

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**REGULACE KURSU LODI**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej VAVROCH**

Osobní číslo: **E14B0209P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Regulace kursu lodi**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Sestavte stručný přehled historických metod automatického udržování kursu lodi.
2. Vytvořte zjednodušený simulační model soustavy.
3. Navrhněte realizaci řízení kursu modelu lodi pomocí mikroprocesoru.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.



## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zaměřuje na popis historických metod automatického udržování kursu lodi a na návrh automatického řízení kursu modelu lodi. V průběhu návrhu je také vytvořen zjednodušený simulační model soustavy. V práci je realizováno automatické udržování kursu lodi pomocí PI regulátoru realizovaným mikroprocesorem. Následně je realizace zhodnocena.

## **Klíčová slova**

PI regulátor, Regulace kursu, Historie, Automatické řízení, kurs lodi, mikroprocesor, Arduino

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on describing historical methods of automatic course regulation. Second part focuses on implementing automatic course regulation to model of a ship. Another step in this thesis is to make simplified mathematical model of the model. PI regulator implemented to microprocessor is used to automatically hold the wanted course. At the end of the thesis execution of the regulator is evaluated.

## **Key words**

PI regulator, Course regulation, History, Automatic regulation, Ship course, Microprocessor, Arduino

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Ondřej Vavroch

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce *Ing. Martinu Jandovi, Ph.D.*, za cenné profesionální rady, připomínky, trpělivost a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD DO REGULACE.....</b>	<b>10</b>
<b>2 HISTORIE REGULACE KURSU.....</b>	<b>12</b>
2.1 DŮVOD ROZŠÍŘENÍ.....	12
2.2 ZAČÁTKY SERVOMOTORŮ.....	13
2.3 ZAČÁTEK KORMIDLOVÝCH STROJŮ OBSAHUJÍCÍ ZPĚTNOU VAZBU.....	15
2.4 AUTOMATICKÉ ZATÁČENÍ.....	16
2.4.1 Úvod.....	16
2.4.2 Pokusy.....	16
<b>3 APROXIMACE MATEMATICKÉHO MODELU SOUSTAVY.....</b>	<b>18</b>
3.1 VÝBĚR KOMPONENTŮ.....	18
3.1.1 Teoretický rozbor výběru senzorů.....	18
3.1.2 Výběr senzoru.....	20
3.2 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	21
3.3 MĚŘENÍ.....	22
3.4 ZPRACOVÁNÍ DAT.....	23
<b>4 REALIZACE REGULÁTORU.....</b>	<b>25</b>
4.1 NÁVRH PARAMETRŮ.....	25
4.2 IMPLEMENTOVÁNÍ REGULÁTORU DO MODELU LODI.....	27
4.3 MĚŘENÍ A DOLADĚNÍ REGULÁTORU.....	29
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>31</b>
Možností navázání práce:.....	32
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>33</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>

## Úvod

V této bakalářské práci sepsuji historické metody, ze kterých se můžeme poučit do budoucnosti. Po přečtení této bakalářské práce získá čtenář solidní přehled o automatické regulaci kursu lodi a její realizaci v praxi. Na tyto základy může následně navázat.

Studuji elektrotechniku s cílem automatizování lidských činností a ulehčení našeho života. Studováním historie nám může dodat jistý nadhled a inspiraci v řešení problémů automatického řízení kursu lodi.

Do obsahu méj práce patří soupis historie automatického řízení kurzu, popis tehdejší používané techniky a dále také návrh automatického řízení kurzu pomocí moderních metod.

Bakalářská práce je rozčleněna do čtyř kapitol. V první kapitole je popsán princip zpětnovazebního řízení a vysvětlení pojmů a popis parametrů regulátoru. V kapitole druhé je popsána historie navigace u lodí, důvod rozšíření automatizace řízení regulace kursu a historie servomotorů a automatického zatáčení. Třetí kapitola popisuje porovnání a výběr jednotlivých softwarových a hardwarových komponent. Dále popisuje měření a zpracování dat. Čtvrtá kapitola obsahuje návrh parametru regulátoru, popis konkrétní implementace regulátoru do modelu lodě a konečné nastavení těchto parametrů.



## Seznam symbolů a zkratk

Jméno	Značení	Jednotka
Žádaná hodnota	w	-
Regulovaná veličina	y	-
Akční veličina	u	-
Regulační odchylka	e	-
Zesílení regulátoru	KR	-
Časová konstanta pro integrační složku	Ti	[s]sekunda
Magnetická indukce	B	[T] Tesla
Elektronicky mazatelná paměť	EEPROM	-
Proporcionální složka	P	-
Integrační složka	I	-
Derivační složka	D	-

# 1 Úvod do regulace

V bakalářské práci se věnuji druhu regulace nazvaném zpětnovazební řízení.

Zpětnovazební řízení je druh řízení, kdy měříme výstupní hodnotu, kterou následně přivádíme do rozdílového členu, abychom získali pouze odchylku od požadované hodnoty. Následně je tato odchylka předána do regulátoru který podle nastavení začne působit na akční člen soustavy.

Akční člen je část soustavy, která mění regulovanou soustavu. V našem případě jde o servomotor, ovládající kormidlo.

Regulátor je zařízení, které působí na systém tak, aby námi měřená hodnota se rovnala požadované hodnotě.

Regulátory se konstruují proto, aby řízení procesu nevyžadovalo nepřetržitou pozornost a ruční zásahy operátora. Regulátor automaticky mění akční veličinu  $u(t)$  tak, aby regulovaná veličina  $y(t)$  měla žádanou hodnotu  $w(t)$ , kde  $t$  je čas. [1]

Regulátor a jím regulovaná soustava tvoří regulační obvod (smyčku): na vstup regulátoru je přivedena spolu s požadovanou hodnotou  $w(t)$  i skutečná hodnota regulované veličiny  $y(t)$  a výstup regulátoru  $u(t)$  působí, po případné transformaci, na vstup do soustavy. [1]

PID v řídicí technice znamená proporcionální, integrační, derivační složku chování univerzálního filtru (tzv. PID regulátor). [1]

Označení parametru PID regulátoru jsou:

- zesílení  $K[-]$  proporcionální složky P
- integrační časová konstanta  $T_i[s]$  integrační složky I
- derivační konstanta  $T_d[s]$  derivační složky D

[1]

Proporcionální složka způsobuje to, že akční zásah regulátoru je úměrný regulační odchylce. Lze si ho fyzicky představit jako zesilovač. Použití samotného proporcionálního regulátoru se soustavami, u nichž regulovaná veličina reaguje na akční zásah konstantní velikostí ustálením se na nové hodnotě, vede ke vzniku trvalé regulační odchylky. [1]

Integrační složka způsobuje že akční zásah je úměrný, době po kterou existuje regulační odchylka. Trvalá regulační odchylka je eliminována integračním chováním regulátoru, při kterém regulátor neustále mění akční veličinu, dokud se mu nepodaří dosáhnout nulové regulační odchylky. [1]

Derivační složka způsobuje, že se výstup z regulátoru vytváří jako úměrný rychlosti změny regulační odchylky. [1]

Trvalá regulační odchylka:

Nastává při použití proporcionálního regulátoru. Když odchylka, vynásobena konstantou, nemusí stačit, aby ovlivnila akční člen a odstranila odchylku.

V dnešní době je PID regulátor převážně realizován mikroprocesory.

## 2 Historie regulace kursu

### 2.1 Důvod rozšíření

Pokud hovoříme o historii měli bychom nejdříve pochopit důvody, proč se automatizace začala v lodní dopravě prosazovat.

