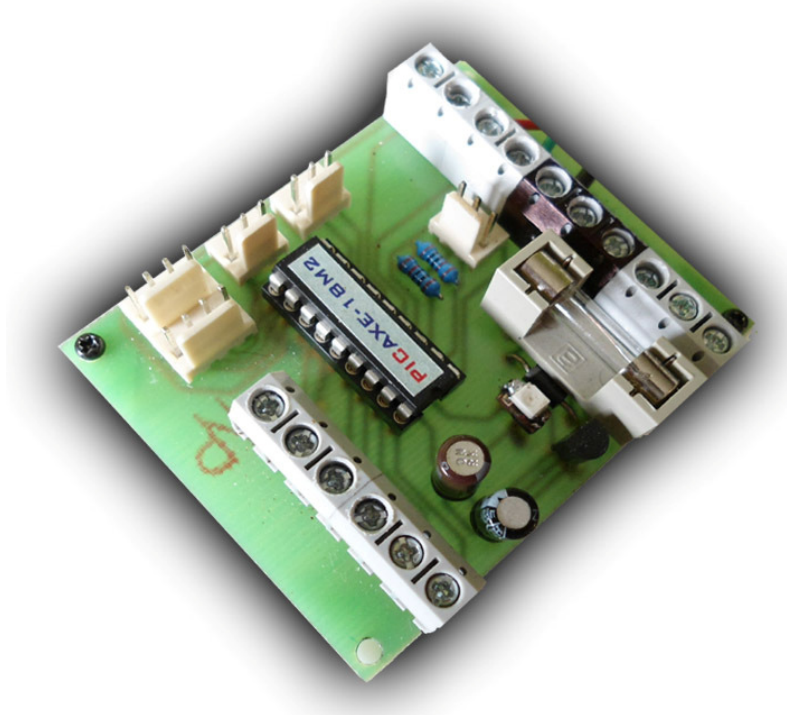
V grafu (Graf 1) je znázorněn vypočtený úhel z hodnot akcelerometru. V tomto případě se jedná o goniometrickou funkci arcsin. Graf porovnává vypočtený úhel z hodnot akcelerometru se skutečným úhlem natočení, který byl měřen úhломěrem a odečítán pozorovatelem. Srovnání ukazuje vysokou shodu vypočtených a reálných hodnot.

Dále lze z grafu pozorovat nevýhodu akcelerometru v podobě relativně nízkého rozlišení, kdy na 90° náklonu připadá pouze 54 hodnot. Je to dáno rozlišením akcelerometru a dále vnitřním A/D převodníkem, který je pouze osmibitový. Při reálné aplikaci akcelerometru v ponorce se však budou úhly náklonu pohybovat v maximálních hodnotách okolo 15°. Na úhel 15° připadá cca 15 hodnot akcelerometru. V tomto pracovním rozsahu je rozlišení akcelerometru jedna hodnota na stupeň.

3.3 I/O řídicí deska

Ovládání systému vyvažování spočívá ve vytvoření aplikace, která bude spuštěna na řídicím notebooku v ponorce. Aplikace bude zobrazovat stav hladin v balastních komorách, aktuální náklon ponorky a umožní uživateli ovládat příslušná čerpadla komor. Aby bylo možné toto realizovat, je nutné poskytnout notebooku resp.

aplikaci informace z čidel výšky hladiny a z akcelerometru. V opačném směru je nutné zajistit ovládání chodu čerpadel. Tuto A/D resp. D/A konverzi zajistí I/O řídicí deska systému vyvažování viz obrázek (Obr. 14).



Obr. 14: I/O řídicí deska

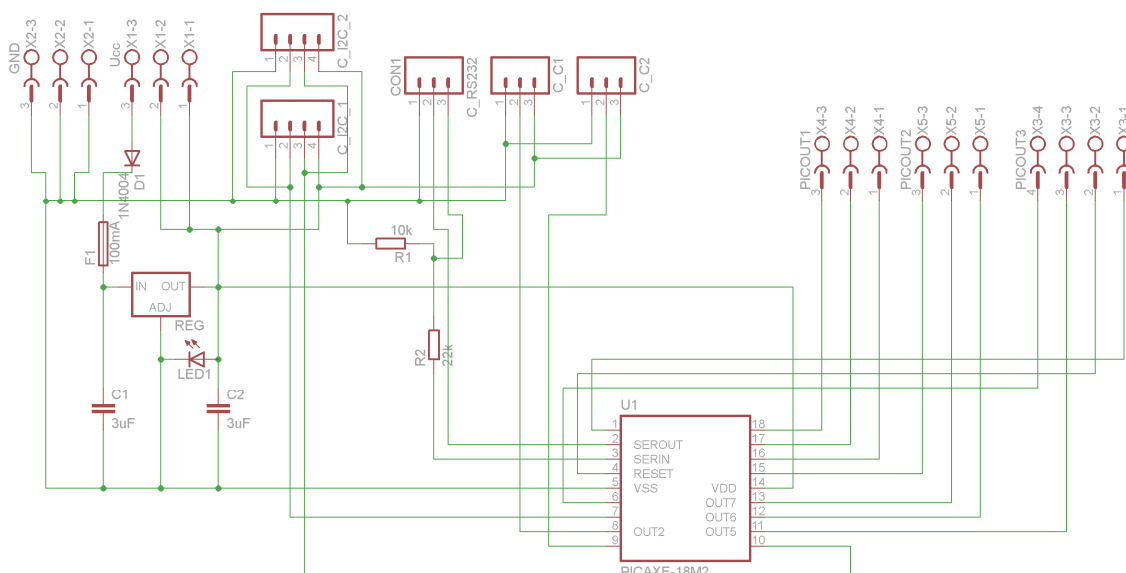
3.3.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení I/O řídicí desky je znázorněno na obrázku (Obr. 15). Základním prvkem obvodu je mikroprocesor PICAXE 18M2. Zjednodušeně lze na obvod pohlížet jako na mikroprocesor s vhodně uspořádanými konektory pro připojení I/O periférií.

Konektor X2 je zem obvodu. Obsahuje 3 piny, kde libovolný z nich slouží k uzemnění obvodu a ostatní dva slouží k případnému rozvětvení GND. Konektor X1 slouží k napájení obvodu. X1-3 je přívodní pin napájení. Je tedy možné zde připojit napájení přímo z akumulátorů ponorky. Dále je napětí stabilizováno REG napěťovým stabilizátorem na hodnotu 3,3 V. Tímto napětím je napájena elektronika obvodu a dále je toto napětí přivedeno na konektory X1-2 a X1-3, což umožní napájení případné další elektroniky v ponorce. Obvod je chráněn proti přepólování diodou D1 typu 1N4004 a proti zkratu pojistkou F1 o zkratovém proudu 100 mA. Konektor C_I2C_1 zajistí připojení akcelerometru. C_I2C_2 umožní připojení případného dalšího I2C zařízení.

