

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky**



**REALIZACE MECHANIKY, ELEKTRONIKY  
A ŘÍZENÍ MODELU VZNÁŠEDLA**

**Design of mechanics, electronics and control for a Hovercraft**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vypracoval: Jiří Vaněk  
Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D.  
Studijní obor: bez oboru  
Rok: 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněk** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **487187**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh a realizace modelu vznášedla**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design and implementation of a hovercraft model**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši na téma principu pohybu a řízení vznášedla.
- 2) Navrhněte konstrukci vznášedla s využitím vhodných prototypovacích nástrojů.
- 3) Navrhněte základní zpětnovazební řízení modelu vznášedla s aktivním řízením výšky polštáře.
- 4) Proveďte praktické testy a zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] AMYOT, Joseph R. (ed.). Hovercraft technology, economics and applications. Elsevier, 2013.
- [2] TANAKA, Kazuo; IWASAKI, Masaaki; WANG, Hua O. Switching control of an R/C hovercraft: stabilization and smooth switching. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2001, 31.6: 853-863.
- [3] SIRA-RAMÍREZ, Hebertt; IBÁÑEZ, Carlos Aguilar. On the control of the hovercraft system. Dynamics and control, 2000, 10.2: 151-163.
- [4] OKAFOR, B. E. Development of a Hovercraft Prototype. 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D., U12110.3**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne \_\_\_\_\_

Podpis \_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Jaroslavu Buškovi, Ph.D. za odborný dohled, vedení a pomoc s mechanickou realizací prototypu. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá zkonstruováním samotného prototypu vznášedla. Následuje návrh zpětnovazebního řízení modelu vznášedla s aktivním řízením výšky polštáře, které je implementováno na reálném prototypu. Pro dosažení toho cíle je potřeba vybrat vhodné prototypovací nástroje jako je motor, regulátor, vrtule a senzor vzdálenosti. Po zkonstruování vznášedla je zprovozněn senzor vzdálenosti, u kterého je zjištěna nelineární charakteristika, vysokofrekvenční šum a kvantizace na vyšších vzdálenostech v jeho rozsahu. Když jsou odstraněny všechny rušivé prvky, jsou naměřeny statické a přechodové charakteristiky, ze kterých je zjištěn přenos systému. Na základě přenosu jsou spočítány parametry PI regulátoru, který je zvolen. Dále je navržen řídicí algoritmus, do kterého je implementováno zpětnovazební řízení s regulátorem a jeho parametry. V závěru jsou provedena porovnání odezvy simulačního a reálného systému, tím je ověřena funkčnost navrženého řízení.

## **Klíčová slova**

Vznášedlo, vzduchový polštář, infračervený senzor, BLDC, zpětnovazební řízení

## **Abstract**

This bachelor's thesis focuses on the construction of hovercraft prototype. Next, there is a feedback control project of hovercraft epitome with active control of air-pack height. This is implemented on a real prototype. To reach this aim it is necessary to choose appropriate tools such as engine, regulator, propeller and distance sensor. After the construction of hovercraft the distance sensor is enabled. On the sensor there are non-linear characteristics, high-frequency buzz and quantization on higher distances of it's range researched. When all disruptive elements are eliminated, static and transitional characteristics are measured out and finally the system relay detected. Based on the relay parameters of chosen PI regulator are reckoned. Next, control algorithm is devised. The feedback control with the regulator and it's parameters are implemented into it. In conclusion the comparison of simulation and real reaction is made and that verifies the functionality of devised control.

## **Keywords**

Hovercraft, air-pack, infra-red sensor, BLDC, feedback control

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b> . . . . .	1
<b>Úvod</b> . . . . .	2
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> . . . . .	3
1.1 Vznášedlo . . . . .	3
1.2 Princip fungování vzduchového polštáře u vznášedel . . . . .	4
1.2.1 Vzduchový polštář . . . . .	5
1.2.2 Pohyb a řízení vznášedla . . . . .	6
1.3 Senzorické vybavení . . . . .	7
1.3.1 Sensory pro měření výšky zdvihu vznášedla . . . . .	7
Ultrazvukové senzory . . . . .	7
Infračervené snímače . . . . .	9
Laserové snímače . . . . .	11
Vyhodnocení . . . . .	11
1.3.2 3-osý gyroskop a akcelerometr GY-521 . . . . .	12
Akcelerometr . . . . .	12
Gyroskop . . . . .	12
1.4 Akční členy . . . . .	14
1.4.1 Elektromotory . . . . .	14
BLDC motory . . . . .	14
1.4.2 Vrtule . . . . .	15
1.4.3 Regulátory otáček . . . . .	15
PWM signál . . . . .	15
1.4.4 Servomotory . . . . .	16
1.4.5 Mikrokontroler . . . . .	16
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b> . . . . .	17
2.1 Konstrukce prototypu vznášedla . . . . .	17
2.1.1 Paluba . . . . .	17
2.1.2 Sukně vznášedla . . . . .	18
2.1.3 Kryt vrtule a rozvaděč vzduchu . . . . .	18
Výroba dílů na 3D tiskárně . . . . .	19
2.2 Infráčervený senzor pro měření vzdálenosti . . . . .	20
2.2.1 Nelineární charakteristika snímače vzdálenosti na analogový výstup . . . . .	21
Identifikace nelineární uživatelské charakteristiky . . . . .	21
2.2.2 Filtrace signálu . . . . .	23
Vlastnosti systému omezující filtraci . . . . .	24
Volba vhodného filtru . . . . .	25
Nespojitost signálu ve vyšších výškách . . . . .	26

2.3	Identifikace matematického modelu . . . . .	28
2.3.1	Statické vlastnosti systému . . . . .	28
	Linearizace . . . . .	30
2.3.2	Dynamické vlastnosti systému . . . . .	31
	Lineární statický model popsáný diferenciální rovnicí druhého řádu . . .	32
	Aproximační metoda prof. Strejce . . . . .	32
2.4	Návrh řídicího algoritmu . . . . .	34
2.4.1	Výběr regulátoru a nastavení parametrů zpětné vazby . . . . .	34
2.4.2	Diskretizace PI regulátoru . . . . .	36
2.4.3	Implementace řídicího algoritmu . . . . .	37
2.5	Experimentální verifikace . . . . .	38
	<b>Závěr</b> . . . . .	41
	<b>Seznam použité literatury</b> . . . . .	43

## Seznam použitých zkratek

API	application programming interface
PLA	polylactic acid
IMU	inertial measurement unit
BEMF	Back electromotive force
ESC	Electronic speed control
PWM	Pulse Width Modulation
BLDC	Brushless DC motor
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanické Systémy
DOF	Degrees of freedom
DSP	Digitální signálový procesor
CCD	Charge-coupled device
FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave
TOF	Time of flight
UZ	Ultrazvuk
IR LED	infrared light emitting diode
PSD	Position Sensitive Detector



# Úvod

Asi jako každý z nás mám rád, když je za mnou odvedená práce vidět. Proto jsem věděl, že by moje bakalářská práce měla obsahovat kreativní praktickou část. V posledních semestrech mě velice zaujal předmět automatické řízení a následovaly ostatní předměty s elektřinou, které jdou ruku v ruce s automatickým řízením. Když jsem viděl, že je v nabídce témat bakalářka práce, kde je možnost si zkonstruovat svůj vlastní model vznášedla a následně ho řídit a regulovat jeho výšku, měl jsem jasno.

Realizace celého prototypu vznášedla by vyžadovala řešení komplexní problematiky skrz mnoha vědními disciplínami, od návrhu konstrukce modelu a sensoriky s příslušnou elektronikou potřebnou pro zpracování signálu přes teorii automatického řízení, identifikaci matematického modelu, až po samotnou programovou implementaci řídicího algoritmu. Práce by byla vedena, skrze všechna tato témata, spíše do šířky než do hloubky jednoho konkrétního problému. I proto jsem zrealizoval pouze jeden segment celého vznášedla, kde se zabývám pouze regulací výšky, kterou bych poté použil u kompletního modelu vznášedla.

Ke zpestření samotného segmentu, na konci své práci, přidělám konstrukci krytu s pohonnou vrtulí, která bude mít za sebou sadu tří kormidel a ty budou otáčeny pomocí servomotoru. Dále budu tento pohyblivý segment nazývat vznášedlem.

Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části v kap. 1.1 vznášedlo obecně představím s jeho výhodami používání. V další kapitole (1.2) popisují princip fungování vzduchového polštáře u vznášedel. Kap. 1.3 je věnována přehledu možností pro snímání výšky zdvihu vznášedla, ze kterých následně vyberu nejvhodnější variantu. V kap. 1.4 popisují vybrané akční členy, které vyhovují požadavkům, ze kterých následně zkonstruuji model vznášedla pro praktickou část.

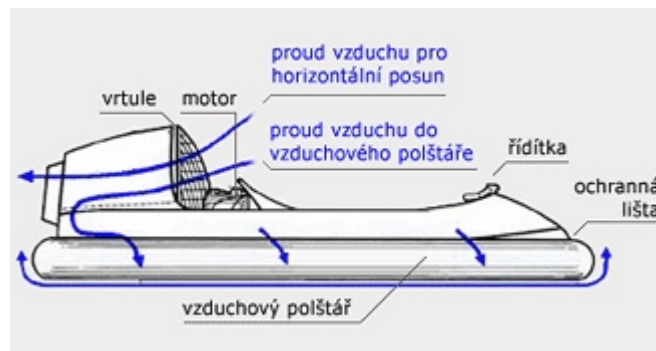
V praktické části je kap. 2.1 věnována zkonstruování modelu vznášedla a výrobě dílů na 3D tiskárně. Sensorickému vybavení se věnuji v kap. 2.2. Zde je uveden vybraný snímač, u kterého bylo nejprve potřeba popsat jeho nelineární závislost a poté odstranit šum ze signálu. Tento senzor jsem použil pro účely zpětné vazby řídicího algoritmu a pro experimentální ověření. V kap. 2.3 se zabývám identifikací matematického modelu, který jsem identifikoval pomocí diferenciální rovnice. Zprvu bylo však potřeba zjistit statické a dynamické vlastnosti systému, ze kterých matematický model vychází. V další kap. 2.4 je uveden navržený regulátor s potřebnými parametry, a také řídicí algoritmus implementován na konkrétní platformě. Poslední kapitolu (kap. 2.5) jsem věnoval k ověření dosažených výsledků a jejich zhodnocení.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Vznášedlo

Vznášedlo je univerzální prostředek, pro který není změna terénu žádný problém. Je to nejmladší dopravní prostředek, který má mnoho společného s ostatními prostředky, zejména s loděmi a letadly. Proto není náhoda, že vznášedlo vzniklo právě z původního nápadu na snížení hydrodynamického odporu lodi, pomocí nadnášejícího vaku.