- Rostoucí potřeba snižovat posádku lodě, primárně kvůli stoupající mzdě, ale určitý vliv má i sociální evoluce, kdy se lidé začali více zajímat o méně fyzicky náročné práce a dávají přednost lepším pracovním podmínkám. Následkem je také pokles kvalifikovaného personálu.
- Stejně jako u mnoho jiných technologií se o automatizaci začala zajímat armáda. Vznikl požadavek, aby lodě mohly proplout kontaminovanou zónu bez přítomnosti posádky po určitou dobu, a nebo autonomní řízení lodí a ponorek pro průzkum či pokládání min.
- Nemožnost řídit lodě optimálně z ekonomického pohledu. Například snížení času dopravy a spotřeby paliva.
- Jako další faktor můžeme považovat vývoj technologie. Zvětšení spolehlivosti, zlevnění a miniaturizace. [2]

## 2.2 Začátky servomotorů

Epocha velkých parních lodí začala v roce 1835. Vyhledem k použití parních motorů vznikl problém se stabilizací lodi. Plachetnice bylo možné vybalancovat tak, že potřebovaly minimální zásah od kormidelníka. U parních lodí tento způsob vyvážení nebylo možné.[3]

V roce 1874 Henry Bessemer provedl z jeho strany první pokusy o stabilizaci, které se netýkaly celé lodi, ale pouze salónku. Snímání pohybu lodi bylo zajištěno gyroskopem a síla k rozpohybování byla brána z lodního hydraulického systému.[3]

V roce 1892 Sir John Thornycroft se pokusil o stabilizaci lodě pomocí hydraulického systému. Pohyb lodi byl zjišťován zavěšeným kyvadlem. Při zjištění náklonu bylo přesunuto závaží, o váze 5% celkové hmotnosti lodi, na jednu či na druhou stranu trupu. Nicméně úspěšný pokus o stabilizaci lodi nebyl uskutečněn až do 20. století. [3]

V případě pohybující se velké lodi jsou hydrodynamické síly na kormidlo, jako je tření a setrvačnost, již nezanedbatelné. [3]

Tradičně bylo kormidlo ovládáno manuálně. Pro vyrovnání sil bylo nutné použít velké převody ozubených kol, které ale naopak snižovaly citlivost. Snižování přesnosti ovládání bylo nepřijatelné pro válečné lodě. [3]

Řešením se ukázalo, použití páry k řízení kormidla.[3]

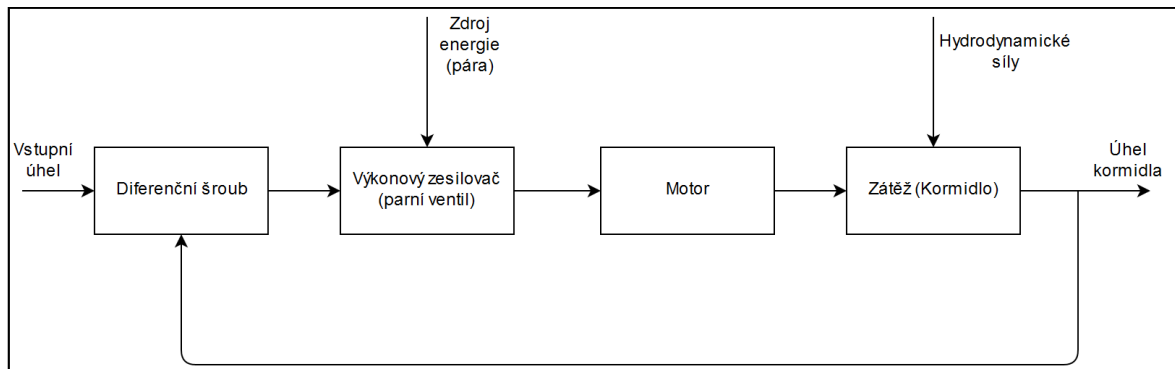
První kormidlový stroj byl vynalezen Frederickem E. Sickelsem v roce 1849.[3]

Sickelsův motor nebyl nic jiného než servomechanismus bez zpětné vazby.[3]

Tento motor byl použit jako mechanický zesilovač, který se snažil srovnat pozici kormidla a kormidelního kola.[3]

Kormidelní stroj se zpětnou vazbou byl patentován až v roce 1866 J.McFarlane Grayem. [3]

Na obrázku č. 1 můžeme vidět blokové schéma Grayova motoru.



Obr. 1: Schéma Grayova motoru  
Překresleno z knihy[3]

## 2.3 Začátek kormidlových strojů obsahující zpětnou vazbu

Jean Joseph Léon Farcot pracoval se svým otcem Marie Joseph Denis Farcotem v rodinné firmě Farcot a syn na regulátorech parních motorů. V roce 1854 jeho otec patentoval dvě metody vyrovnání offsetu pomocí modifikace Wattova regulátoru. Tento úspěch následoval v roce 1868 patent na kormidlový stroj.[3]

Servomotory vznikly jako následek Farcotova snažení vyvinout regulátory s dostatečnou silou na ovlivnění ventilů námořních motorů o výkon 400 až 800 kilowattů.[3]

Práce Josefa Farcota byla důležitým krokem ve vývoji kontrolního inženýrství.[3]

K vývoji nepřispěly pouze jeho vynálezy, ale i kniha kterou publikoval v roce 1873 jménem “Le servo-moteur ou moteur asservi” ve které popsal designy kormidlových strojů vyvinuté firmou Farcot a syn.[3]

Tuto knihu můžeme považovat za jednu z prvních, zabývajících se mechanismy řízení polohy.[3]

V knize popisuje například obranou loď Béliér, kde poznamenává fakt že kormidelník musí vyvinout pouze sílu okolo 3 až 4kg, aby otočil kormidlo, které může nést zátěž až 12 tun. [3]

Jako odpověď byla v roce 1872 H.M.S Thunderer opatřena těmito věžemi. [3]

Pára ovšem nebyla nejlepší médium pro otáčení věží kvůli obtížím se zastavením.[3]

Proto Farcot začal pracovat na paro-hydraulických systémech pro kormidlové stroje, kde hydraulická část fungovala jako zářezecí mechanismus. [3]

V roce 1870 Andrew Betts Brown patentoval hydraulický servomechanismus ve spojení se zatáčením lodi. Tyto rané hydraulické servomechanismy pracovaly s konstantním tlakem. To podmiňovalo minimální velikost pumpy a akumulátoru při větším manévrování. Při delším čase, kdy byl pohyb kormidla minimální, pumpa byla překlenuta. Z tohoto důvodu hydraulické kormidlové stroje nedostaly širokého uplatnění.[3]

## 2.4 Automatické zatáčení

### 2.4.1 Úvod

Vzhledem k obavám o bezpečnost své vlasti se v roce 1870 Werner Siemens, rozhodl přesunout pozornost svojí firmy (Siemens & Halske) od elektrického telegrafu, dynam a obloukových lamp k vývoji zbraní, zejména torpédoborců.[3]

Jeden ze směrů bylo automatické řízení torpédoborce. Výzkum byl prováděn na vypůjčené lodi německým námořnictvem mezi roky 1872 až 1874. [3]

Kormidlo lodi bylo otáčeno elektrickým motorem, který byl řízen elektromagnetickými relátky. [3]

Řízení bylo buď ruční ze základny na zemi po kabelu, nebo z magnetické jehly kompasu umístěného na lodi.[3]

### 2.4.2 Pokusy

K tomu se váže mnoho pokusů v poslední ¼ 19. století o připojení řídicího motoru k magnetickému kompasu. Jeden tento pokus byl zaznamenán A. B. Brownem. Výsledky jeho pokusů byly neúspěšné z důvodu zaměření na použití pouze proporcionální složky bez derivační složky. [3]

Lod' kvůli tomu následovala spíše sinusový průběh, místo ustáleného. Úhel oscilací se zvyšoval s rychlostí lodi.[3]

Podobné problémy mělo zatáčení torpéd používajíc gyroskop. Právě při vylepšení těchto torpéd Sir James B. Henderson přišel s nápadem „Check helm“, který v roce 1913 nechal patentovat. Šlo o automatické kormidlové stroje u nichž ovlivnění soustavy nebylo závislé pouze na odchylce od kursu, ale také na rychlost změny odchylky.[3]

Základem byl speciální gyroskop použitý pro měření úhlové rychlosti lodi. Nicméně hlavní příspěvek ve vývoji automatických systému učinila firma Sperry Gyroscope Company.[3]

Elmer Sperry začal pracovat na automatickém pilotu, který později byl znám jako gyropilot. Patent byl vyplněn v roce 1914, ale udělen byl až v roce 1920.[3]