Programování mikroprocesoru je realizováno pomocí sériové linky. Tomuto procesu přísluší konektor C_RS232. Konektory C_C1 a C_C2 slouží pro připojení čidel výšky hladiny.

Ze zbylých 10 I/O pinů byly 4 piny využity k ovládání 2 čerpadel resp. výkonového H-můstku a dva piny ke komunikaci I/O desky s řídícím notebookem. [9]



Obr. 15: schéma zapojení I/O řídící desky

3.3.2 Rozhraní I2C a komunikace s akcelerometrem

Akcelerometru a řídící deska byly propojeny pomocí I2C rozhraní. Dále bylo nutné naprogramovat řídící mikroprocesor PICAXE 18M2 pro správnou komunikaci. Bylo použito vývojové prostředí Picaxe programming editor verze 5.5.5 a programovací jazyk PICAXE language. Jde o jazyk, který syntaxí připomíná Pascal a je obohacen o řadu speciálních příkazů, které uživateli usnadňují programování.

Mikroprocesor byl určen pro komunikaci jako master zařízení, akcelerometr jako slave. Programově bylo tohoto nastavení dosaženo pomocí jediného příkazu HI2CSETUP. Tento příkaz má 3 parametry, kde první určuje, že mikroprocesor je master. Ve druhém parametru je nadefinována sedmibitová adresa akcelerometru LIS35_ADR. Osmý bit je automaticky doplňován a určuje, zda se jedná o čtení či zápis. Třetí parametr určuje rychlost I2C komunikace. Lze volit mezi komunikačními frekvencími 100 Hz a 400 Hz. Byla zvolena vyšší přenosová frekvence. Dále bylo nutné akcelerometr nastavit pomocí nastavovacího registru CTRL_REG1. Do tohoto

osmibitového registru s adresou 20H byla nahrána osmibitová hodnota, kde váha každého bitu představuje nastavení určité funkce akcelerometru. Nejvýznamnějšími parametry jsou aktivace akcelerometru, nastavení správné pracovní frekvence, nastavení citlivosti a aktivace jednotlivých os. K nastavení akcelerometru postačil jediný příkaz HI2COUT, kde první parametr určuje adresu registru a druhý nastavovací hodnotu, která je do registru odeslána. Nastavení mikroprocesoru a akcelerometru je provedeno jednou vždy po připojení napájecího napětí.

Hodnoty z jednotlivých os akcelerometru jsou získávány pomocí příkazu HI2CIN. U tohoto příkazu je prvním parametrem adresa registru, ze kterého chceme načíst hodnotu do druhého parametru resp. proměnné v mikroprocesoru. Jsou cyklicky čteny hodnoty ze tří registrů X_REG, Y_REG a Z_REG. [10, 11]

3.3.3 Vyhodnocení výšky hladiny

V kapitole o dekodování stavu čidel bylo blíže popsáno, jakým způsobem jsou vyhodnoceny stavy jednotlivých stavových elektrod. Stav čidla je tedy převeden stavovým dekodérem na jeden napěťový dělič s váhami elektrod ve smyslu dvojkové soustavy.

Napětí na tomto děliči vyhodnocuje mikroprocesor pomocí osmibitového A/D převodníku. Jde o převod výstupu děliče v rozmezí 0 až 3,3 V na osmibitovou hodnotu 0 až 255. Pro převod byl použit příkaz READADC, u kterého je nutné nastavit číslo pinu, ke kterému je připojen výstup stavového dekodéru a dále proměnnou, do které je hodnota po dekodování zapsána.

Díky vhodné volbě odporů z řady E24 ve smyslu dvojnásobku předchozí hodnoty odpovídaly po A/D konverzi hodnoty jednotlivých stavových elektrod váhám jednotlivých bitů konverzované hodnoty. Pro snadné vyhodnocení stavů čidla pak stačilo pracovat s hodnotou jako s binárním číslem. [11]

3.3.4 Ovládání čerpadel

V předchozím jednokomorovém systému vyvažování bylo použito zubové čerpadlo z automobilu Škoda 120. V praxi se velmi osvědčilo a to především díky malé propustnosti v klidovém stavu. Modernějšími čerpadly, fungujícími na stejném principu

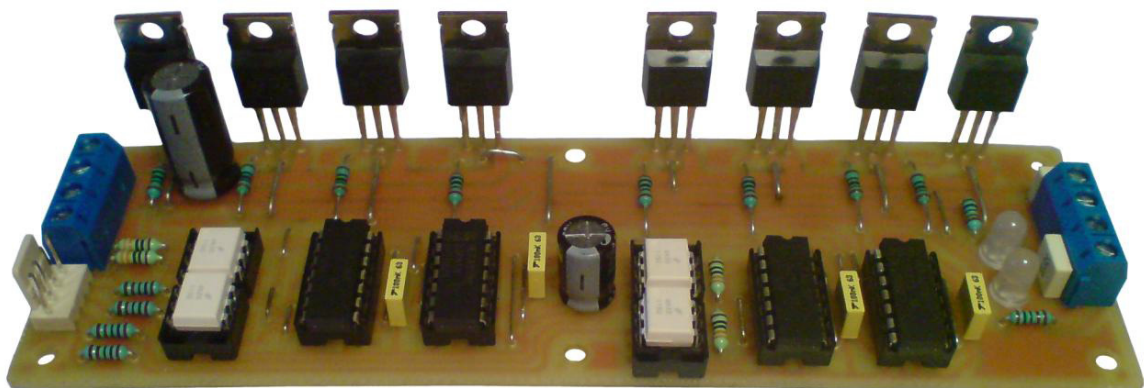
však v klidovém stavu voda téměř protéká a proto jsou osazeny jednocestným ventilem. V systému vyvažování je však požadován obousměrný průtok čerpadlem, a proto bylo pořízeno druhé čerpadlo ze Škody 120.

Problematika ovládní čerpadel byla řešena již v minulosti v bakalářské práci Bc. Jakuba Štěpánka. Byl zhotoven výkonový H-můstek pro ovládní motorů čerpadel viz (Obr. 16). Již při vývoji tohoto můstku se uvažovalo o možnosti využití dvou čerpadel, a proto byl H-můstek zhotoven ve dvoukanálové podobě resp. s možností ovládní dvou čerpadel.

Logická část obvodu je tvořena optočleny 4N35 s možností ovládní napětím 2-18 V. Dále následuje logická část obvodu, která odstraňuje na hardwarové úrovni veškeré hazardní stavy a zajišťuje kombinační logiku ovládní. Pro ovládní každého kanálu postačí dva vstupy, kde prvním je nastaven směr otáčení motorů a druhý má funkci START/STOP resp. ovládní otáček motoru pomocí PWM modulace.

Výkonová část obvodu je tvořena P-kanálovými tranzistory IRF5305 a N-kanálovými tranzistory IRF1010Z. Maximální zatížitelnost tranzistorů je 31 A, což při maximálním odběru čerpadla 12 A postačí s rezervou.