Základní poznatek, jenž je potřeba napsat je, že vznášedlo nelétá, ale pouze se vznáší. Kolem celého obvodu vznášedla je připevněný speciální pružný plášť nebo také sukně, která brání unikání vzduchu vhnášeného vrtulemi. Pod trupem vznášedla se tak tvoří trvalý přetlak, který stroj nadzvedává.



Obr. 1: Vznášedlo, které využívá single-propeller systém [1]

První zmínky o vznášejcím vzduchovém polštáři začaly už před třemi staletími, avšak kompletní dopravní prostředek pohybující se na vzduchovém polštáři byl zkonstruován až v 50. letech minulého století britským elektrotechnikem a vynálezcem Christopherem Sydney Cockerellem. Zprvu nebyla vznášedla příliš rozšířená, vzhledem k jejich vysokým výrobním nákladům. Až vlivem vývoje moderních materiálů, ze kterých vznikaly lehčí a výkonnější spalovací motory, se zájem o vznášedla plně rozběhl [1], [2]. Začaly velké výzkumy a zlepšování zastaralých prototypů. V pozdějších letech byla vznášedla zdokonalena a stala se důležitým transportním obojživelným prostředkem tam, kde neexistují běžné dopravní cesty.

Právě pro jejich komplexnost se vznášedla skvěle hodí pro záchranné akce při povodních, bouřích, sněhových závějích a lavinách. Často se také využívají při záchranných akcích na místech, kam se není možno dostat žádným jiným dopravním prostředkem [2]. Kromě využití pro vojenské, záchranné i výzkumné a ekologické účely slouží dnes tyto stroje většinou jen pro zábavu a závodní soutěžení.

## 1.2 Princip fungování vzduchového polštáře u vznášedel

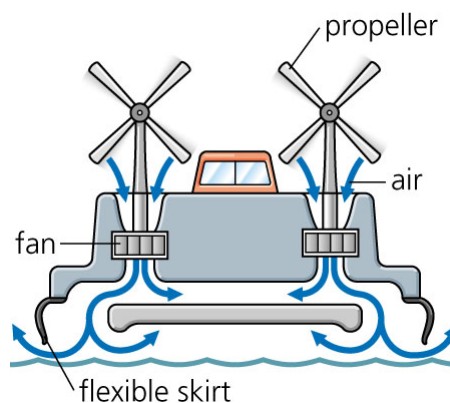
Jak už bylo jednou řečeno, vznášedlo nelétá, pouze se vznáší lehce nad zemí pomocí vzduchové polštáře. Ve vzduchovém polštáři je flexibilně udržován vzduch, čímž se tvoří trvalý přetlak, bez kterého by vznášedlo nefungovalo. Jelikož je mezi vzduchovým polštářem vznášedla a zemí malá vzduchová mezera, je absolutně nezávislé na povrchu, po kterém pluje.

K vytvoření přetlaku je potřeba výkonná vrtule, která nepřetržitě dodává vzduch pod vznášedlo a odolný a zároveň elastický plášť, který je připevněn kolem obvodu trupu a zabraňuje rychlému úniku vzduchu. To je právě ta velká výhoda, kterou má vznášedlo vůči například vrtulníku nebo dronu. Výkon motoru, který otáčí vrtulemi, pak nemusí být tak veliký, jelikož proudící vzduch od vrtulí ihned neodchází do okolí, ale je shromažďován ve vzduchovém polštáři. To znamená, že dodávka vzduchu nemusí být tak intenzivní jako tomu je u ostatních strojů, které fungují na podobném aerodynamickém vztlakovém principu.

Existují dva systémy, které řeší vhánění vzduchu pod trup vznášedla a zároveň pohyb vznášedla. Nazývají se single-propeller a multi-propeller systémy.

Single-propeller systém, viz obr. 1, jak už je z názvu jasné, zahrnuje pouze jednu vrtuli, která zajišťuje jak pohyb vznášedla, tak vytváření vzduchového polštáře. Nedílnou součástí tohoto systému je rozdělovač, který je umístěn kousek za vrtulí a rozděluje, jaká část vzduchu půjde do trupu, kde je rozdělena kanálky pod celé plavidlo a vytváří vzduchový polštář, a jaká bude obstarávat pohyb vznášedla. Výhodou tohoto systému je bezpochyby hmotnost. Jednotný systém pro obě nejdůležitější funkce šetří místo i hmotnost díky absenci dalších systémů [3].

Multi-propeller systém, viz obr. 2, je poněkud složitější než single-propeller. To ale neznamená, že je jednoznačně horší. Rozdíl je v tom, že o vhánění vzduchu pod plavidlo se stará jiná, menší vrtule, která je ovšem napojena na stejný motor jako vrtule pohonná. To znamená, že tento systém také využívá jednu pohonnou jednotku jako single-propeller systém [3].



**Obr. 2:** Vznášedlo, které využívá multi-propeller systém [3]

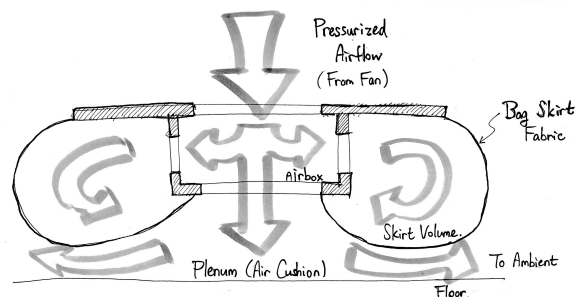
Při konstruování modelu jsem nezvolil ani jeden z těchto systémů, jelikož při řízení výšky jsem potřeboval, aby byla pohonná vrtule separována od vrtule, která bude vhánět vzduch do pláště. Proto jsem použil dva na sobě nezávislé motory, i když to není, co se hmotnosti týče, zcela ideální.

### 1.2.1 Vzduchový polštář

Vzduchový polštář neboli plášť, který je nepřetržitě naplňován vzduchem. Je prvek, který ze vznášedel dělá vznášedla, protože bez pláště by se nevytvořil pod tělem plavidla vzduchový polštář a bez vzduchového polštáře by se vznášedlo nepohybovalo.

Moderní materiály plášťů jsou dnes textilie potahované plastem. Tyto materiály jsou dobře zpracovatelné, cenově snadno dostupné a plasty jim dávají potřebnou odolnost a pružnost. Velikost zdvihu závisí na konkrétní funkci vznášedla, může se pohybovat od jednotek centimetrů u osobních vznášedel až po jednotky metrů u velkých dopravních strojů [3], [4].

V dnešní době se používají tři druhy plášťů. Nejméně používaný je klasický vak, viz obr. 3, který funguje na stejném principu jako duše od kola. Vak se nafoukne a je v něm daleko větší tlak než ve vzduchovém polštáři pod trupem. Toto řešení není zdaleka optimální, jelikož sebemenší poškození vaku způsobí nefunkčnost vznášedla a plášť je třeba celý vyměnit. Výhodou je jednoduchost konstrukce.



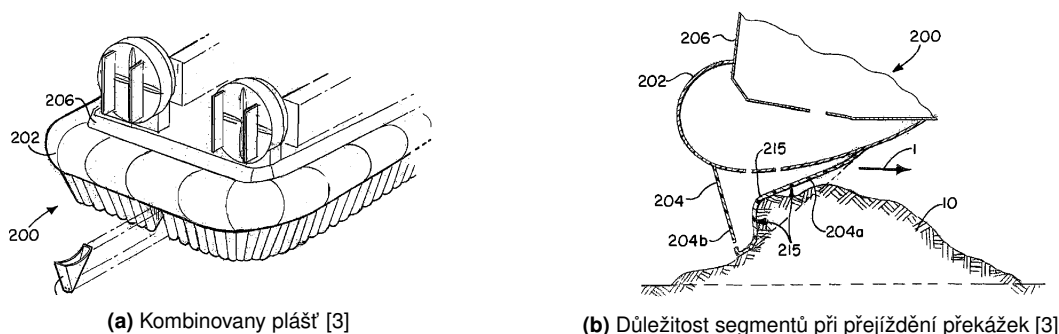
Obr. 3: Vzduchový polštář tvořený vakem [3]

Nejčastěji se používá segmentový plášť, viz obr. 4, který má vzduchovou kapsu rozdělenou do několika segmentů. Na základě této inovace nedochází k takovým ztrátám vzduchu při přejíždění větší nerovnosti, jelikož se při tomto manévru lehce zdeformuje každý segment samostatně a vzduch uniká pouze z těch, které se zdeformují [4]. Další výhodou segmentového pláště je, že v případě poškození jednoho nebo více segmentů je plášť stále schopný provozu, protože zbylé funkční segmenty se roztáhnou a zaplní vzniklou mezeru. Následná oprava jednotlivých segmentů pláště je mnohem levnější, protože se vymění pouze poškozené segmenty.



**Obr. 4:** Segmentové provedení pláště pro závodní vznášedla [4]

Jak je možné vidět na obr. 5a, tento typ pláště kombinuje vak se segmenty, proto ho nazýváme kombinovaný. Je to ideální řešení pláště pro vznášedla. Kombinované řešení uplatňuje výhody obou řešení, jednoduchost a malou spotřebu materiálu vakového pláště. Horní část je tvořena vakem, který je důležitý pro stabilitu, například při zatáčení. Pod vakem jsou segmenty, do kterých vede vzduch skrz vak [3]. Segmenty zajišťují větší komfort při přejíždění překážek, viz obr. 5b. Když dojde k poškození, stačí vyměnit pouze zničené segmenty. Nevýhodou tohoto řešení je náročnost konstrukce a větší hmotnost.



(a) Kombinovaný plášť [3]

(b) Důležitost segmentů při přejíždění překážek [3]

**Obr. 5:** Zobrazení výhod kombinovaného pláště

## 1.2.2 Pohyb a řízení vznášedla

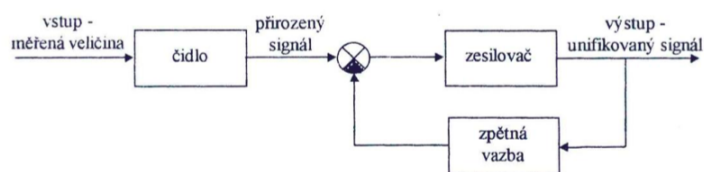
Pohyb vznášedla dopředu bude obstarávat pohonná vrtule s motorem na zádi vznášedla. Kvůli vířivému pohybu vzduchu na koncích listů je motor s vrtulí usazen do aerodynamického krytu, čímž se předchází snížení účinnosti vrtule. Tento prvek převzala vznášedla od letadel. Pohyb dozadu neboli brzdění jsem na svém modelu neřešil, jelikož konstrukce brzdného systému by byla složitá. Jedním řešením je pomocí ploch, které se při brzdění otočí do pozice, kde za vrtulí zachytávají vzniklý proud vzduchu. Ten je díky jejich tvaru nasměrován do opačného směru, než se vznášedlo pohybuje [3].