První světová válka negativně zasahovala do vývoje gyropilotu. Proto mohla produkce začít až po válce. Vývoj začal hlavně z komerčních důvodů.. Sperry Company věřila, že pokud nedokáže zásobovat autopilota lodi spolu s gyrokompasem, mohou ztratit pozici na trhu gyrokompasů jejich konkurentovi firmě Anschütz. [3]

První zkoušky gyropilotu byly provedeny v dubnu roku 1922. Ve stejném roce v říjnu byla loď Munargo osazena první permanentní instalací.[3]

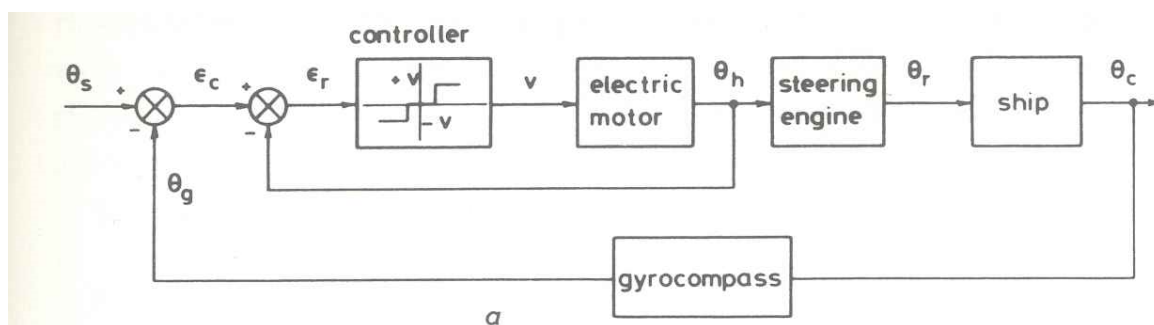
Již v roce 1932 bylo nainstalováno přes 400 gyropilotů.[3]



Základ gyropilotu byl elektrický motor, který se choval jako tři polohové ovládní a mohl být přesunut na jednu ze stran nebo držen stacionárně.[3]

Motor byl použit pro náhradu kormidelníka při řízení lodě. Sperry si již v roce 1912, kdy začal pracovat na gyropilotu uvědomil, že řízení založené čistě na odchylce nemůže být použito. Kormidelník reaguje na to, jak se loď chová a zmírňuje úhel kormidla proporcčně odchylce. [3]

Sperry tohoto efektu docílil použitím zpětné vazby z řízení kormidla.[3]



Obr. 2: Blokový diagram Sperryho základního gyropilot

převzato z knihy[3]

Na obrázku číslo 2 vidíme, že do systému vstupuje požadovaný kurs značený  $\theta_s$ . Následně je v rozdílovém členu od něj odečten měřený kurs značený  $\theta_g$ . Veličina  $\epsilon_c$ , která jde z rozdílového členu značí odchylku od kursu. Úhel jdoucí do kormidlového stroje je označen jako  $\theta_h$ . A úhel kormidla jako  $\theta_r$ . [3]

Sperry si také všiml, že zkušený kormidelník přesune kormidlo proti úhlovému momentu lodi a tím zabrání aby loď tento moment přenesl přes kurs.[3]

Aby gyropilot dokázal tuto funkci splnit Sperry vymyslel zařízení „anticipator“ neboli předvídač. [3]

Předvídavý efekt byl docílen zavedením nelineární hystereze do vnitřní smyčky. Pokud se změnil směr působení  $\epsilon_c$ , loď se již neoddaluje od kursu a začíná se přehoupávat zpět na kurs, vnitřní smyčka začne pracovat jako dvoustavový regulátor s hysterezí neboli „Bang-bang controller“. Tento regulátor vytvoří náhlou, ale limitovanou změnu v nastave ní kormidla a řízení se vrátí zpět k proporcionálnímu řízení. Hodnota korekce by měla být proporcční přeregulování lodi při absenci předpovědění. [3]

## 3 Aproximace matematického modelu soustavy

### 3.1 Výběr komponentů

Pro realizaci tohoto projektu byla zvolena open source vývojová platforma Arduino. Vývojové desky arduino obsahují 8-bitové mikroprocesory Atmega od firmy Atmel a k dispozici je velké množství podpůrných periférií a modulů.

Pro tento projekt byla vybrána vývojová deska Arduino Mega 2560, která je osazena osmibitovým mikroprocesorem Atmel AVR ATmega2560. Deska obsahuje 54 digitálních vstupů / výstupů, 16 analogových vstupních portů, 4x UART, USB konektor a krystalový oscilátor o frekvenci 16MHz. Pro vývoj, překlad programu a naprogramování mikroprocesoru se používá vývojové prostředí Arduino Software IDE s implementovaným programovacím jazykem Wiring s Processing IDE.

Model, který je použit k měření, byl zapůjčen. Jedná se o model lodi na dálkové ovládání o velikosti 60 cm na délku a 15 cm na šířku. Kormidlo je ovládáno servomotorem a poháněn je stejnosměrným motorem.

#### 3.1.1 Teoretický rozbor výběru senzorů

Při volbě senzoru kursu jsem se rozhodoval mezi několika principy funkce kompasu. Vybíral jsem z magnetického kompasu, gyrokompasu nebo elektromagnetického kompasu.

#### Magnetický kompas

Klasický magnetický kompas se střílkou uprostřed ukazující na sever. Pro použití v modelu lodi nevhodný, z důvodu složité implementace snímání kursu mikroprocesoru.

## Gyrokompas

Gyrokompas slouží k určení opravdového severu Země. Jeho princip vynalezl francouzský fyzik Léon Foucault v roce 1852. Pro navigaci se začal používat až na začátku 20. století.

Mechanický gyrokompas - jeho základem je setrvačnický, který je obvykle zavěšen v kardanovém závěsu a má 3 stupně volnosti. Setrvačnický má pracovní otáčky obvykle 20 000 až 50 000 otáček za minutu. Po dosažení pracovních otáček se osa setrvačnicku díky úhlové rychlosti otáčení Země a zemské přitažlivosti ustaví rovnoběžně s místním poledníkem. Tím je dán opravdový sever. Odchylka gyroskopu od opravdového severu je max 0.5° při stále rychlosti a kurzu lodi. Pro své vlastnosti je hojně využíván např. v letectví, navigaci lodí, vesmírných stanic a satelitů.

[4]

Optický gyrokompas (Fibre optic gyroscope (FOG)) se skládá z cívky optických vláken. Ke zjištění úhlové rychlosti a smyslu rotace využívá vlastností optického zařízení. Pracuje na principu Sagnacova efektu. Využití má stejné jako mechanický gyroskop. Jeho hlavní výhodou je, že neobsahuje mechanické posuvné části a místo toho využívá interferenci světla, které prochází optickým vláknem. Vzhledem k jeho velikosti je pro model nepoužitelný.

Laserový gyrokompas funguje na stejném principu jako gyrokompas z optických vláken. Díky větší přesnosti a menší velikosti používá se převážně v letadlech. Jeho cena a dostupnost je pro bakalářskou práci nevyhovující.

## Elektromagnetický kompas

V dnešní době se pod tímto pojmem nacházejí elektromagnetické kompasové s různými principy a vlastnostmi.

Dnes díky miniaturním rozměrům můžeme sledovat velký nárůst magnetorezistivních senzorů. Jejich použití je hlavně v mobilních telefonech či přenosných GPS.

Magnetorezistivní senzor funguje na následujícím principu. Pokud na elektrický proud protékající rezistorem působí (v kolmém směru) magnetické pole, pozorujeme vzrůst odporu rezistoru s druhou mocninou magnetické indukce. Tento jev je možné pozorovat i v kovech, ale výhodně se používá v polovodičích s vysokou pohyblivostí nosičů náboje. Při silnějších magnetických polích přechází kvadratická závislost asymptoticky na přímkovou. [5]

Mnou použitý senzor funguje na principu Anizotropní-magnetorezistivity (AMR) .