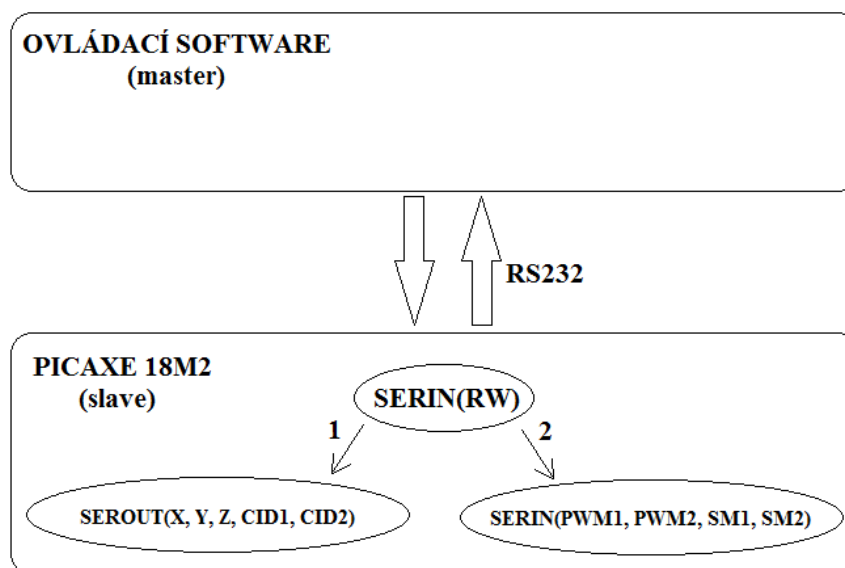
Pro ovládní čerpadel byl H-můstek propojen s I/O řídicí kartou. Pomocí jednoduchého příkazu HIGH resp. LOW jsou ovládní směry motorů čerpadel. Rychlost otáčení je nastavována pomocí příkazu PWMOUT, u kterého byla v obou případech nastavena spínací frekvence 1 kHz. Střída PWM je nastavována pomocí hodnoty v rozmezí 0-255, kde hodnota 255 představuje 100 % střídy a 0 představuje 0 % střídy. [12]



Obr. 16: H-můstek čerpadel [12]

3.3.5 Komunikace s ovládacím softwarem

Princip komunikace mezi mikroprocesorem I/O řídicí desky a ovládacím softwarem resp. řídicím notebookem je naznačen na následujícím obrázku (Obr. 17). Jedná se o jednoduchý protokol dotaz-odpověď. Ovládací software je v pozici mastera a určuje, zda se z jeho pohledu na lince provede čtení nebo zápis hodnot. Mikroprocesor je v pozici slave. Jako první je ovládací aplikací odeslán rozhodovací byte RW s hodnotou 1 nebo 2, na základě kterého mikroprocesor určí, zda má přijímat nebo vysílat data. Pokud ovládací software odešle byte s hodnotou 1, přepne se do režimu čtení a čeká na příchozí data od mikroprocesoru, který po přečtení RW bajtu s hodnotou 1 odešle data masteru. Pokud aplikace odešle bajt s hodnotou 2, mikroprocesor se přepne do režimu zápisu a čeká na příchozí data od mastera. Tyto dva děje se střídavě opakují s periodou časovače 50 ms což znamená, že ovládací software dostává např. informaci z akcelerometru každých 100 ms.



Obr. 17: Schéma komunikace ovládací software – mikroprocesor

3.4 Balastní komory

Dle návrhu byly zkonstruovány dvě balastní komory viz (Obr. 18), splňují předem stanovené požadavky.

Tělo komory je vyrobeno z PSH materiálu. Jedná se o houževnatý polystyrén, nacházející uplatnění v RC modelářství, automobilovém průmyslu atp. Tvar komory byl



stanoven na kvádr o velikostech, vycházejících z konstrukce ponorky. Celkový objem jedné komory činí 1,64 l. V obou komorách bude tedy teoretický příspěvek na váze činit 3,28 kg.

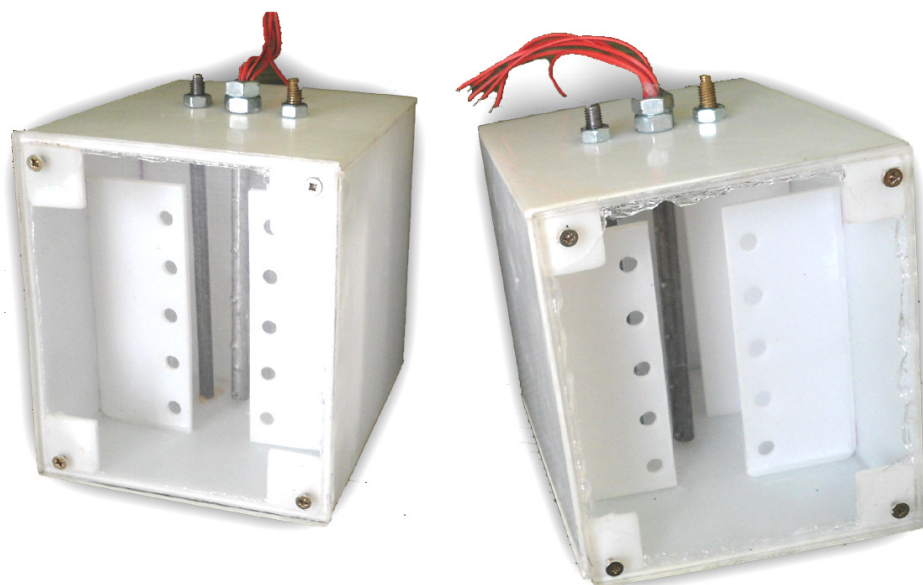
Jednotlivé desky PSH polystyrénu byly slepeny toluenem, který představuje pro polystyrén rozpouštědlo. Tím bylo dosaženo celistvé struktury a vysoké pevnosti. Dále byli do komory vlepeny přepážky, které slouží jako vlnolamy. Tyto přepážky snižují rozbouřenost vodní hladiny a zlepšují její výškovou stabilitu.

Z přední strany jsou komory vybaveny plexisklem. Díky tomu je možné při testování komor pozorovat skutečné množství hladiny a odhalit tak případné nedostatky systému. Vrchní deska komory byla opatřena třemi otvory. Otvory jsou umístěny uprostřed komory v podélného směru. Právě v tomto místě zůstává konstantní výška hladiny i při podélném náklonu ponorky.

V levém otvoru je umístěna napouštěcí trubice, tvořena železnou trubičkou o vnitřním průměru 4 mm a tloušťce stěny 1 mm. Ve vrchní části je trubice opatřena závitem M6. Díky tomu je možné trubici upevnit ke komoře. Dále je díky závitu možné nastavit vzdálenost konce trubice ode dna komory. Tato vzdálenost musí být malá, aby bylo možné z komory vypustit téměř všechnu vodu. Vzdálenost byla experimentálně nastavena u obou komor na 1 mm.