Pro řízení nebo spíše zatáčení vznášedla jsem navrhl konstrukci tří kormidel, která budou přidělena přímo za pohonnou vrtulí ke krytu. Pohon kormidel je servomotor, který bude zajišťovat posun doleva a doprava, a tím otáčet vznášedlem.

## 1.3 Senzorické vybavení

V této části se budu zabývat možnostmi volby senzoru pro snímání výšky zdvihu vznášedla a senzoru pro analýzu pohybu pomocí snímání úhlové rychlosti a zrychlení. Pro snímání výšky uvedu uvažované volby senzorů, které využívají optické, infračervené nebo ultrazvukové principy.

Nejprve bych chtěl na základě blokového schématu, viz obr. 6, senzor obecně popsat. Je to funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím [5]. Pojem senzor je ekvivalentní pojmu snímač, převodník nebo detektor. Citlivá část senzoru se občas označuje jako čidlo. Senzor jako primární zdroj informace snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určitého definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu, nejčastěji na veličinu elektrickou [6].



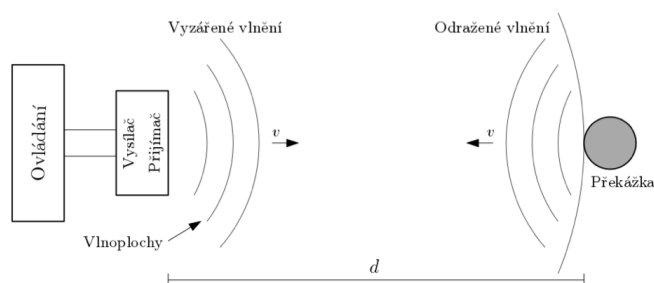
Obr. 6: Blokové schéma snímače [5]

### 1.3.1 Senzory pro měření výšky zdvihu vznášedla

Snímače vzdálenosti se rozdělují na dvě základní kategorie, a to na kontaktní a bezkontaktní. V mé práci není dotyk při měření výšky možný, takže budu preferovat senzory bezkontaktní.

### Ultrazvukové senzory

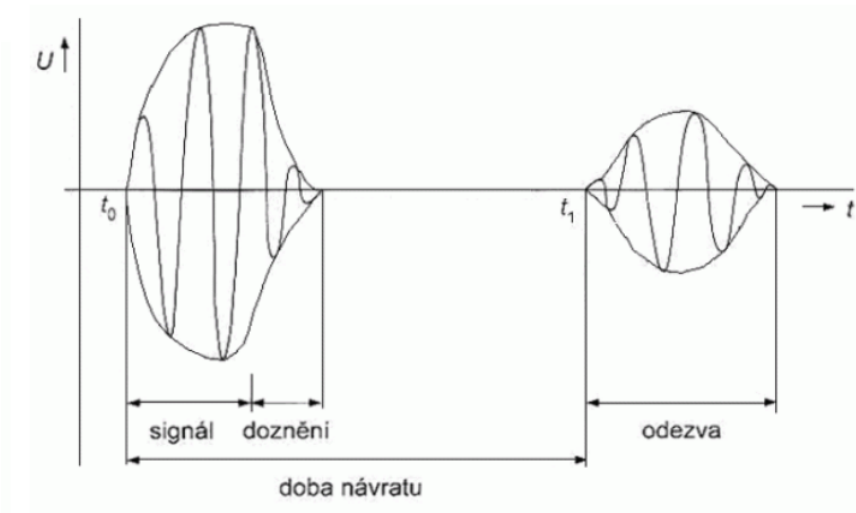
Jak už plyne z názvu ultrazvukový senzor využívá k měření ultrazvukové vlny, které patří mezi akustické vlny a mají frekvenční rozsah od 20 kHz až do 1 GHz. Tato frekvence je nad hranicí lidské slyšitelnosti.



Obr. 7: Ukázka měření ultrazvukovým snímačem [7]

Snímač se skládá z vysílače a přijímače, které jsou tvořeny z měničů zvuku, vyhodnocovací elektroniky a oscilátoru, viz obr. 7. Jako měniče zvuku se běžně používají piezokeramické měniče. Základním materiálem takového měniče jsou piezoelektrické krystaly, které však kvůli vysoké ceně nahradila piezokeramika. V provedení měničů v senzorech jde o keramický kotouček slepený se stejně velkým kovovým kotoučkem nebo kotoučkem ze směsi skla a pryskyřice. Přiložením napětí změní piezokotouček svůj průměr, vzniknou příčné síly a dojde k prohnutí celého systému s velkou amplitudou. K buzení měniče v senzorech se pak využívá krátkodobě spínaný oscilátor naladěný na rezonanční frekvenci měniče [7].

Senzory pro měření vzdálenosti pracují na principu měření času odezvy neboli echa, viz obr. 8 [7]. Jak je možné vidět na obrázku, měnič ve vysílači vyšle v časovém okamžiku  $t_0$  několik impulsů, které se šíří daným prostředím rychlostí zvuku. Jakmile tyto impulsy narazí do překážky, část se jich odrazí a po určité době  $t_1$  dojde k návratu zpět do přijímače.



**Obr. 8:** Princip ultrazvukové detekce objektu vysláním signálu a detekcí odražené odezvy [7]

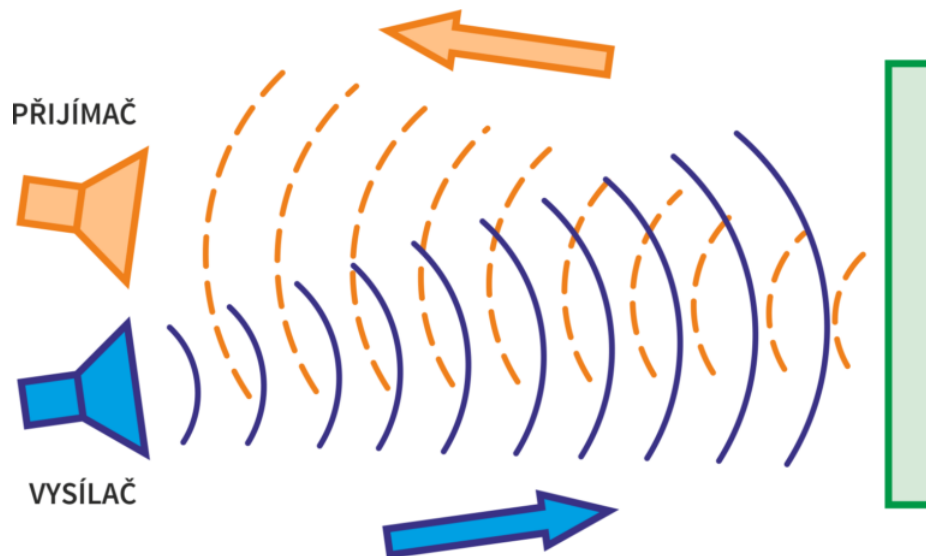
Po změření doby letu signálu a znalosti rychlosti vzduchu  $v_\tau$  v daném prostředí se vzdálenost  $l$  předmětu určí ze vztahu (1.1) a (1.2), kde  $\tau$  je teplota vzduchu a  $t$  je čas mezi vyslaným a přijatým signálem ( $t_1 - t_0$ ) [8].

$$v_\tau = (331,57 + 0,607\tau) \quad (1.1)$$

$$l = \frac{v_\tau t}{2} \quad (1.2)$$

Nevýhoda tohoto systému s jedním měničem je (tento typ můžeme vidět na obr. 7), že po vyslání impulsu není možný okamžitý příjem odezvy, musí se počkat až měnič dokmitá, jinak by byl přijímaný signál ovlivněný a hodnoty by nebyly správné [7]. Tato doba se nazývá nefunkční pásmo nebo také slepá zóna.

Existují také ultrazvukové senzory, které mají přijímač a vysílač oddělený, viz obr. 6. U tohoto provedení není zapotřebí čekat, než vysílaný signál dokmitá, je možné okamžitě signál snímat, a tím nevzniká slepá zóna.



Obr. 9: Princip detekce překážek ultrazvukem, který má oddělený vysílač a přijímač [24]

## Infračervené snímače

Tyto senzory používají k měření vzdálenosti radiové vlny, které jsou součástí spektra elektromagnetického záření. Radary využívají pro svoji činnost kmitočty od stovek kHz až do 110 GHz. Stejně jako ultrazvukové senzory jsou schopny pokrýt větší oblast, a to až všesměrově s rozsahem 360°, všestranný rozsah se samozřejmě projevuje na snižování dosahu a přesnosti, nebo naopak usměrnit do roviny či do úzkého paprsku s řádově větším dosahem. Paprsek lze usměrnit pomocí reflektorů.

Výhodou metody měření pomocí radiových vln oproti ostatním metodám je možnost proniknutí tohoto záření skrze mraky, sníh, mlhu, a také pevné materiály jako jsou plasty a sklo. To umožňuje skrýt senzor do zařízení a chránit ho tak vůči vnějšímu poškození. Měření však může být narušeno jinými radiovými vlnami stejných či jiných frekvencí [9].

Základní princip měření vzdálenosti se od ultrazvukových snímačů neliší. Také se jedná o zjištění doby letu viz obr. 8, pouze ke své činnosti využívá elektromagnetické vlny namísto ultrazvukových.



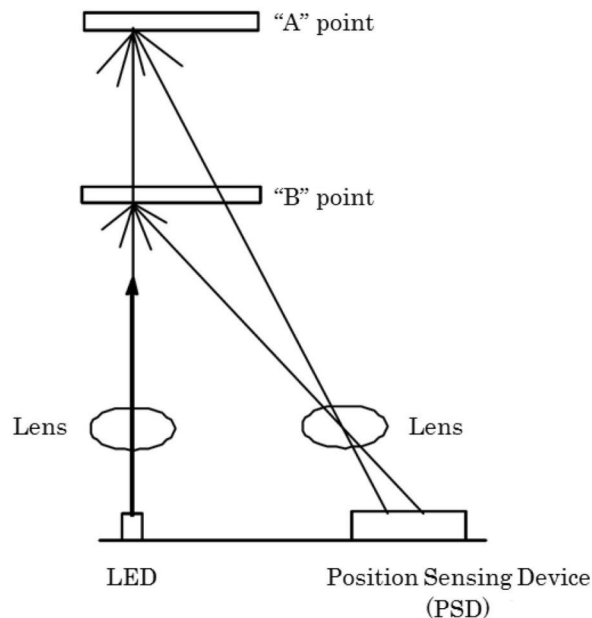
Doba letu je čas, který potřebuje vyslaná elektromagnetická vlna na překonání vzdálenosti od vysílače k překážce a zpět. Z doby letu  $t$  a známé rychlosti šíření elektromagnetické vlny  $c$  prostorem pak snadno můžeme spočítat vzdálenost cíle od antény  $R$  podle vztahu (1.3) [10].

$$R = \frac{c}{2} \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

### Triangulační infračervené snímače

Nejčastější vyhodnocovací metodou je právě triangulační. Infračervené senzory vzdálenosti se skládají z integrované kombinace PSD, IR LED a obvodu pro zpracování signálu, kdy je známa vzdálenost mezi IR LED, místem jeho dopadu po odražení od překážky PSD a úhel vyslaného paprsku [11]. Obvod zpracovává polohu optického bodu na PSD, aby určil polohu (vzdálenost) reflexního objektu [12]. Na výstupu je analogový signál, který závisí na poloze objektu před senzorem.