AMR senzory jsou velmi vhodné pro měření jak lineární tak úhlové pozice a posunutí v magnetickém poli Země. Tyto zařízení jsou vyrobeny z niklu a železa (Permalloy), uloženy na tenkém filmu na křemíkovém waferu a vzorkovány jako odporový pruh. Vlastnosti filmu jsou příčinou změny rezistivity 2%-3% v přítomném magnetickém poli. V typické konfiguraci, čtyři z těchto rezistorů jsou spojeny do Wheatstoneova můstku k povolení měření obou velikostí a směru pole podél jednotlivé osy. Šířka pásma je obvykle 1-5MHz rozsahu. Odezva magnetorezistivního efektu je velmi rychlá a nezávislá na cívce a na oscilační frekvenci.[5]

AMR senzory mohou být vyrobeny ve velkém množství na křemíkovém waferu a upevněny v komerčním IC obalu a automaticky kompletovány s dalšími obvody a systémovými komponentami. Nabízejí tedy vysokou citlivost, malé rozměry a odolnost na hluk.[5]

### 3.1.2 Výběr senzoru

Vybral jsem jako senzor magnetorezistivní kompas HMC5883L od firmy Honeywell. Tento elektromagnetický kompas HMC5883L dokáže měřit s přesností  $10\mu\text{T}$  podle datasheetu a s rozsahem od  $800\mu\text{T}$  do  $-800\mu\text{T}$ . Velikost magnetického pole země se pohybuje mezi 25 a  $65\mu\text{T}$ .

S přesností  $10\mu\text{T}$  sice nedosahujeme optimální přesnosti, ale pro naši aplikaci zcela postačující.

Důvod použití magnetorezistivního kompasu je popsán v předchozí podkapitole. Tento senzor je osazen na desce plošných spojů od firmy Adafruit, která zajišťuje komunikaci přes rozhraní I2C. Kompatibilita s platformou Arduino byl důležitý faktor při výběru. Například knihovny pro použití senzoru na stránkách firmy Adafruit.

### 3.2 Příprava měření

Jako první krok v návrhu regulátoru musím zjistit přenosovou funkci soustavy.

Přenosovou funkci soustavy získám tak, že nejprve naměřím odezvu soustavy na skok na maximální výchylku kormidla.

Díky velikosti modelu si můžu dovolit odezvu na maximální výchylku naměřit.

Pro vytvoření grafu potřebuji naměřit dvě veličiny pro osu x a osu y. Tyto veličiny jsou kurs v stupních a čas v milisekundách.

Hodnotu kurzu získám z měření senzoru. Senzor měří hodnotu magnetické indukce ve směru X, Y a Z.

Zajímá mě pouze hodnota ve směru X a Y. Abych z těchto dvou hodnot dostal hodnotu kurzu použiji funkci  $\text{atan2}(x,y)$ . Funkce  $\text{atan2}$  určí úhel mezi X a Y pro každé reálné číslo a to dokonce v případě, že směr x se rovná nule. Funkce je již implementována v knihovnách Arduina.

Nesmím také zapomenout na přičtení deklinačního úhlu, který se mění podle pozice a času. V mém případě je tento úhel 3 stupně a 22 sekund.

Hodnoty časové osy jsou dané měřicí periodou.

Aby jsem tyto hodnoty mohl použít musím je nejprve uložit a poté přečíst pomocí počítače.

Pro uložení jsem použil paměť EEPROM, která je integrovaná do mikroprocesoru. Mnou použité Arduino Mega 2560 obsahuje 4 KB neboli 4096 bytů. Do paměti EEPROM zapisuji úhel ve formátu float. Datový typ float mi umožňuje zapisovat čísla s přesností na 6-7 desetinných míst. Při vydělení 4096 bytů velikostí datového typu floatu, který činí 4 byty mi vyjde číslo 1024, které určuje možný počet hodnot které je možné naměřit. Při vzorkovací frekvenci 20ms mohu naměřit průběh o délce 20 sekund, pro takto veliký model je to více než dostačující.

Program je koncipován, tak že po zapnutí mikroprocesoru nejprve zjistí, zda je možné přepsat paměť EEPROM, pokud ano, čeká 3 minuty na umístění lodi do vody a dojetí do bezpečné vzdálenosti od břehu pomocí rádiového řízení.

Následně program čeká na změnu směru kormidla. Po této změně program začne měřit a ukládat kurs do paměti EEPROM.

Pro první měření byl do programu zakomponován filtr s klouzavým průměrem. Z důvodu rychlosti a zachycení přechodného jevu na začátku, byl tento filtr pro několik měření odstraněn.

Následně je mikroprocesor připojen k PC a data jsou přes smyčku přečteny z paměti EEPROM a poslány po sériovém portu. Po dokončení čtení je smazán ukončovací znak v posledních 4 bytech paměti. Tím je povoleno zapsání dalšího měření.

### 3.3 Měření

Vzhledem k velikosti modelu, měření proběhlo na Kornatickém rybníku. I při snaze vybrat meteorologicky nejklidnější den, byl vždy přítomný mírný vítr, tím se do měření zanesly vedlejší vlivy. Tyto vlivy se projeví na charakteristice velice negativně. Pokud se model lodi otáčel po větru a proudu byla jeho otočka urychlena. Od poloviny kruhu se začaly vlivy chovat opačně a naopak model zpomalily.

Provedení konstantní rychlosti bylo provedeno využitím trimru na rádiovém ovladači, kterým se zaručilo konstantní napětí jdoucí do motoru. Při použití trimru, model byl schopen dosáhnout maximálně poloviční rychlosti. Při použití více než poloviční rychlosti spolu s kormidlem na maximální výchylku naklánělo model příliš na bok a ten začal nabírat vodu. Z důvodu bezpečnosti jsem tuto rychlost zároveň zavedl jako maximální.

Následně jsem se s modelem lodi rozjel, tak daleko od břehu, aby měl místo na několik otočení. A následně jsem otočil kormidlem na plnou výchylku. Tím se spustil impuls pro začátek měření a hodnoty z kompasu se začaly zapisovat do paměti EEPROM.

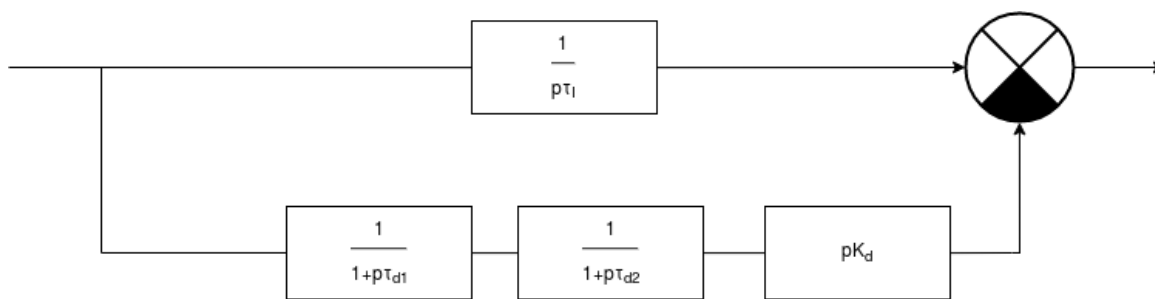
Po několika otočení jsem opět zamířil ke břehu a nechal model lodi vyrovnat. Po vytáhnutí lodi z vody jsem nahrál program pro čtení z EEPROM a posílání dat po sériovém portu do mikroprocesoru.

Toto měření jsem několikrát opakoval při různých rychlostech.

### 3.4 Zpracování dat

Vzhledem ke zkreslení charakteristik jsem musel zvolit jinou metodu aproximace matematického modelu soustavy než je ruční aproximací astatické soustavy. V programu Matlab jsem vytvořil skript, který simuluje odezvu soustavy. Na začátku jsem naměřil zákmit, který je ve skriptu proveden pomocí záporné derivace druhého řádu.

Následuje nárůst kursu podle integrační konstanty. Integrační konstantu, rychlost jakou stoupá kurs, soustavy jsem odhadl pomocí času, kdy model dokončil okruh. Do skriptu jsem dosazoval mnou odhadnuté hodnoty, dokud výstupní graf nebyl identický s mými naměřenými hodnotami. Tento postup jsem udělal pro odezvy lodi při největší rychlosti, tak i při nejmenší rychlosti. Přenosové funkce soustav jsou napsány jako rovnice č.1 a č.2.