V prostředním otvoru je umístěno čidlo výšky hladiny. Tento otvor je uprostřed komory v podélném i příčném směru. Pokud by došlo i k příčnému náklonu ponorky, výška hladiny bude v tomto místě stále konstantní.

Poslední otvor slouží pro umístění vzduchové průchodky. Ta byla vyrobena z mosazného šroubu M6 o délce 25 mm. Do šroubu byl vyvrtán otvor o průměru 1 mm. Malý otvor poslouží pro únik stlačeného vzduchu, ale zabrání úniku stříkající či rozbouřené vody v komoře.



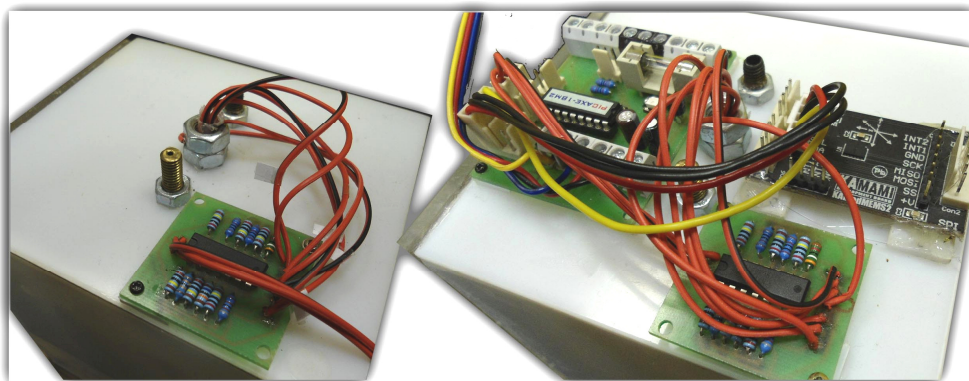
Obr. 18: balastní komory

3.4.1 Umístění elektroniky systému vyvažování

Dosavadní stav volného místa v ponorce byl velmi nepříznivý. V předchozí koncepci se nepočítalo s větším přírůstkem elektroniky. Uvolnění místa pro elektroniku systému vyvažování by obnášelo konstrukční úpravy vnitřních držáku dosavadní elektroniky. Bude nutné najít také vhodné volné místo pro umístění druhého čerpadla.

Z těchto nedostatků bylo rozhodnuto, že elektronika systému vyvažování bude umístěna přímo na horní desce balastních komor viz (Obr. 19). Na obou komorách jsou umístěny příslušné stavové dekodéry čidel. Na jedné z komor je pak umístěn zbytek elektroniky systému vyvažování, který představuje I/O řídicí deska a akcelerometr.

Toto umístění je z pohledu kabeláže nenáročné. Další výhodou je přehlednost a kompaktnost, kdy takovýto systém lze připojit resp. odebrat z ponorky pouze odpojením napájení a datového kabelu.



Obr. 19: Umístění elektroniky systému vyvažování

3.5 Ovládací aplikace

Pro celkové ovládání ponorky byl a je dosud vyvíjen software, jehož vývoj probíhá paralelně s vývojem elektronické výbavy ponorky. Tento software umožňuje ovládat pohonné jednotky, čerpadla, osvětlení a především dokáže zpracovávat digitální obraz z videokamery a odesílat ho na stranu klienta resp. uživateli.

Aby bylo možné systém vyvažování snadněji testovat, byla vytvořena druhá ovládací aplikace, starající se pouze o systém vyvažování. Tato aplikace z počátku poslouží pro testování a odladění nedostatků. V této fázi je tedy ponorka ovládána dvěma nezávislými paralelně spuštěnými aplikacemi. V budoucnu budou ovládací programy sloučeny v jeden.

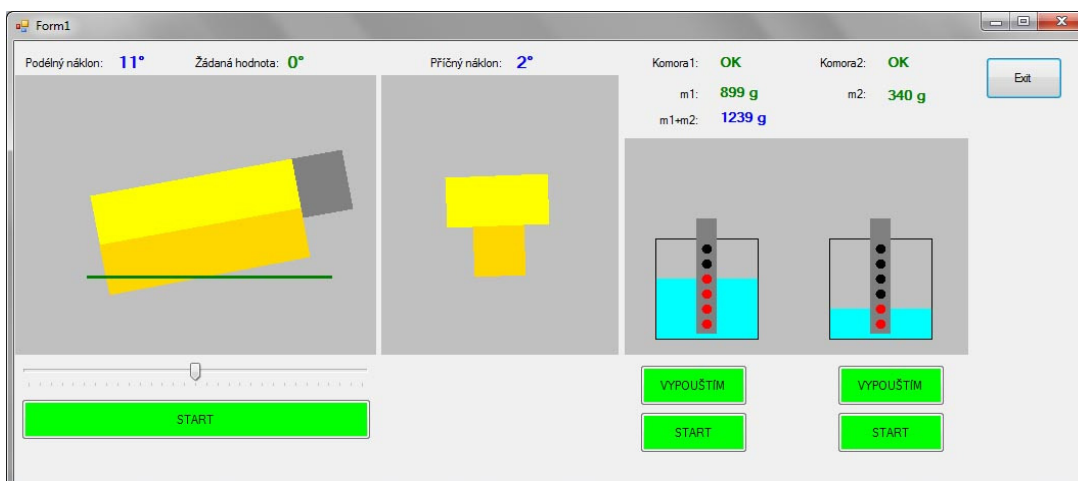
Ovládací aplikace pro systém vyvažování je zobrazena na obrázku (Obr. 20). Aplikace byla napsána v jazyku C#.

V levém poli je graficky znázorněno schéma ponorky, která se pootáčí dle skutečného podélného náklonu ponorky resp. akcelerometru. Nad levým polem je modrou hodnotou vypisován aktuální podélný náklon ponorky. Vedle této hodnoty je vypisována žádaná hodnota náklonu, kterou lze nastavit trackbarem pod levým polem. K regulaci pak slouží velké tlačítko start. Bližšímu popisu regulace je věnována pozornost v kapitola regulace.

V prostředním poli je graficky znázorněn příčný náklon ponorky, jehož hodnota je vypisována nad tímto polem. Příčný náklon má v praxi pouze informační charakter. Může uživateli usnadnit mechanické příčné vyvažování, které se provádí posouváním velkých magnetů po plášti ponorky. Pokud dojde při pohybu pod hladinou

k zásadnějšímu příčnému náklonu, lze tento fakt brát jako varování, které může být způsobeno překážkou nebo dokonce zatopením trupu ponorky.