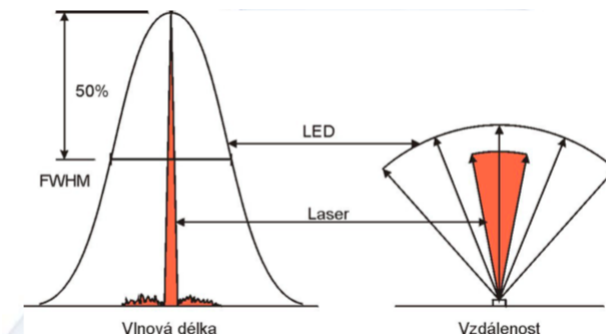
LED emituje paprsek infračerveného světla, který je usměrňován čočkou, následně dopadá na překážku. Když se paprsek světla odrazí od objektu, odražený paprsek se zachytí na PSD a na něm se vytvoří „optický bod“. Vzdálenost se vypočítá pomocí triangulace paprsku světla. Když se změní poloha objektu, změní se také úhel odraženého paprsku a poloha bodu na PSD. Viz bod A a bod B na obr. 10 [11].



**Obr. 10:** Princip triangulace [11]

## Laserové snímače

Další možností je použít laserové senzory. Jsou to optické snímače a jako vysílací prvek používají laserovou diodu s vlnovou délkou  $\lambda = 650 \div 670 \text{ nm}$ , která je zdrojem koncentrovaného koherentního světla [13]. Laserem je vytvářeno optické záření, které je oproti infračervené diodě soustředěno do velmi úzkého intervalu vlnových délek  $\lambda$ , jak je možné vidět na obr. 11 [14].



**Obr. 11:** Porovnání LED a laseru [14]

Podobně jako UZ snímače, pracují i laserové snímače na principu TOF. Další používaný princip měření je, že vysílaný signál je fázově modulován, a my tedy měříme pouze rozdíl mezi fází vyslaného a odraženého paprsku. Tato metoda se nazývá FMCW [15].

Oblíbenou metodou měření mezi výrobci snímačů je triangulace, s touto metodou už jsme se setkali v předchozí kapitole, kde je tento princip znázorněn na obr. 10 Jako zdroj světla (vysílač) se obvykle využívá polovodičová laserová dioda a jako přijímač obvykle CCD snímač, jehož elektrický signál zpracovává rychlý signálový procesor (DSP) [16].

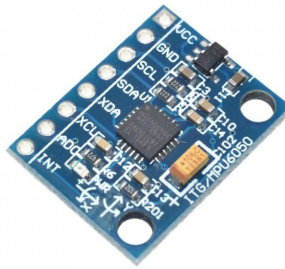
Velkou výhodou těchto snímačů je téměř nulová závislost měření na tvaru detekovaného objektu, ale také na parametrech vzduchu a drsnosti povrchu překážky. Další výhodou je také malá závislost na odrazivosti povrchu a natočení objektu vzhledem ke snímači.

## Vyhodnocení

Na základě všech získaných informací jsem se rozhodl použít triangulační infračervený senzor. Ve srovnání s ultrazvukovými senzory mají obecně radarové senzory návrh v odolnosti vůči vlivu prostředí, přesnosti a také nejsou tolik ovlivňovány prašným prostředím. Oproti laserovým snímačům jsou cenově mnohem přívětivější, ale přesnost těch laserových je mnohem větší. Avšak pro mé měření není tak vysoká přesnost potřebná.

### 1.3.2 3-osý gyroskop a akcelerometr GY-521

Srdcem modulu je čip MPU-6050, viz obr. 12, od InvenSense, který nabízí jak akcelerometr, tak gyroskop. Modul GY-521 s námi komunikuje pomocí sériového rozhraní I2C. Jelikož už komunita napsala hromadu knihoven, budu používat právě jednu z nich. I to je důvodem, proč jsem si vybral právě tento modul [17].



**Obr. 12:** GY-521 s gyroskopem a akcelerometrem [17]

Jedná se tedy o kombinovaný čip, který měří dohromady všech šest pohybových os. O takovém zařízení říkáme, že zvládá 6-DOF.

Oba senzory, akcelerometr i gyroskop, patří do tzv. MEMS. Jedná se o konstrukce velmi malých rozměrů od 0,001 ÷ 0,1 mm. K výrobě se využívá technologií z produkce mikroelektroniky, jako je např. selektivní leptání nebo iontové odprašování [17].

#### **Akcelerometr**

Už podle svého názvu měří pohybovou akceleraci – zrychlení a to ideálně ve všech třech osách trojrozměrného světa. Pak mluvíme o tzv. trojosém akcelerometru. Senzor měří zrychlení pohybu dopředu a dozadu, doleva a doprava a nahoru a dolů. Použitím trojice akcelerometrů kolmých na sebe lze přímo měřit i náklon ve všech osách, jelikož výslednice zrychlení je konstantní 1 g. Za předpokladu, že akcelerometr zrychluje, velikost tohoto zrychlení se sčítá s tíhovým zrychlením a výslednice není rovna 1 g. Výpočet náklonu poté selhává [18].

#### **Gyroskop**

Gyroskop měří úhlovou rychlost (změna úhlu pootočení za určitý čas) využitím Coriolisovy síly. Gyroskop je srdcem umělých horizontů v letadlech, stará se o orientaci v kosmických lodích atp.

Akcelerometr by naopak tyto úhly (a to spolehlivě jen dva z nich) dokázal spočítat jen v klidu, protože jakýkoliv pohyb tělesa toto měření silně ovlivní a výsledkem bude jen těžko interpretovatelný šum. Z tohoto senzoru jsme měřením schopni získat úhel naklonění okolo osy X (klonění, roll), okolo osy Y (klopení, pitch) a otočení v rovině okolo osy Z (otáčení, yaw) [17].

Gyroskop nám tedy oproti akcelerometru dodá informaci o otáčení v rovině, k čemuž bychom jinak potřebovali kompas. Ovšem hlavní rozdíl spočívá v tom, že gyroskop tyto úhly  $0 \div 360^\circ$  změří nehladě na zrychlení tělesa, ve kterém je umístěn, a gravitaci.

## 1.4 Akční členy

V této kapitole se věnuji akčním prvkům. V mém modelu figurují dva elektromotory BLDC, které jsou osazené vrtulemi. Sériově je k motorům zapojený regulátor otáček ESC, který pomocí PWM postupně spíná jednotlivé cívky statoru, tak dochází ke vzniku točivého momentu [22]. Zatačení vznášedla zajišťuje servomotor, ke kterému jsou přidělané kormidla, a ty se nacházejí přímo za pohonným motorem s vrtulí. Vše je řízeno mikrokontrolerem.

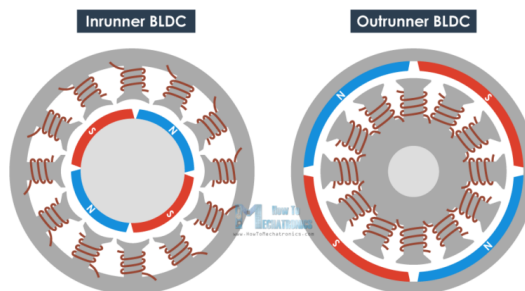
### 1.4.1 Elektromotory

Elektromotor je točivý elektrický stroj, který převádí elektrickou energii na mechanickou (motorický režim) nebo naopak mechanickou na elektrickou (generátorický režim). Dělí se podle vstupního, případně výstupního napětí na střídavé a stejnosměrné. Elektromotor se skládá ze dvou hlavních částí, a to ze statoru a rotoru. Rotor je pohyblivá a stator pevná část stroje [19].

### BLDC motory

Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC) patří mezi synchronní elektromotory. To znamená, že magnetické pole generované státorem a magnetické pole generované rotací magnetů jsou na stejné frekvenci.

Jak je možné vidět na obr. 13, existují dvě varianty složení. Jedna z nich je, že se bezkartáčový DC motor skládá z permanentních magnetů zabudovaných na rotoru s lichoběžníkovým tvarem BEMF a statorovým vinutím. U prvního typu sestavení se tedy bezkartáčové DC elektromagnety nepohybují, místo toho rotují permanentní magnety a vinutí statoru je statické [21].



**Obr. 13:** Dvě možnosti provedení statoru a rotoru u BLDC motorů [21]

Jak už název naznačuje, BLDC motory nevyužívají pro komutaci kartáče, ale cívky jsou komutovány elektronicky. Díky tomu dosahují vyšší spolehlivosti než klasické DC motory [20].

Výběr motorů je závislý na konstantě  $K_v$ , parametrech baterie a regulátoru otáček. Hodnota  $K_v$ , neboli rpm/V, je konstanta, která popisuje rychlost otáčení motoru v závislosti na napětí baterie.

Na základě požadavků na motor pro svůj prototyp jsem vybral BLDC motor, který je aplikován pouze na samotné vznášení, a to od firmy Turnigy - viz obr. 14.



**Obr. 14:** Turnigy Park300 Brushless Outrunner 1600kv [20]

### 1.4.2 Vrtule

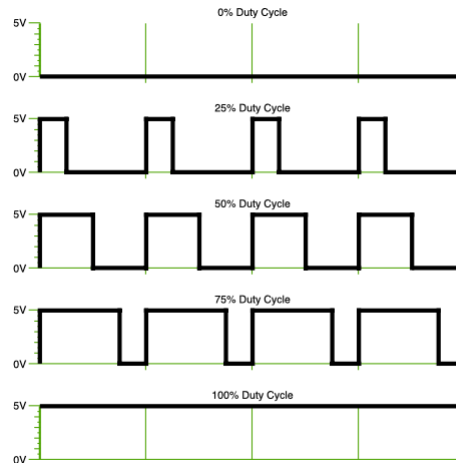
Hlavními parametry vrtulí je průměr a stoupání, nejčastěji uvedené v palcích. Ke každému motoru výrobce většinou poskytuje tabulku, kde je ke každému motoru vypsán doporučený průměr a stoupání vrtule. Materiál používaný výrobcem vrtulí je buď plast anebo karbon.