Obr. 3: Blokové schéma soustavy

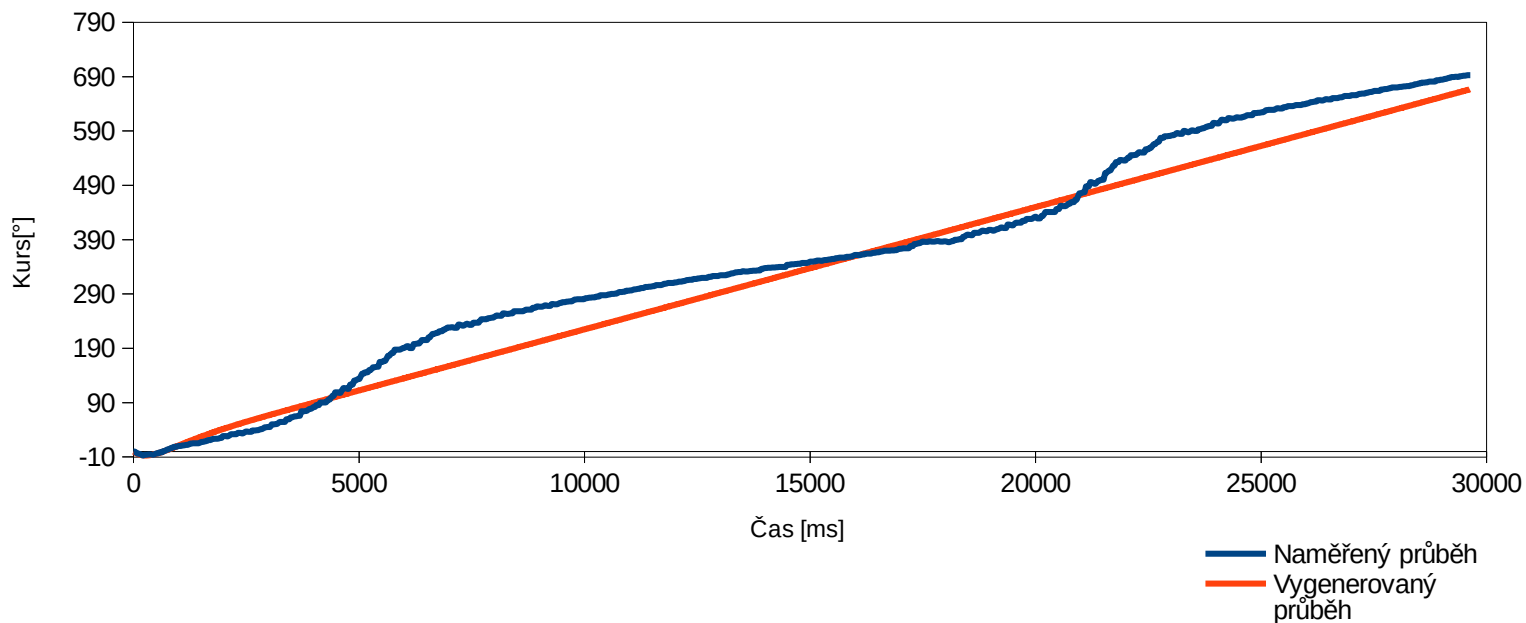
$$K * \left( \frac{1}{p * \tau_I} - \frac{K_d * p}{(1 + p * \tau_d)^{nf}} \right) = 37,5 * \left( \frac{1}{p * 1,525} - \frac{0,47 * p}{(1 + p * 0,35)^2} \right)$$

Rovnice 1: Přenosová funkce soustavy při nejmenší rychlosti

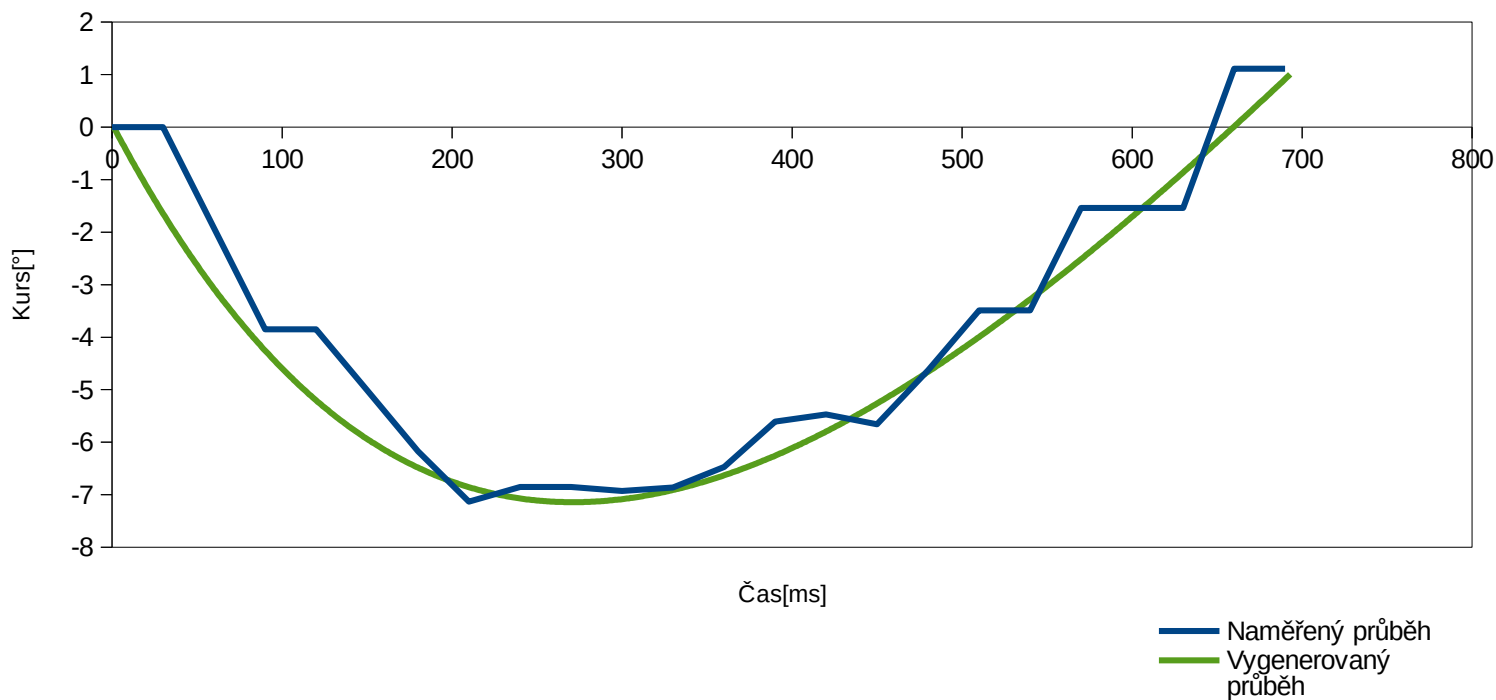
$$K * \left( \frac{1}{p * \tau_I} - \frac{K_d * p}{(1 + p * \tau_d)^{nf}} \right) = 37,5 * \left( \frac{1}{p * 1,333} - \frac{0,7 * p}{(1 + p * 0,25)^2} \right)$$

Rovnice 2: Přenosová funkce soustavy při největší rychlosti

Shodu naměřeného průběhu s vygenerovaným průběhem můžeme vidět na obrázku číslo 4. Nemůžeme počítat s úplnou shodou kvůli vnějším vlivům. Vlivem, který nejvíce ovlivnil průběh, byl stálý proud a vlny, které loď v jedné polovině otočky model zrychlovaly a naopak při druhé polovině zase loď zpomalily.



Obr. 4: Naměřený průběh spolu s vygenerovaným průběhem z programu Matlab



Obr. 5: Přiblížení na zákmit na začátku průběhu



## 4 Realizace regulátoru

### 4.1 Návrh parametrů

Přenosová funkce této soustavy je převzata dalším skriptem, který navrhne konstanty regulátoru.