Pravé pole zobrazuje obě balastní komory, kde každé přísluší šestistavové čidlo. Uživatel získává přehled o přibližné výšce hladiny v komorách, především pak o minimální a maximální hodnotě. Nad polem je zobrazen aktuální status komor. Pokud je vše v pořádku, je uvedena hodnota OK. Při špatné detekci čidla je vypsán stav ERROR. Tento stav nastává v situaci, kdy je jedna ze stavových elektrod aktivní a jakákoli elektroda směrem dolů neaktivní. Dále je nad polem zobrazena přibližná hmotnost vody v jednotlivých komorách a součet těchto hmotností. Pod polem jsou umístěny čtyři tlačítka, určená k ručnímu ovládní jednotlivých čerpadel. U každé komory resp. čerpadla lze zvolit směr čerpání vody a START resp. STOP čerpání. Pro ruční ovládní bylo provedeno ošetření hazardních stavů. Pokud není v komorách žádná voda, nelze aktivovat vypouštění. Pokud jsou komory plné, nelze aktivovat napouštění. Po dosažení maximální či nulové výšky hladiny v komorách jsou čerpadla automaticky deaktivována. V situaci, kdy je z komory odčerpávána voda a je aktivována pouze spodní stavová elektroda (výška hladiny se nachází mezi prvním a druhým stavem), dojde k automatickému snížení rychlosti čerpání z původních 100 % PWM na 70 %. Stejný způsob snížení rychlosti platí při napouštění a aktivaci předposlední stavové elektrody. Toto snížení rychlosti se při testování ukázalo jako nezbytné, neboť odezva čidla není vždy okamžitá. V některých případech nastala odezva v řádech vteřin, což vedlo k vypouštění vzduchu z komor nebo úniku vody z komory vzduchovou průchodkou při přepuštění komory. [13]

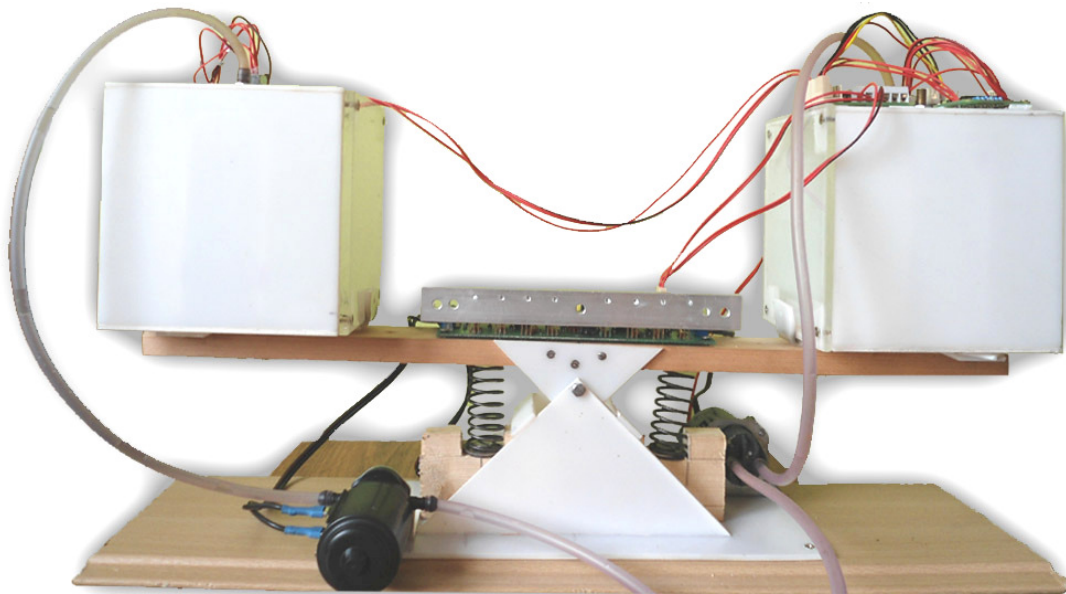


Obr. 20: Ovládací software systému vyvažování

3.6 Testovací model systému vyvažování

Z praktických zkušeností, získaných v minulosti při testování ponorky vyplynul požadavek na vytvoření testovacího modelu pro systém vyvažování ponorky. Pokud bychom při každé změně systému vyvažování dojížděli k vodní ploše a reálně nasazovali ponorku, bylo by odladění systému vyvažování časově i finančně náročné.

Testovací model (Obr. 21) je jakási houpačka, vybavená dvěma stejnými pružinami, které jsou vhodně umístěny tak, že při mezní situaci plná-prázdná komora dojde k maximálnímu podélnému náklonu 22° . Oba konce houpačky jsou opatřeny mechanismem pro upevnění balastních komor. Dále je na houpačce upevněn výkonový H-můstek pro ovládání čerpadel. Čerpadla jsou připevněna k základně testovacího modelu. Model byl zhotoven z kombinace PHS plastu, dřevotřísky a borovicového dřeva.



Obr. 21: Testovací model systému vyvažování

3.7 Regulace

Po dokončení a oživení systému vyvažování má uživatel k dispozici nástroj pro ruční ovládání tohoto systému. V tomto okamžiku je pojem regulace již jen softwarovou záležitostí. Regulace byla provedena ve smyslu podélného náklonu ponorky a byla nejprve testována na testovacím modelu vyvažování. Uživatel zadá požadovaný úhlem náklonu pomocí trackbaru viz (Obr. 20). Tento úhel je graficky znázorněn zelenou

čarou v levém poli. Po aktivaci tlačítka regulace dojde k deaktivaci ručního ovládání a následné automatické regulaci.

Ačkoli systém vyvažování představuje velmi zajímavou úlohu z pohledu regulace, cílem této práce bylo především navrhnout, vytvořit a otestovat kompletní systém vyvažování miniponorky. Proto byla problematika regulace řešena spíše jako okrajová úloha pomocí jednodušších přístupů.

3.7.1 Identifikace systému vyvažování

Regulace byla provedena pro testovací model systému vyvažování. Regulátor byl seřízen pro testovací model a následný reálný test proběhne s tímto seřízením.

Aby bylo možné testovací model regulovat, je nezbytné provést identifikaci, jejímž výstupem by měl být vnější spojitý popis resp. obrazový přenos.