### 1.4.3 Regulátory otáček

Regulátor otáček ESC, jak už jsem výše zmiňoval, je sériově zapojen s motorem. Jedná se o řídicí jednotku motoru, která zajistí plynulý chod. Regulátor ovládám přes PWM signál. Při výběru regulátoru je potřebné znát napětí pohonného akumulátoru a odebíraný proud motorem [23].

### PWM signál

Přenosový signál, který nese informaci o přenášené hodnotě může nabývat hodnot zapnuto a vypnuto tj. log.1/log.0. Hodnota přenášeného signálu je v přenosu zakódována jako poměr mezi stavy zapnuto a vypnuto. Tomuto poměru se říká střída. Cyklus, kdy dojde k přenosu jedné střídy, se říká perioda - viz obr. 15. Omezením pro PWM je to, že přenos informace je vždy omezen na relativní vyjádření od  $0 \div 1$ , což znamená, že musí být znám poměr mezi skutečnou hodnotou a procentuálním vyjádřením. Časové hodnoty střídy se pohybují v sekundách, v milisekundách pro přesnější řízení. Perioda je vždy součtem doby zapnuto a vypnuto [22].



**Obr. 15:** Ukázkové možnosti střídání PWM signálu [21]

#### 1.4.4 Servomotory

Servomotor, zkráceně servo, je motor pro pohony, u kterých lze na rozdíl od běžného motoru nastavit přesnou polohu natočení osy. Servo také pracuje na podstatně menších otáčkách, než je pro daný typ stroje obvyklé. Na svém prototypu využiji servo pro natáčení kormidel.

#### 1.4.5 Mikrokontroler

Na základě doporučení jsem si pořídil desku Nucleo-F103RB, viz obr. 16. Deska je určená pro středně náročné aplikace s běžným požadavkem na výkon. Do této skupiny moje nároky na programovací desku zapadají. Disponuje 128 kB vnitřní flash paměti pro program. Kompatibilita s celou řadou rozšiřitelných desek, které zajišťují extra funkci, je velkou výhodou této desky. Rozmístění konektorů pro platformu Arduino je na vnitřní straně desky, díky tomu je možné používat rozšiřující desky Arduino Shield. Platformu však využívám Mbed, která obsahuje několik předpřipravených knihoven pro jednoduchou obsluhu vnitřních periférií. Je také vhodná pro rychlou a snadnou implementaci prototypových zařízení.



**Obr. 16:** NUCLEO-F103RB [25]

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

V prvním bloku praktické části se věnuji zkonstruování vhodného modelu vznášedla. Po úspěšném sestavení modelu začínám ve druhém bloku s linearizací infračerveného senzoru, který byl vybrán na základě rešerše v teoretické části, a následné filtraci příslušného signálu ze senzoru pro odstranění šumu. Poté se ve třetím bloku zabývám identifikací matematického modelu, jelikož správně popsany model a funkční senzor je nedílnou součástí při správném navrhování zpětnovazebního řízení modelu vznášedla s aktivním řízením výšky, kterému se věnuji ve čtvrtém bloku. V tomto čtvrtém bloku také navrhuji regulátor pro zpětnovazební řízení a uvádím implementaci řídicího algoritmu. Poslední blok je zaměřen na experimentální ověření dosažených výsledků.

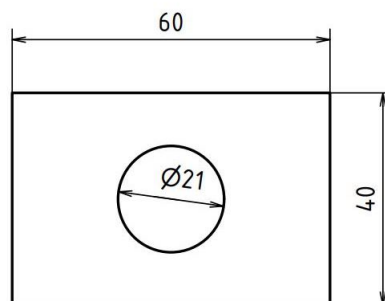
### 2.1 Konstrukce prototypu vznášedla

Základním prvkem, na kterém stojí celé vznášedlo, je paluba a sukňě vznášedla. S ohledem na požadavky na materiál jsem jako materiál paluby zvolil tvrzený polystyren, který je jak lehký, tak velice pevný. Plášť jsem vytvořil z odpadkového pytle. Držák na sukni jsem žádný nepotřeboval, jelikož jsem ji přidělal zespoda k palubě pomocí tavicí pistole.

#### 2.1.1 Paluba

Základním požadavkem je, aby se na palubu všechno vešlo. Výkres paluby je na obr. 17, kde jsou rozměry v cm. Další důležitá funkce je pevnost paluby, což polystyrenový materiál plně zajišťuje. Při navrhování na rozložení součástí po palubě jsem přihlížel k tomu, aby byl model pokud možno co nejvíce vyvážený.

Po připevnění pláště jsem pustil motory a zjistil, že sukňě není úplně symetrická, a proto se jedna část nafukuje více. Důsledkem toho bylo, že se vznášedlo samovolně pohybovalo, proto jsem použil železná vyvažovací závaží a prototyp jsem dovyvážil.



**Obr. 17:** Zakótovaný výkres paluby



### 2.1.2 Sukně vznášedla

Pro svůj model jsem si vytvořil vzduchový polštář pomocí jednoho kompaktního segmentového pláště, pro účely a zpracování mé práce je dostačující. Konstrukce více segmentů nebo kombinace segmentů a vaku by byla náročná. Velikost sukně jsem volil takovou, aby bylo možné dosáhnout minimálně 5 cm zdvihu.

Častá problematika u domácí zkonstruovaných modelů bývá, že se okraje sukně při nafouknutí vyvalí ven a sukně pak neudrží vzduch pod vznášedlem a model se nevznáší. Na obr. 18 můžete vidět, že jsem okraje pláště po určitých délkách přilepil třmeny z izolepy a tím zabránil nadzvednutí pláště při zatížení.

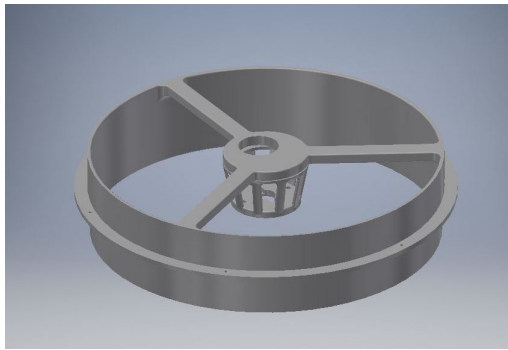


**Obr. 18:** Zajištění funkčnosti pláště pomocí třmenů z izolepy

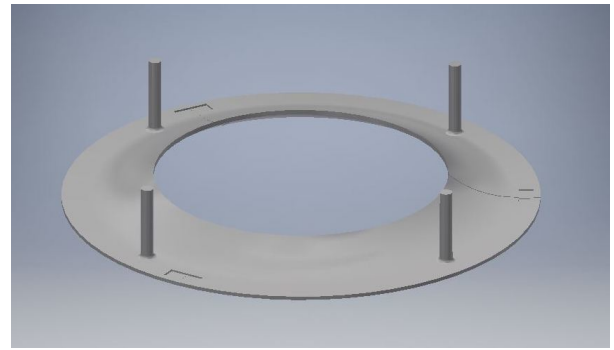
### 2.1.3 Kryt vrtule a rozvaděč vzduchu

Účinnost vrtulí je snížena vířivými pohyby vzduchu na koncích listů. To řeší kryt - viz obr. 19a, který dnes používají všichni výrobci vznášedel. Aby se toho dosáhlo, je ale nutné co nejvíce snížit vzdálenost mezi koncem listu a stěnou krytu. Oproti obyčejným vrtulím je také ta krytá tišší a bezpečnější při použití na zemi, což je u vznášedel vždy. Samozřejmě je to hmota navíc, která znamená nárůst hmotnosti, oproti zlepšení účinnosti je to ovšem zanedbatelné [3].

Aby vhánění vzduchu do pláště bylo co nejefektivnější, umístil jsem přímo pod vrtuli rozvaděč vzduchu, viz obr. 19b, který napomáhá rychlejšímu vytvoření vzduchového polštáře. Rozvaděč by mohl být i větší bohužel jsem byl omezený měřícím senzorem který byl přidělaný kousek vedle viz obr. 18.



(a) Kryt vrtule

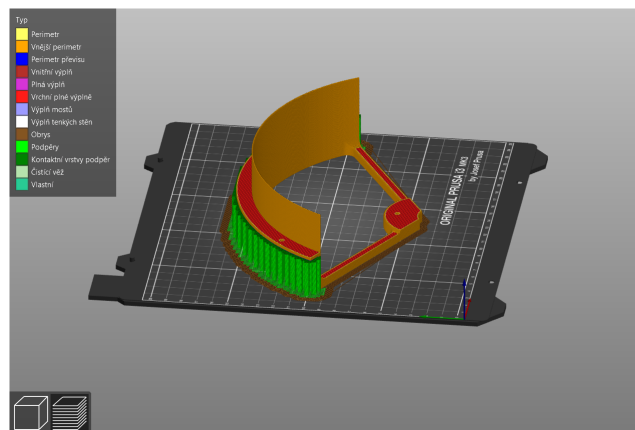


(b) Rozvaděč vzduchu

**Obr. 19:** Díly vytisknuté na 3D tiskárně

## Výroba dílů na 3D tiskárně

V této části bych se také rád věnoval výrobě těchto součástí. Obě jsem nejprve vymodeloval v programu INVENTOR a následně vytiskl na 3D tiskárně Anycubic Mega Pro. Program pro tisk byl vytvořen pomocí softwaru PrusaSlicer, viz obr. 20. Pro tisk byl zvolen transparentní filament z materiálu PLA od výrobce C-Tech. Při nastavení tisku lze nastavit hustotu a typ výplně. Pro tištěné díly jsem implementoval hustotu výplně 10 %, abych docílil co nejnižší hmotnosti při zachování pevnosti. Jako typ výplně jsem zvolil plástev.



**Obr. 20:** 3D tisk 1/3 krytu vrtule z důvodu omezení velikosti tisku

## 2.2 Infračervený senzor pro měření vzdálenosti

Než začnu popisovat práci s infračerveným senzorem, uvedl bych, proč jsem nepoužil kombinovaný čip GY - 521. Nejprve jsem měl v plánu uplatnit tento senzor pro měření natáčení paluby, ale jelikož můj prototyp vznášedla má pouze jeden centrální motor na vznášení, není vznášedlo schopné reagovat na náklon a proto není potřeba ho použít.

Druhá myšlenka použití byla přepočítávání reálné vzdálenosti při natočení vznášedla. Po několika zkušebních startech, kdy při pohledu na paluby nebyly pozorovány viditelnější náklony, jsem předpokládal rozdíl mezi reálnou a prodlouženou vzdáleností za zanedbatelný.

Začátek tohoto bloku vychází z teoretické části, kde jsem porovnával různé typy senzorů vzdálenosti a z nich jsem vybral právě infračervené snímání vzdálenosti jako nejvhodnější.

Po následném porovnání jednotlivých senzorů, z řady infračervených, jsem se rozhodl pro snímač SHARP GP2Y0A51SK0F od firmy POLOLU, v tab.1 jsem uvedl základní parametry senzoru. Skládá se z integrované kombinace PSD, IR - LED a obvodu pro zpracování signálu. Snímač indikuje kladné napětí mezi 1,35 – 1,95 V. Pracuje na principu triangulační metody, která byla vysvětlena v kapitole (1.3).