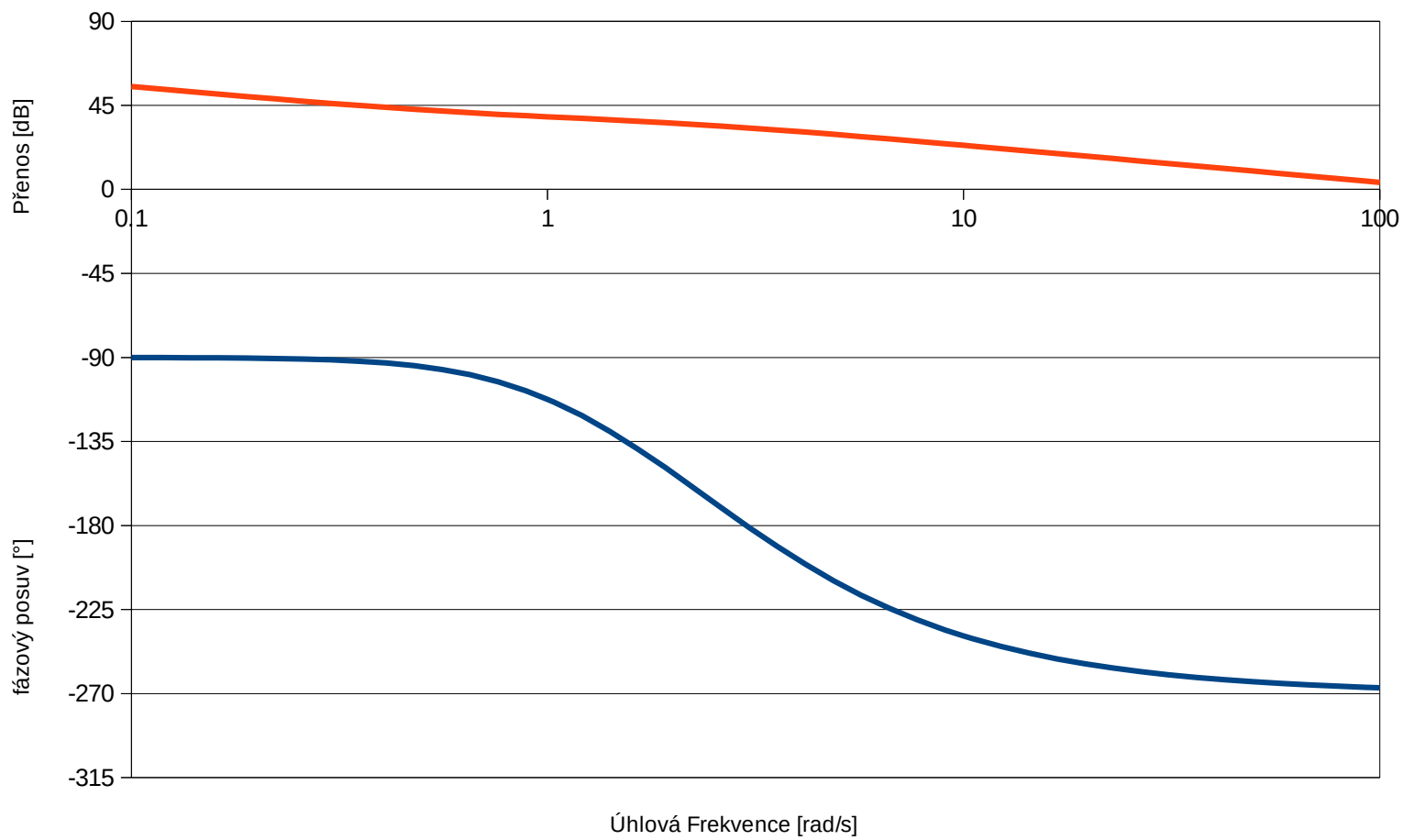
Skript použije frekvenční charakteristiky soustavy, které můžeme vidět na obr. č. 6.

Při návrhu regulátoru vycházím nejprve z fázové charakteristiky otevřené smyčky. Od úhlu  $-180$  stupňů odečtu bezpečnost ve fázi kterou jsem zvolil  $60$  stupňů. Následně najdu na amplitudové charakteristice hodnotu přenosu pro stejnou hodnotu úhlové frekvence. Zesílení regulátoru nastavím tak, aby amplitudová charakteristika otevřené smyčky v tomto bodě procházela nula decibel.

Časovou složku integrační části následně získám tak, že odečtu půl dekády od bodu, kdy amplitudová charakteristika s regulátorem prochází nulou.

Můžeme vidět velkou plochost amplitudové charakteristiky. Malá strmost může ohrozit bezpečnost ve fázi kvůli malému rozdílu zesílení při bezpečnosti a nestabilitou.

Další nebezpečí hrozí při použití mikroprocesoru pro regulátor. Frekvence mikroprocesoru musí být dostatečně vysoká na to, aby neovlivnila bezpečnost ve fázi. Použil jsem vzorkovací frekvenci  $50\text{Hz}$ . Vzhledem k tomu že soustava je vcelku pomalá, je to dostačující.



Obr. 6: Frekvenční charakteristika otevřené smyčky

## 4.2 Implementování regulátoru do modelu lodi

Řízení polohy kormidla je na modelu lodi provedeno přijímáním PWM signálu z přijímače. Perioda signálu je 20ms. Pro přepočtu na frekvenci nám vyjde 50Hz. Protože se kormidlo nemůže volně otáčet, ale pouze 30° na obě strany, tak je omezena i šířka pulzu. A to od 1,2ms do 1,6ms.

Proto jsem se rozhodl implementovat regulátor tak, že odpojím výstup z přijímače od servomotoru a připojím ho na vstup Arduina. Do servomotoru je vyveden signál z Arduina.

Amplituda řídicího signálu do servomotoru je tři volty, jak můžeme vidět na obr. č. 8. Protože je výstup na digitálním pinu mikroprocesoru pět voltů, musel jsem napětí snížit pomocí napěťového děliče, realizovaného pomocí dvou rezistorů.

Vstupní signál do mikroprocesoru vzorkuji a vyhodnocuji, zda má regulátor převzít řízení, či pouze kopírovat požadavek od přijímače. Při výchozí pozici páčky směru na dálkovém ovladači nebo při žádném signálu, převezme řízení regulátor a směřuje loď na námi požadovaný kurs.

Při změně pozice páčky doleva na dálkovém ovladači, Arduino ignoruje požadavek regulátoru a pouze kopíruje vstupní signál. Tato metoda je implementována provizorně z důvodu navrácení lodi ke břehu.

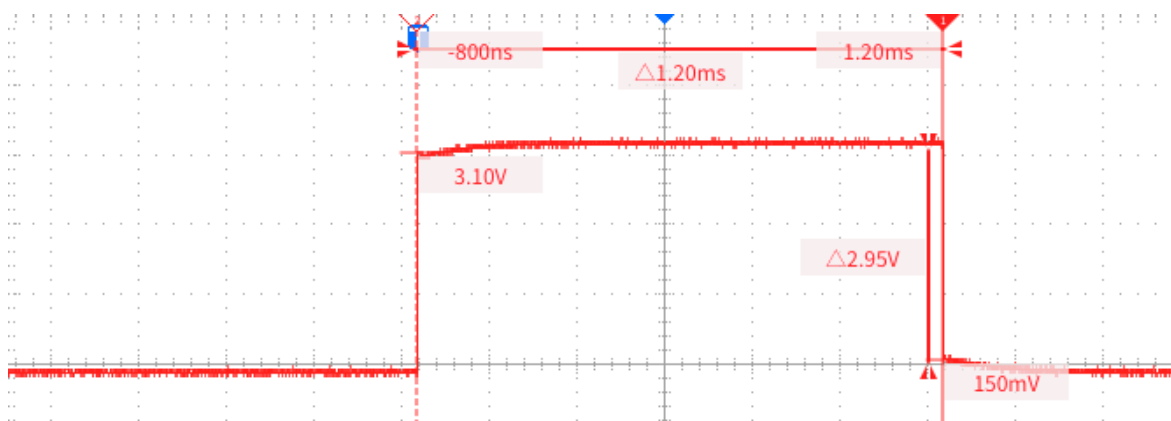
Díky kombinaci nízké frekvence a krátké délce ovládacího pulzu není možné použít hardwarový výstup na Arduinu pro generaci PWM. Rozsah střidy pro ovládání kormidla se pohybuje mezi 6 až 8 procenty. Při použití 8 bitového čítače znamená, že je možné kormidlo natočit pouze do pěti poloh.