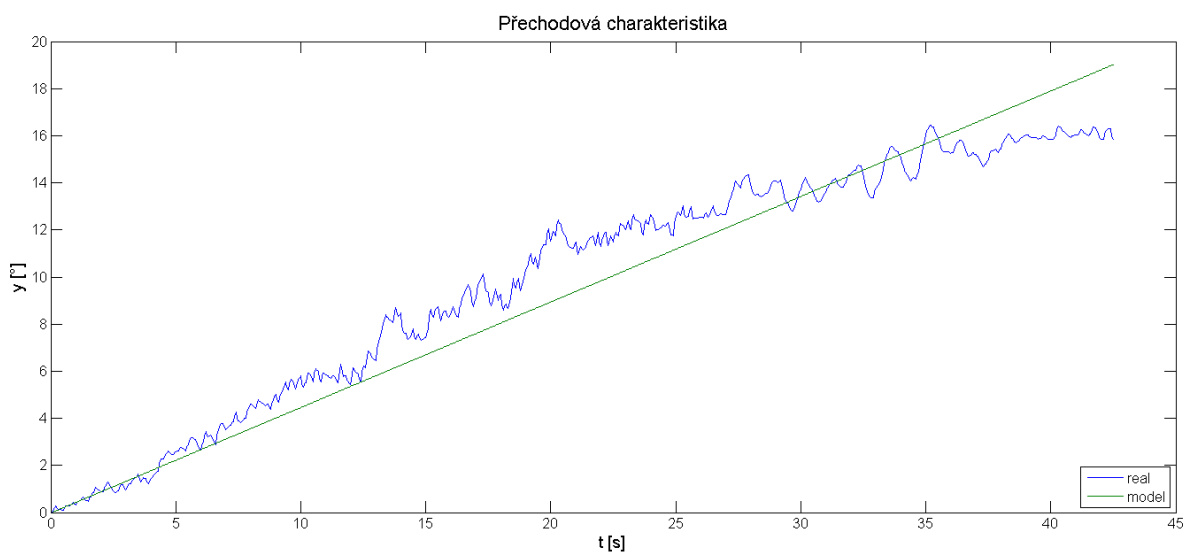
Pro identifikaci byl systém softwarově upraven oproti koncepci ručního ovládání. Bylo rozhodnuto, že při regulaci se bude hladina pohybovat mezi druhou a poslední stavovou elektrodou. Toto rozhodnutí vyplynulo z praktických testů při ručním ovládáním.

Z pohledu regulace se jedná o SISO systém, který má ovšem dva akční členy resp. dvě čerpadla. Aby bylo možné vytvořit dva akční zásahy v SISO systému, je nutná existence vazby mezi těmito zásahy. Byla zvolena inverzní vazba, což v praxi znamená, že pokud jedno čerpadlo napouští určitou rychlostí, bude druhé vypouštět stejnou rychlostí a naopak.

Dále lze u tohoto systému očekávat astatický charakter. Z pohledu výšky hladiny je systém čistě astatický. Pokud jej vybudíme libovolným vstupem resp. PWM, dojde k teoretickému neomezenému nárůstu výšky hladiny. Tento děj je však omezen díky čidlům výšky hladiny. Maximální dosažitelný úhel náklonu modelu je $\pm 22^\circ$ a lze tvrdit, že v tomto rozsahu má systém i z pohledu podélného úhlu náklonu čistě astatický charakter.

Testovací model byl uveden do vodorovného stavu za situace, kdy byly obě komory z poloviny napuštěny. Poté byl systém vybuzen skokem v podobě 70 % PWM. Toto měření bylo provedeno dvakrát v obou směrech náklonu vzhledem k vodorovné poloze. Naměřená data byla zprůměrnována. Výsledný průměr resp. přechodová charakteristika je znázorněna na obrázku (Obr. 22) modrou čarou.

Identifikace byla provedena pomocí Ident Toolboxu v programu Matlab. Při identifikaci byl zohledněn astatický charakter systému a proto byl hledán systém ve tvaru dle rovnice (5). Ustálená data z přechodové charakteristiky byla oříznuta, protože by došlo ke zkreslení sklonu přechodové charakteristiky identifikačního modelu s integračním charakterem. Získaný identifikační model je zapsán v rovnici (5). Dle Ident toolboxu se tento model shoduje s naměřenými daty na 88,6%. Přechodová charakteristika identifikovaného modelu je zobrazena zelenou čarou na obrázku (Obr. 22). [14]



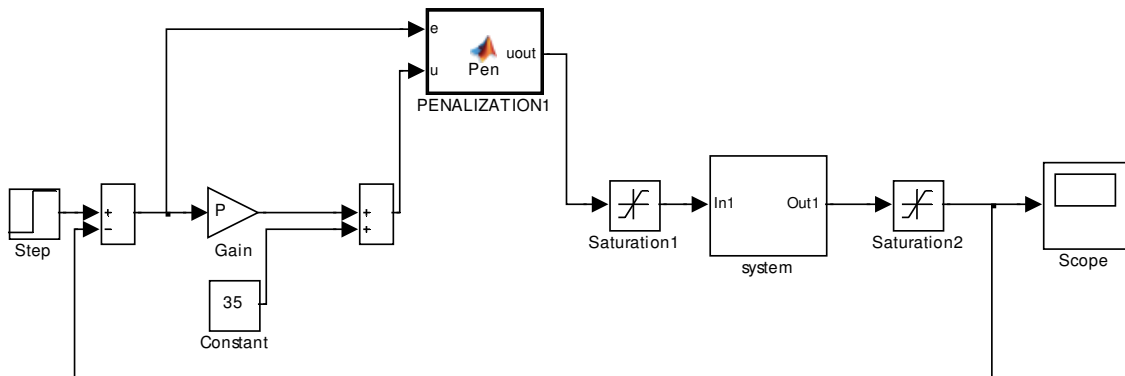
Obr. 22: Přechodová charakteristika testovacího modelu a identifikovaného modelu

$$Gm(s) = \frac{k}{s} = \frac{0,0064}{s} \quad (5)$$

3.7.2 Návrh regulátoru

Regulační obvod je zobrazen na obrázku (Obr. 23). Jedná se o klasické zpětnovazební zapojení, doplněné o určité penalizace a upřesnění. Blok Constant představuje konstantu s hodnotou 36. Tuto konstantu je nutné připočítat k vypočtenému akčnímu zásahu PWM z důvodu nelinearity akčních členů resp. čerpadel. Při hod 36% PWM dojde takřka k zastavení čerpání. Dále bylo stanoveno vzhledem k citlivosti testovacího modelu necitlivé pásmo regulační odchylky s hodnotou $\pm 0,5^\circ$. Pokud se regulační odchylka dostane do tohoto rozmezí, je považována její hodnota za nulovou