Jedním z důvodů, proč byl vybrán tento snímač, je ideální rozsah pro můj prototyp vznášedla. Jak je možné vidět v tab.1, minimální měřená hodnota není 0 cm, ale je to 1,5 cm. Tento problém jsem vyřešil tak, že jsem senzor umístil do vnitřku paluby, aby počáteční hodnota byla právě 1,5 cm. Maximální hodnotu nebylo potřeba nějak řešit, jelikož vznášedlo má maximální zdvih okolo 10 cm, což sedí do rozsahu senzoru.

Další výhodou tohoto senzoru je využití triangulační metody, díky které má na senzor minimální vliv různorodost odrazivosti objektu, teplota prostředí a doba provozu. Tyto senzory jsou také vhodné do prašnějších prostředí.

Výrobce	<i>POLOLU</i>	
Označení	<i>GP2Y0A51SK0F</i>	
Napájecí napětí	4.5 ÷ 5.5	VDC
Rozsah měření	0,02 ÷ 0,15	m
Výstupy	analogové napětí	
Provozní teplota	-10 ÷ 60	°C
Max. vzorkovací frekvence	16	ms
Rozměry	(27 × 10, 8 × 12)	mm

**Tab. 1:** Parametry zvoleného senzoru SHARP GP2Y0A51SK0F od firmy POLOLU

### 2.2.1 Nelineární charakteristika snímače vzdálenosti na analogový výstup

Charakteristika senzoru může být buď statická a nebo uživatelská. Obě tyto charakteristiky se měří v ustáleném stavu. Typicky pro uživatele snímače není důležité vědět jaké vzdálenosti odpovídá jaké napětí snímače, ale uživatel chce vědět, jakou vzdálenost měří senzor, jehož napětí právě změřil. Proto je v tomto případě výhodnější použít charakteristiku uživatelskou, tj.(2.1) [15].

$$X = f(Y) \quad (2.1)$$

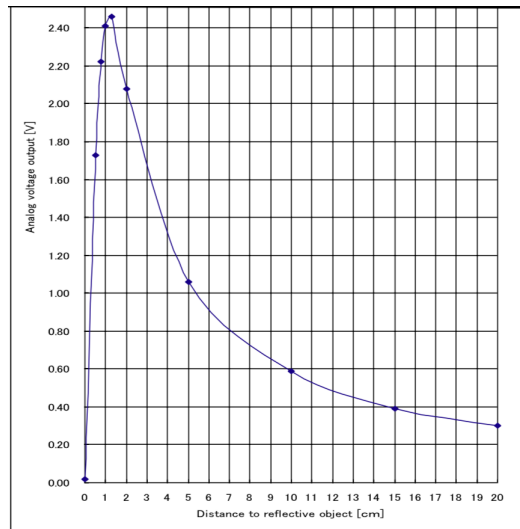
Výstupem ze snímače vzdálenosti je obvykle nelineární napěťová charakteristika. Ta říká, že velká změna na výstupním napětí nemusí vždy znamenat velkou změnu vzdálenosti. Jelikož jsem přes pandemické období nemohl provádět měření ve škole a nebylo možné měřit výstupní napětí ze senzoru, nahradil jsem ho analogovým výstupem.

V tabulce (1) jsem uvedl rozsah senzoru, ve kterém snímač měří danou vzdálenost správně. Ve vzdálenosti zhruba 1,5 cm nastává maximum výstupního napětí na 2,45 V. Z nulové vzdálenosti do maximální polohy napětí strmě roste a při měření v této oblasti by docházelo k nejednoznačnosti, protože například pro vzdálenost 0,5 cm a 3,2 cm odpovídá stejné napětí. Tento problém, jak jsem uvedl výše, je vyřešen nastavením senzoru do počáteční polohy ve výšce 2 cm. Tím se této oblasti vyhnou.

#### Identifikace nelineární uživatelské charakteristiky

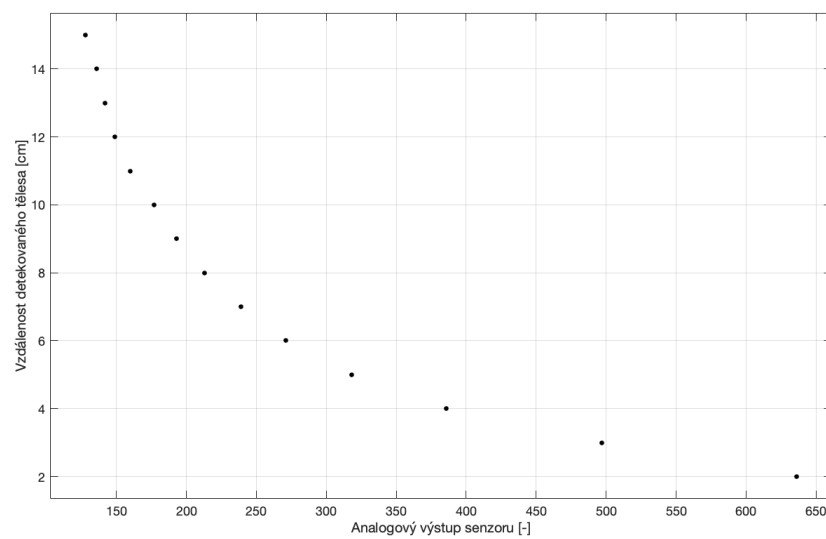
Jelikož u měření této charakteristiky se předpokládá ustálený stav, měření jsem prováděl na desce, na kterou jsem si připevnil pravítko. Na jednu stranu jsem pevně připevnil senzor a proti němu jsem položil detekované černé těleso. Těleso jsem postupně posouval po pravítku od senzoru po 1 cm. Prvotní hodnota byla minimální, tedy 2 cm a maximální 15 cm.

Aby bylo měření co nejobektivnější, nechal jsem si zobrazit 300 hodnot, které jsem následně zprůměroval. Každou zprůměrovanou hodnotu jsem poté vynesl do grafu, který můžete vidět na obr. 22. Výsledné uspořádání bodů vytvořilo nelineární charakteristiku odpovídající hodnotám z datasheetu senzoru viz obr. 21.

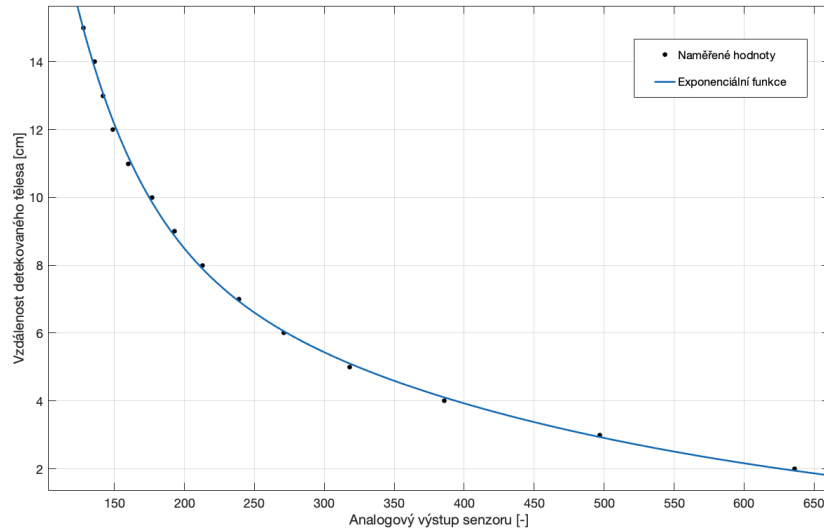


**Obr. 21:** Nelineární charakteristika senzoru z datasheetu [26]

Kvůli nelinearitě senzoru hledám takovou funkci, která mi tuto nelinearitu dokáže popsat co nejlépe, proto jsem vzal graf s naměřenými hodnotami a zkoušel ho prokládat různými funkcemi. Ideální funkce by měla moje body kopírovat co nejpřesněji. Po otestování několika funkcí jsem zvolil funkci exponenciální, viz obr. 23.



**Obr. 22:** Měřená nelineární charakteristika senzoru



**Obr. 23:** Nelineární charakteristika proložená exponenciální funkcí

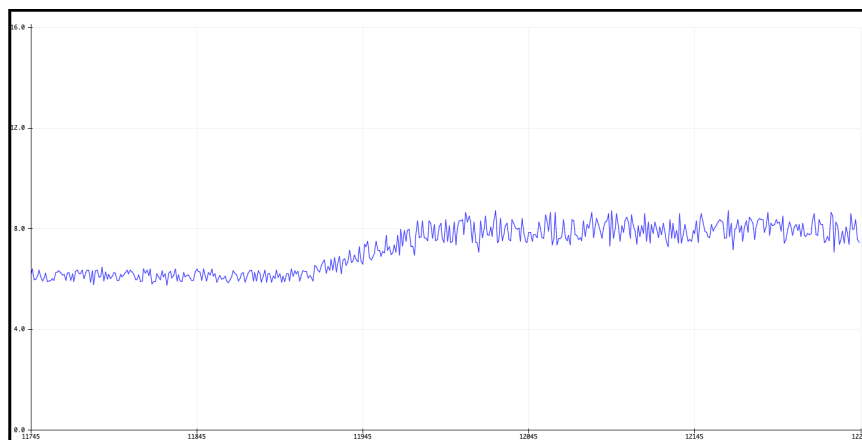
Po proložení exponenciální funkce mi MATLAB vygeneroval nejvhodnější parametry pro rovnici této funkce. Rovnici (2.2) jsem následně implementoval do programu senzoru, jelikož je nezanedbatelnou částí pro správné měření senzoru.

$$y = 83,02 \cdot \exp(-0,02123 \cdot x) + 12,72 \cdot \exp(-0,002953 \cdot x) \quad (2.2)$$

## 2.2.2 Filtrace signálu

Po zprovoznění senzoru jsem spustil měření a narazil jsem na další problém, kterým je vysokofrekvenční šum, jenž je potřeba pro získání kvalitnější regulace odfiltrovat.

Než začnu rozebírat, jak jsem postupoval při odfiltrování signálu, na obr. 24 bych chtěl nejprve ukázat, jak vypadal signál bez filtrace.