Takto malý počet poloh je pro přesnější ovládání nedostačující.

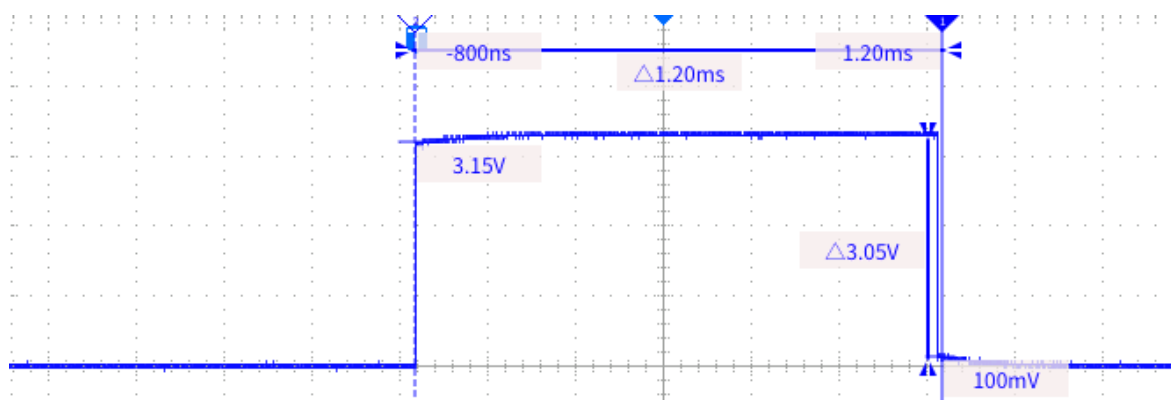
Proto jsem nucen použít jinou metodu generování pulzů a to programovým zápisem do digitálního pinu. Při takto malé frekvenci je tato metoda použitelná. Pro nenarušení běhu programu a správném časování jsou použity přerušení, generované vnitřním časovačem každých 10 mikrosekund.

Díky této metodě vznikl počet použitelných stavů, na sedmnáct. Tuto přesnost při maximální odchylce 30 stupňů již považuji za dostatečnou.

Průběh originálního signálu jdoucí z přijímače můžeme vidět na obrázku číslo 8. Mnou imitovaný signál jdoucí z mikroprocesoru vidíme na obrázku číslo 7. Z průběhů můžeme vidět, že jsou skoro identické.



Obr. 7: Výstup z mikroprocesoru do servomotoru



Obr. 8: Výstup z přijímače

### 4.3 Měření a doladění regulátoru

Pro ověření správné funkce regulátoru, jsem musel upravit program.

Pro zjednodušení měření se při prvním vychýlení páčky doprava, změni požadovaný kurs na aktuální kurs. Odpadne proto ruční nastavování požadovaného kursu.

Abych nepřišel o informaci, jaký je požadovaný kurs, tak se tato hodnota zapíše na první místo v paměti EEPROM. Také se tímto pohybem zapne měření, které zapisuje každých 20ms jak aktuální kurs, tak také výstup z regulátoru.

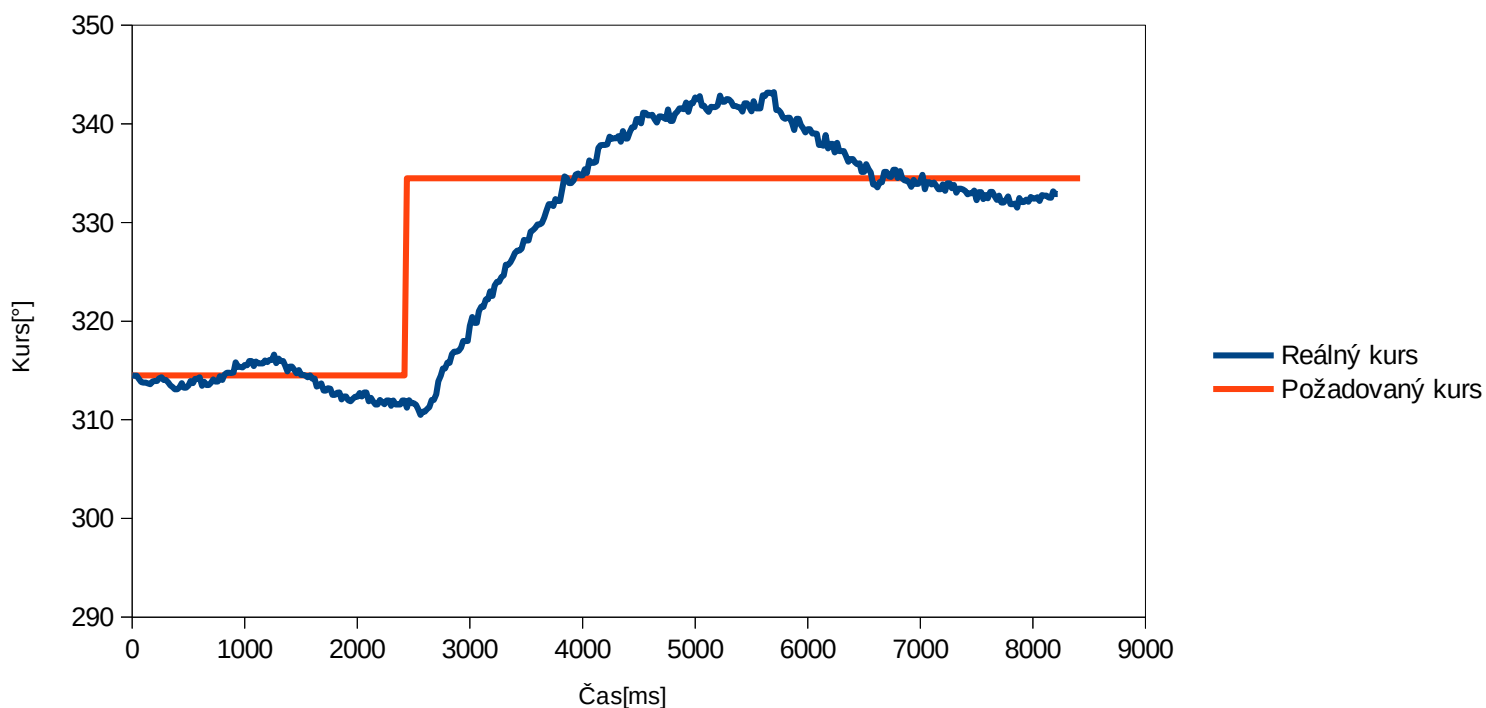
Po ustálení lodi se druhým pohybem doprava páčkou přičte 20 stupňů k požadovanému kursu. Ihned na to se zapíše do paměti EEPROM číslo 600, kvůli rozpoznání změny požadovaného kursu.

Zároveň jsem přidal aperiodický blok, jako filtr do zpětné vazby pro vylepšení regulace. Filtrovaný kurs je ovšem využit pouze P složkou. Časovou konstantu bloku jsem zvolil 0.5.

Při prvním pokusu a použití pouze PI regulátoru s konstantami, vygenerované skriptem z Matlabu, byl výsledek kmitavý. Loď kmitala okolo požadovaného kursu 95 stupňů.