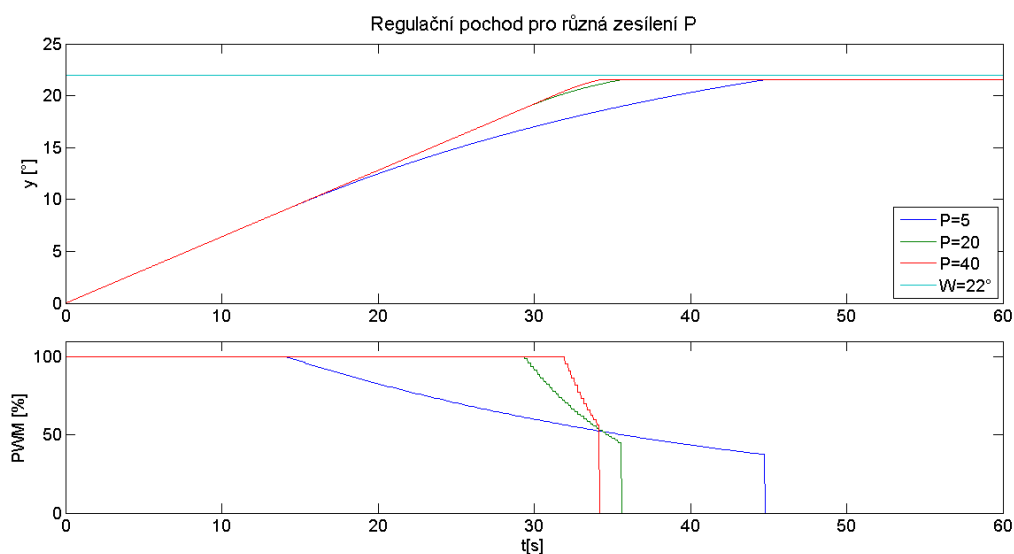
resp. je dosaženo žádané hodnoty s určitou tolerancí a je tedy i akční zásah nulový. Penalizaci akčního zásahu zajišťuje blok PENALIZATION, kterým akční zásah projde beze změn, pokud je regulační odchylka mimo necitlivé pásmo. V opačném případě je akční zásah nastaven na nulovou hodnotu. Blok Saturation1 zajišťuje, aby nedošlo k překročení maximální hodnoty PWM 100 %. Blok Saturation2 simuluje pásmo maximálního dosažitelného náklonu $\pm 22^\circ$.



Obr. 23: Regulační obvod

Výhodou astatického systému je možnost regulace takového systému pouze P regulátorem. Integrační charakter a tedy i záruka dosažení žádané hodnoty je již v takovém systému obsažena. Obecně také I složka zhoršuje regulační pochod za cenu dosažení žádané hodnoty. Proto by využití PI regulátoru bylo nejen zbytečné, ale mohlo by dokonce regulační pochod značně zhoršit.

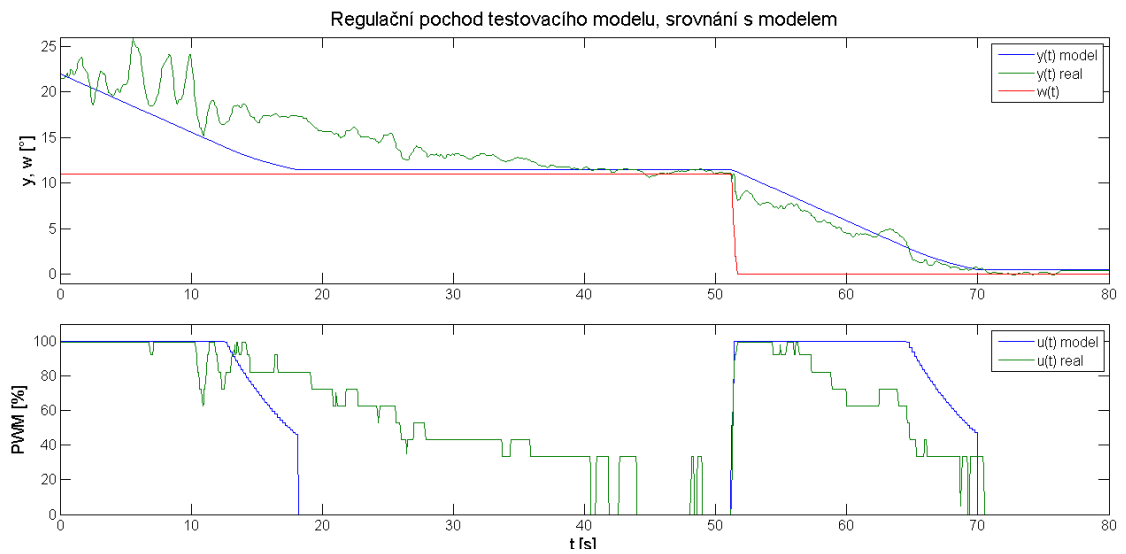
Na obrázku (Obr. 24) je srovnání regulačních pochodů pro různá zesílení P regulátoru při žádané hodnotě 22° a příslušných akčních zásahů. Jakmile dosáhne regulační odchylka hodnoty 0,5, je akční zásah nulový a systém je ustálen. Díky integračnímu charakteru modelu je dosaženo žádané hodnoty pro každé zesílení. Zesílením P regulátoru pak lze určit rychlost regulačního pochodu. Např. pro zesílení s hodnotou 40 běží čerpadla takřka po celou dobu regulačního pochodu na plný výkon. Zesílení regulátoru bylo nutné vhodně volit s ohledem na rychlost regulačního pochodu a jakousi klouzavost resp. hladkost křivky, po které je žádané hodnoty dosaženo.



Obr. 24: Regulační pochody pro různá zesílení P regulátoru

Při testování regulátoru na testovacím modelu bylo zjištěno, že pro všechna zesílení je vždy skutečně dosaženo žádané hodnoty. Velká zesílení sice přiblížila rychleji výstup na žádanou hodnotu, ale při plných výkonech čerpadel je zpětná vazba zatížena vibracemi a také nelinearitami konstrukce testovacího modelu, které vedli k překmitům před ustálením i při zavedeném necitlivém pásmu regulační odchylky. Experimentálním testováním byla zjištěna optimální hodnota P regulátoru, jejíž hodnota je 22. S touto hodnotou je regulační pochod kompromisem mezi rychlostí regulačního pochodu a hladkostí, kterou je žádaná hodnota dosažena bez překmitu.

Regulační pochod testovacího modelu je znázorněn na obrázku (Obr. 25) zelenou čarou. Zde je možné pozorovat kmitavý průběh regulované veličiny resp. hodnoty akcelerometru, která je při plném výkonu motorů citlivá na vibrace. Průběh identifikovaného modelu je znázorněn modrou čarou. Při vizuálním srovnání obou regulačních pochodů lze pozorovat jistá podobnost, čímž se potvrzuje správnost identifikace systému.



Obr. 25: Regulační pochod testovacího a identifikovaného modelu



4 Testování systému vyvažování v reálných podmínkách

Ke skutečným testům systému vyvažování v průzkumné ponorce resp. závěrečnému květnovému ponoru nedošlo. Důvodů resp. problémů, které nastaly bylo více. V první řadě rok 2013 přinesl nestandardně dlouhou zimu. Některé vodní plochy byly zamrzlé až do poloviny dubna. Další problematikou byla kompletace a oživení ponorky. Na ponorce v současnosti pracuje řada studentů, kde každý má na starost vývoj určité části ponorky. Díky tomu nemůže být oživení a reálné testování otázkou pouze jednoho či dvou jedinců. Přesto byla kompletace a oživení včas dokončeny. Byl naplánován květnový ponor, jehož výsledky by bylo možné uvést v závěrečných pracích studentů. Při finálním testování funkčnosti ponorky před ponorem bylo zjištěno, že jeden z pohonných motorů nefunguje. Motor se točil pouze náhodně a zasekával se. Problematika chodu motorů ve vlhkém, ne-li mokřím prostředí, byla slabinou ponorky od prvních testů, kdy mezi jednotlivými ponory docházelo k zatuhnutí či dokonce zreznutí motorů. Ponor a tedy i reálný test proběhne po odstranění problémů s pohonem ponorky.