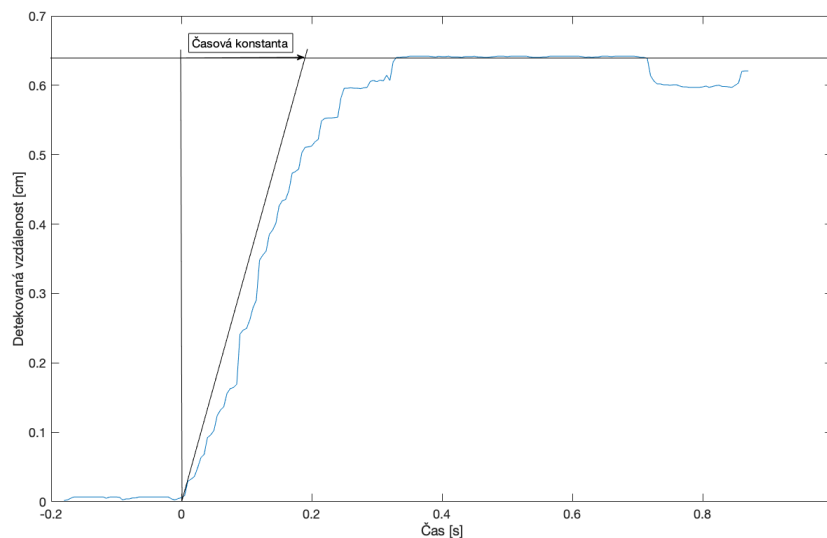


**Obr. 24:** Měřená výška bez použití filtrace

## Vlastnosti systému omezující filtraci

První vlastností, která omezuje výběr filtru, je frekvence regulačního zásahu  $f_v$ . Je třeba, aby filtrace nezpomalovala odezvu regulátoru příliš nízkou cut off frekvencí. Ta se bude odvíjet od dynamiky regulovaného systému, jelikož je žádoucí rychlá odezva systému a regulátor s příliš nízkou vzorkovací frekvencí by dynamiku zbytečně zpomaloval. V dalších částech práce aproximuji chování soustavy lineárním systémem 2. řádu, ovšem pro účel volby vzorkovací frekvence regulátoru uvažuji pouze 1. řád. Podle časové konstanty odhadnuté z naměřené přechodové charakteristiky, která je na obr. 25, mohu zvolit vzorkovací periodu regulátoru, kterou budu volit alespoň desetkrát kratší. Identifikovaná časová konstanta systému je  $\tau = 165$  ms a minimální vzorkovací frekvence regulátoru je ze vztahu (2.3), tedy  $f_v = 100$  Hz [27].

$$f_v = \frac{1}{\tau} \quad (2.3)$$



**Obr. 25:** Přechodová charakteristika statického systému druhého řádu

Vzorkovací frekvence regulátoru je ovšem vzhledem k použitému senzoru omezena i z druhé strany. Senzor je totiž schopný snímat s periodou 16,5 ms. Pokud bych se tedy snažil regulátor zasáhnout častěji, pracoval by stále se stejnými hodnotami. Tím je tedy vzorkovací frekvence regulátoru omezena shora na maximální hodnotu  $f_v = 100$  Hz.

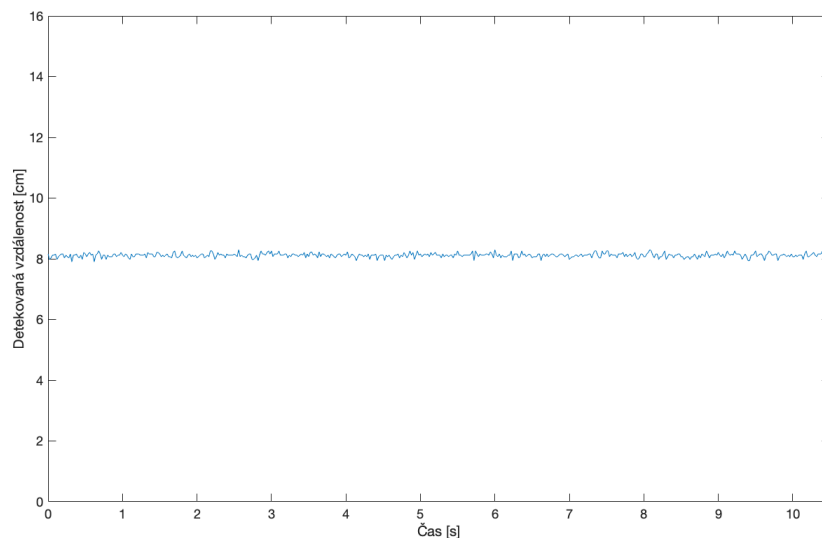
Tato diskretizační vlastnost senzoru je nakonec primárním omezením pro volbu použitého filtru analogového signálu ze senzoru. Hlavním účelem filtrace je tedy vyhlazení měřené hladiny signálu za pomoci měření během celé vzorkovací periody senzoru. Rozhodl jsem se tedy použít analogový filtr 1. řádu v podobě RC článku.

## Volba vhodného filtru

Než uvedu vybraný filtr, musím zmínit, že primárním úkolem pro odstranění šumu by měla být analýza hardwaru s nalezením zdrojů rušení signálu. Vždy je lepší zařídit, aby se do signálu šum vůbec nedostal, než jej následně filtrovat. Nicméně to by zabralo hodně času, který má být věnován hlavnímu cíli této práce. Navíc by mimo zvolenou filtraci bylo vhodné uvažovat i o adaptivní filtraci signálu, jelikož se za jízdy po různých nerovných površích může šum výrazně zbarvit, což bude vidět i v části experimentálního ověření [27].

Pro první pokus odfiltrovat nežádoucí šum jsem zvolil filtr analogový, který implementuji formou jednoduchého  $RC$  článku, tedy filtru prvního řádu. Pro analogový  $RC$  filtr je důležité zvolit parametry pasivních prvků tak, aby časová konstanta  $\tau$  ze vztahu (2.4) nebyla větší, jelikož by se tím zpomalovala dynamika systému. Na základě zmíněných požadavků jsem zvolil hodnoty  $R = 390 \Omega$  a  $C = 2,2 \mu\text{F}$ , tedy cutoff frekvenci  $f_{ca} = 1.2 \text{ kHz}$ .

$$\tau = R \cdot C \quad (2.4)$$

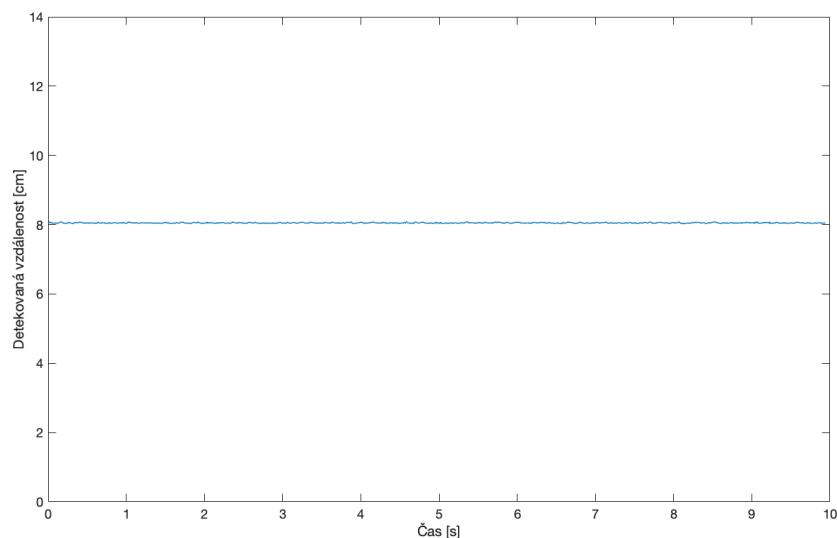


**Obr. 26:** Měřená výška při použití analogového filtru ve formě  $RC$  článku

Jelikož se i po použití tohoto filtru v měřeném signálu stále objevoval pravidelný šum, viz obr. 26, použil jsem navíc i digitální filtr ve formě klouzavého mediánu. Ten si s tímto způsobem zašumění poradí lépe než například klouzavý průměr.

Jak je možné vidět na obr. 27, po použití digitálního filtru je signál skoro vyfiltrován a můžu s ním dále pracovat.





**Obr. 27:** Měřená výška při použití digitálního filtru ve formě klouzavého mediánu

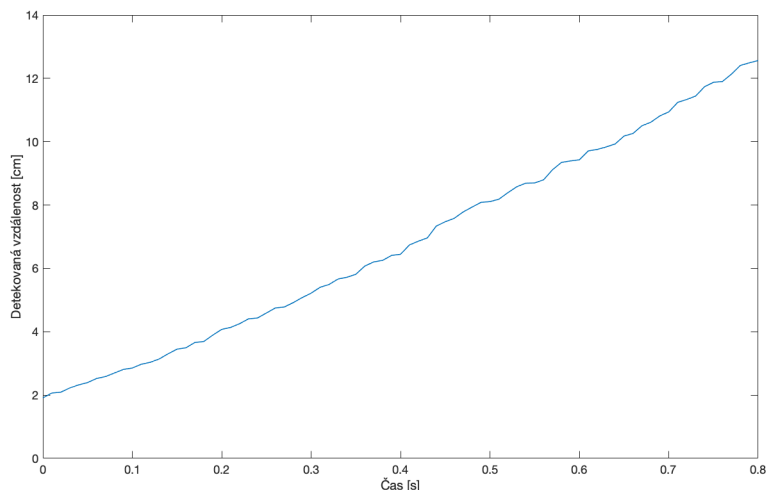
## Nespojitost signálu ve vyšších výškách

Po nalezení vhodné filtrace jsem při měření narazil na další problém, a to s nespojitostí signálu ve vyšších výškách.

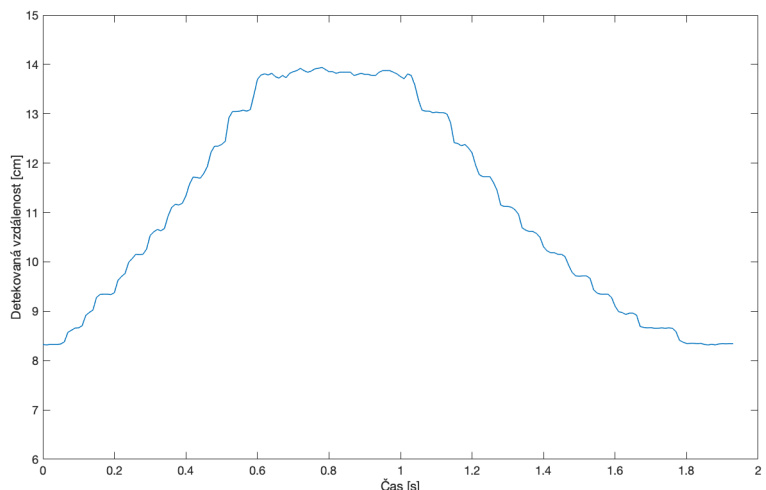
Než začnu toto téma rozebírat, zprvu bych krátce uvedl, jak probíhá digitalizace analogového signálu.

Na základě vzorkování signálu získáme konečný počet diskrétních vzorků původního analogového signálu. Na tyto vzorky je nutné aplikovat další proces jednorozměrné úroňové diskretizace - tzv. kvantování signálu. To se provádí v kvantizéru a podstatou jeho činnosti je zaokrouhlení hodnot signálu získaného při vzorkování na předem definované tzv. kvantizační hladiny [28].