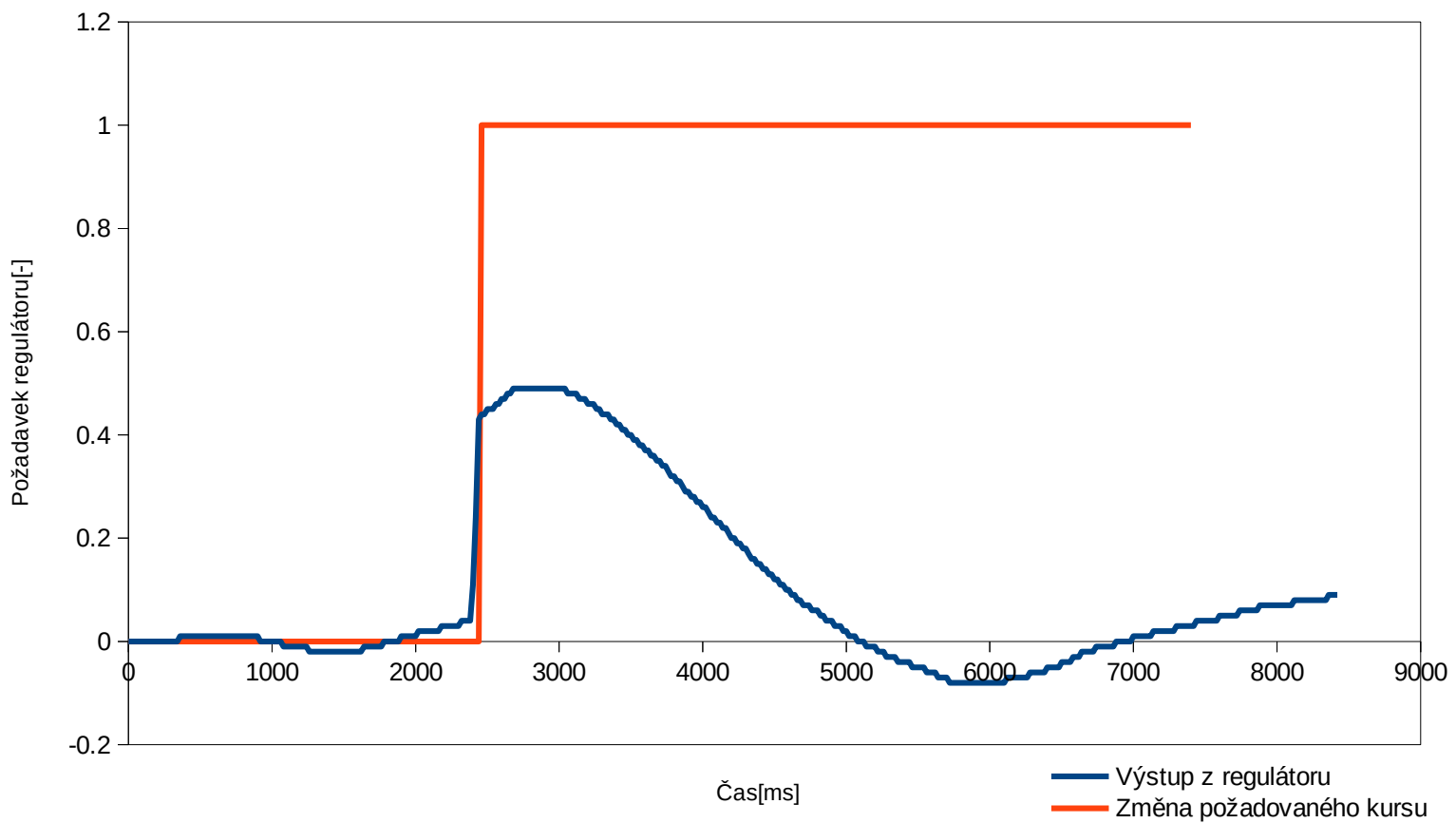
Konstanta pro proporcionální složku byla 0,0196, pro integrační složku byla časová konstanta 2,5.

Při druhém měření jsem třikrát zmenšil účinek integrační složky. Jak můžeme vidět na obr. č. 9, průběh již kmitavý nebyl. Loď byla schopná doregulovat změnu požadovaného kursu. Jsou vidět mírná vychýlení způsobená vnějšími vlivy. Z důvodu rozdělení paměti EEPROM na polovinu, jsem byl omezen počtem hodnot a proto jsem nedokázal naměřit kompletní ustálení.



Obr. 9: Reakce na změnu kursu

Na obrázku číslo 10 můžeme vidět požadavek regulátoru. Impulz z 0 na 1 znamená změnu požadovaného kursu o 20 stupňů. Časové osy obrázcích 9 a 10 jsou sjednocené.



Obr. 10: Výstup z přijímače

## Závěr

Všechny body zadání bakalářské práce byly splněny.

V této bakalářské práci jsem prozkoumal historii automatického udržování kursu lodí. Sepsal jsem první pokusy o automatické řízení kursu lodi v kapitole 2.4. Neúspěchy a pokroky, ze kterých jsem se inspiroval.

Následně jsem provedl výzkum v oblasti senzorů kursu pro použití při návrhu regulátoru. Porovnal různé alternativy a následně vyvodil závěr. Vybral jsem elektromagnetický kompas HMC5883L osazený firmou Adafruit, vzhledem k specifikacím a kompatibilitě s mikroprocesorem.

Jako další krok jsem vybral mikroprocesor pro použití jako regulátor. Vybral jsem mikroprocesor Arduino Mega 2560, díky předchozím zkušenostem, knihovnám a snadné komunikaci se senzorem pomocí I2C.

Na něj jsem vytvořil program pro naměření odezvy na maximální výchylku kormidla. Po změně výchylky kormidla program začal měřit kurs z elektromagnetického kompasu HMC5883L a následně jej zapisovat do paměti EEPROM. Z paměti EEPROM jsem následně tyto data vyčetl po sériovém portu .

S modelem na dálkové ovládání jsem provedl několik měření, vyvodil z nich závěr a vygeneroval přenosovou charakteristiku systému. Vzhledem k vnějším vlivům jsem musel použít alternativní metody při aproximaci matematického modelu soustavy.

Aproximoval jsem přenosovou funkci soustavy pomocí skriptu pro program Matlab. Skript pomocí dosazených hodnot imitoval průběh, který jsem naměřil a tím vytvořil zjednodušený matematický model lodi.

Navrhl jsem regulátor pro model lodi s proporcionální a integrační složkou pro řízení.

Realizoval a implementoval jsem regulátor do modelu lodi. Úspěšně jsem zakomponoval mikroprocesor do obvodů lodi tak, aby řídil servomotor podle hodnot z regulátoru. Úspěšně jsem substituoval signál jdoucí do servomotoru pomocí mikroprocesoru a napět'ového děliče.

Provedl jsem závěrečné měření a doladění parametrů regulátoru. V kapitole 4.3 je graf regulace, kde můžeme vidět správnou funkci regulátoru.

Vzhledem k velikosti modelu lodi se neprojeví problémy, které se projeví při historických pokusech. Na regulaci modelu stačil pouze regulátor PI bez derivační složky.

Po finálním nastavení konstant regulátoru, je uvedený systém řízení kursu lodi plně funkční a odpovídá zadaným požadavkům bakalářské práce.

**Možností navázání práce:**

Jako možné pokračování práce, vidím v zavedení rychlosti jako parametru podle kterého by se měnily parametry regulátoru, pomocí přidání měření rychlosti.

Použití jiného mikroprocesoru, protože mikroprocesor Arduino je sice jednoduchý na programování, ale v některých směrech až nedostačující pro náročné aplikace.

Propojení dálkově mikroprocesor s PC a možnost měnit požadovaný kurs nebo plánovat trasy pro loď s využitím měření rychlosti přes program na PC.

Řízení rychlosti lodi pomocí regulace výkonu motoru.

Vylepšení matematického modelu, aby obsahoval hydrodynamické síly.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Magazín *Automa* [online]. 2003, **2003**(3) [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-znamena-pid-2003\\_03\\_28768\\_3811/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-znamena-pid-2003_03_28768_3811/)
- [2] Zuidweg, J. (1970). *Automatic guidance of ships as a control problem*. 1st ed. Delft: Waltman.
- [3] Bennett, S., & Institution of Engineering and Technology. (1979). *A History of control engineering: 1800-1930*. Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology.
- [4] Gyrokompas. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gyrokompas>
- [5] Roman Gřešek, *Mikrosenzory a mikromechanické systémy*, *Měření magnetického pole* [online]. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2004 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty\\_2004/Gresek/index.htm#\\_Toc88390992](http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty_2004/Gresek/index.htm#_Toc88390992)

## Přílohy

### Příloha A -



*Obr. 11: Foto z měření odezvy na maximální výchylku*