I když nelze říci, do jaké míry bude chování reálné ponorky odpovídat chování testovacího modelu, lze tvrdit, že zůstává zachována základní vlastnost systému a to jeho astatický charakter a uměle vložená stabilita v podobě omezení výšek hladin. Z těchto poznatků nemůže být pochyb o funkci systému vyvažování v reálném nasazení.

Prakticky dojde ke dvěma změnám oproti „idealizovanému“ testovacímu modelu. Prvním rozdílem bude změna hodnoty realizovatelného podélného náklonu, který bude pravděpodobně nižší než u testovacího modelu. Dále díky umístění komor v ponorce viz (Příloha B) nebude dosaženo stejných vzdáleností od objemového těžiště ponorky, které je díky vztlaku na kokpit blíže k přídi ponorky. Díky rozdílné vzdálenosti komor od těžiště lze očekávat také rozdílné mezní hodnoty dosažitelného podélného náklonu. S těmito problémy si regulátor poradí. Bude nutné pouze upravit rozsah žádané hodnoty na realizovatelnou škálu.



Závěr

Cílem práce bylo vytvořit systém vyvažování ponorky, který nahradí původní systém vyvažování a svou koncepcí odstraní nedostatky původního systému.

Byl vytvořen dvoukomorový systém vyvažování. Komory byly osazeny vzduchovou průchodkou, díky níž je možné využít plnou kapacitu obou balastních komor, která činí celkem 3,28 l. Dále byly komory osazeny šestistavovým vodivostním čidlem výšky hladiny, díky kterému je možné předejít rizikovým situacím v podobě přepuštění balastních komor popř. vypuštění vzduchu z komor. Informace o výšce hladiny byla díky známému tvaru balastních komor přepočítána na napuštěný objem. Uživatel tím získává představu o situaci v komorách a navýšení hmotnosti ponorky resp. hmotnostní diferenci.

Ponorka byla osazena akcelerometrem, který uživateli poskytuje informaci o aktuálním podélném a příčném náklonu ponorky.

Pro ovládání systému vyvažování byla vytvořena ovládací aplikace, která poskytuje uživateli možnost ručního ovládání jednotlivých čerpadel, aktuální podélný náklon a informace o výškách hladin v komorách. Po úspěšném otestování systému vyvažování na vytvořeném testovacím modelu byla implementována automatické regulace podélného náklonu, kdy uživatel pomocí ovládacího programu zadá žádaný úhel v realizovatelném rozsahu. Po aktivaci automatické regulace se regulátor postará o dosažení tohoto úhlu.

System vyvažování byl úspěšně nainstalován do průzkumné miniponorky. Reálné testy však byly pozdrženy díky vážnějším problémům s pohonem ponorky a jejich výsledky proto není možné zanést do této práce. Reálné testy byly tedy provedeny na testovacím modelu, kde nová koncepce systému vyvažování fungovala bezchybně.



Seznam použité literatury

- [1] PEKLÁK, Martin. *Návrh elektronické výbavy experimentální dálkově řízené průzkumné miniponorky*. Liberec, 2011, 45 s. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Holada, Ph.D.
- [2] ČERNÝ, Michal. *Potichu a rychle, dolů - 2. díl*. [online]. Modelářský měsíčník RC revue. [cit. 2013-03-04].
URL: <www.uboa.cz/modely/rc revue/dil2.htm>
- [3] VOJÁČEK, Antonín. *Integrované MEMS GYROSKOPY*. [online]. [cit. 2013-03-04].
URL: <www.automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [4] KADLEC, Karel. *Měření hladiny*. [online]. [cit. 2013-03-18].
URL: <www.uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/5-FPBT09-Hladina.pdf>
- [5] PEKLÁK, Martin. *Projekt miniponorka – možnosti statického a dynamického dovažování*. Liberec, 2012, 19 s. Semestrální projekt. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí semestrálního projektu Ing. Miroslav Holada, Ph.D.
- [6] ON SEMICONDUCTOR. *Hex Smitt-Trigger inverter 74HC14*. [online]. [cit. 2013-04-11].
URL: <www.onsemi.com/pub_link/Collateral/74HC14.REV1.PDF>
- [7] KAMAMI. *KAmoMEMS2 3-axis motion sensor*. [online]. [cit. 2013-04-11].
URL: <www.kamami.com/dl/kamodmems2_en.pdf>
- [8] ST MICROELECTRONICS. *MEMS motion sensor LIS35DE*. [online]. [cit. 2013-04-11].
URL: <www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00231405.pdf>
- [9] PICAXE. *PICAXE manual*. [online]. [cit. 2013-04-12].
URL: <www.picaxe.com/docs/picaxe_manual1.pdf>



- [10] DUDÁČEK, Karel. *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I²C a CAN*. [online]. [cit. 2013-04-13].
URL: <www.home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf>
- [11] HOBBY ROBOT. *PICAXE – příručka programátora*. [online]. [cit. 2013-04-13].
URL: <www.hobbyrobot.cz/wp-content/uploads/PICAXE_basic_man_cz.pdf>
- [12] ŠTĚPÁNEK, Jakub. *Elektronická výbava mobilního robota*. Liberec, 2012, 50 s.
Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Holada, Ph.D.
- [13] KREJČÍ, Jan. *Malý úvod do programování v .NET C#*. [online]. [cit. 2013-04-15].
URL: <www.physics.ujep.cz/~jkrejci/vyuka/prg2/MalyUvodDoCsharp.pdf>
- [14] ČERKALA, Jakub, JADLOVSKÁ, Anna. *Experimentální identifikácia nelineárneho dynamického systému pomocou IDENT Tool v prostredí Matlab*. [online]. [cit. 2013-04-22].
URL: <http://kyb.fei.tuke.sk/laben/ludia/pdf/CerkalaJadlovska_FEI_2012.pdf>

Přílohy

Příloha A – Příložené CD

Příložené CD obsahuje:

- Diplomová práce (ve formátu PDF)
- Schémata elektronických obvodů (ve formátu sch)
- Návrhy plošných spojů (ve formátu brd)
- Zdrojový kód pro mikroprocesor (ve formátu bas)
- Ovládací aplikace (ve formátu exe)
- Projekt ovládací aplikace (projekt VISUAL C#)

Příloha B – Umístění systému vyvažování v ponorce



Obr. 26: Umístění systému vyvažování v ponorce