U mého senzoru se se zvyšující detekovanou vzdáleností hustota kvantizačních hladin zmenšuje, což znamená, že ve větších výškách se bude přesnost zmenšovat, a tím se bude spojitost zhoršovat, jak je možné vidět na obr. 28, 29.



**Obr. 28:** Měření spojitosti signálu



**Obr. 29:** Zobrazení kvantizačních hladin

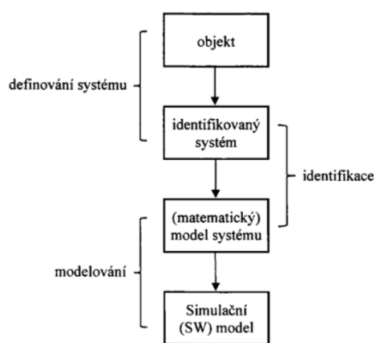
Signál je z počátku do zhruba 6 cm spojitý, poté se mi v grafu začínají objevovat schody. Tyto tzv. schody jsou příčinou nízké přesnosti senzoru, jelikož v těchto výškách už je málo kvantizačních hladin a senzor není schopen hodnoty mezi hladinami rozeznat. Senzor proto setrvává v jedné hladině, než se detekovaná výška posune do následující kvantizační hladiny. Když se bude detekovaná vzdálenost pohybovat mezi kvantizačními hladinami, nastává kvantizační šum.

Tento problém jsem vyřešil tak, že jsem zespoda do rohu paluby připevnil 4 cm sloupky, které mi zajistí počáteční polohu vznášedla. Senzor připevním tak, aby v počáteční poloze měřil výšku 1,5 cm. Tímto řešením zajistím, že se vznášedlo může pohybovat ve výšce až 6 cm a senzor bude snímat vzdálenost 3,5 cm, což je rozmezí, kde snímaná výška ještě není tolik kvantizovaná.

## 2.3 Identifikace matematického modelu

Chceme-li nějaký objekt řídit, je potřeba odhadnout chování tohoto objektu pro různé strategie řízení. K tomuto účelu je nutné získat model řízeného objektu. Model by měl zahrnovat podstatné vstupy a výstupy a popisovat vazbu mezi nimi. Pomocí modelu pak můžeme předem odhadnout chování řízeného objektu pro různé strategie řízení. Při tvorbě matematického modelu objektu nejprve definujeme identifikovaný systém, který postihuje zkoumané jevy. Vnější příčiny odpovídají vstupům systému, sledované příznaky výstupům systému. Při definování identifikovaného systému dochází k redukci složitosti, neboť do identifikovaného systému zahrnujeme pouze zkoumané souvislosti. K další redukci dochází při tvorbě matematického modelu vlivem zanedbání nevýznamných dějů, vstupů a zjednodušujících aproximací apod [29].

V další části se získaný matematický model převede na simulační model, který umožňuje verifikaci modelu a simulaci chování identifikovaného systému pro různé strategie řízení. Celý tento proces je možný vidět na obr. 30 [29].



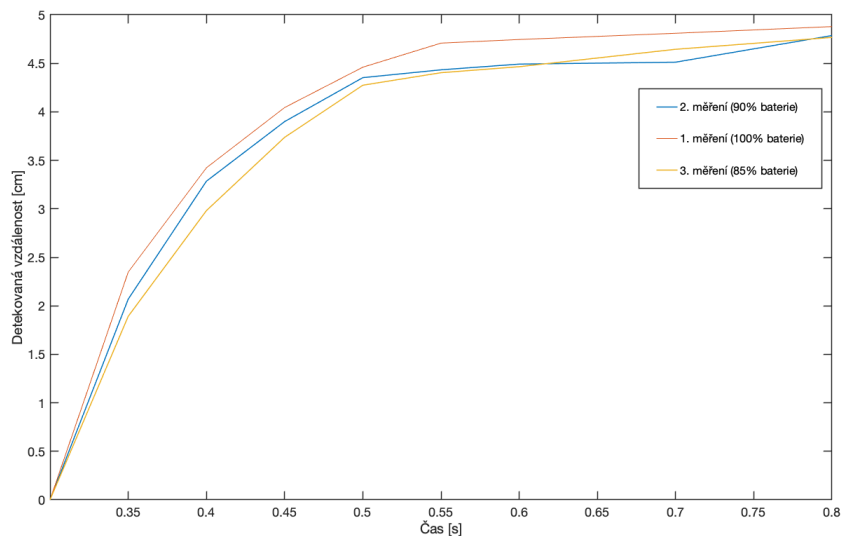
Obr. 30: Etapy definování identifikovaného systému [27]

Pro hledání modelu systému jsem si vybral experimentální identifikaci. Tato metoda je postavena na zjišťování potřebných informací pozorováním chování identifikovaného systému během experimentu. Model, který dostanu, popisuje vztah mezi vstupem a výstupem pro konkrétní pracovní stav.

Rozhodl jsem se matematický model vyjádřit pomocí diferenciální rovnice, kde jsem nejprve vyšetřoval statické chování modelu, které popisuje vlastnosti systému v ustáleném stavu. Následně jsem zjišťoval dynamické vlastnosti systému, kde dochází ke změnám vstupních i výstupních veličin.

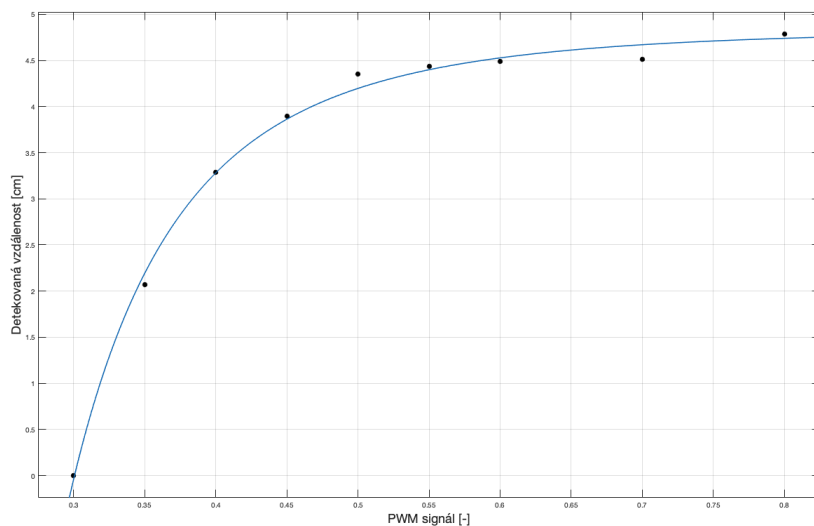
### 2.3.1 Statické vlastnosti systému

Statické vlastnosti systému jsem vyjádřil graficky statickou charakteristikou, která je na obr. 32. Na začátku uvádím předpoklad, že v mé úloze ustáleným vstupním hodnotám bude příslušet jedna ustálená výstupní hodnota.



**Obr. 31:** Vliv vybití baterie na statickou charakteristiku

Při měření této charakteristiky jsem postupně nastavoval vstupní veličinu v podobě PWM signálu, který byl vysvětlený v bloku 1.4, od  $0 \div 1$ . Výstupní veličinu, kterou je detekovaná vzdálenost, jsem odečítal až poté, co se vstupní i výstupní veličina ustálila, aby bylo měření korektní. Získané ustálené hodnoty jsem vynesl do grafu na obr. 32.



**Obr. 32:** Statická charakteristika systému

## Linearizace

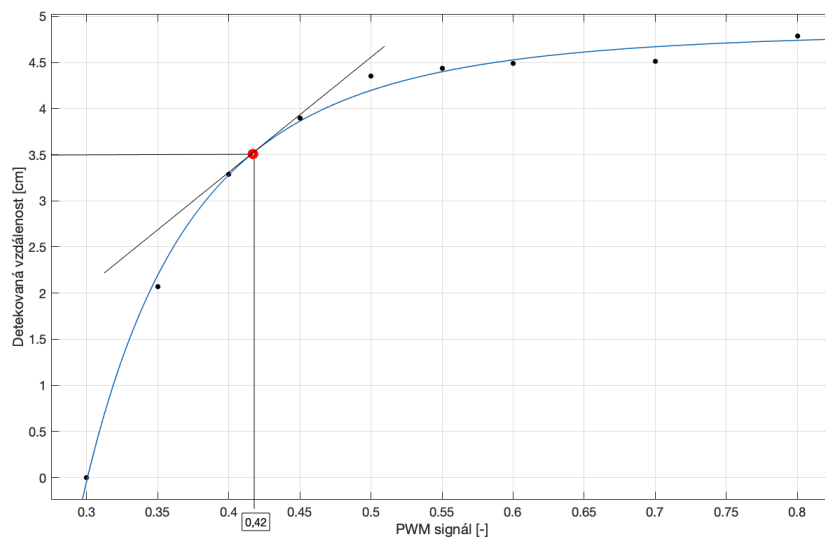
Při automatickém řízení se převážně snažíme pohybovat se vstupními i výstupními veličinami regulované soustavy v blízkém okolí zvoleného ustáleného stavu tzv. pracovního bodu  $P_0$ . Protože s nelineárními systémy, jako je ten můj, se při návrhu řízení pracuje obtížněji než s lineárními, nahradím v okolí mého pracovním bodu  $P_0$  původní nelineární model lineárním [29].

Nejprve jsem si určil pracovní bod, a to tak, že jsem si zvolil  $x_0 = 0,42$  (PWM signál), a tuto hodnotu jsem dosadil do rovnice (2.5). Vyšla mi hodnota  $y_0 = 3,5$  cm (detekovaná vzdálenost). Následně jsem za použití Taylorovy řady (2.6) aproximoval nelineární systém tečnou v pracovním bodě  $P_0$ , viz obr. 33. Do vztahu (2.7) jsem vložil funkci (2.5), poté dosadil  $x_0$ , a tím získal statickou citlivost  $K_u = 12,75$  výstupu  $y$  na vstupu  $x$  v pracovním bodě  $P_0$ . Statická citlivost je právě to, co jsem z této části potřeboval získat pro diferenciální rovnici matematického modelu.

$$y = -0.0516 \cdot x^{-3.795} + 4.947 \quad (2.5)$$

$$y_s = y_0 + \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\partial f}{\partial z_{is}} \right\}_0 \cdot (z_{is} - z_{i0}) \quad (2.6)$$

$$K_{zi} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial z_{is}} \right\}_0 = \left\{ \frac{\partial(-0.0516 \cdot x^{-3.795} + 4.947)}{\partial x} \right\}_0 \quad (2.7)$$



Obr. 33: Aproximace nelineární statické charakteristiky tečnou v pracovním bodě  $P_0$

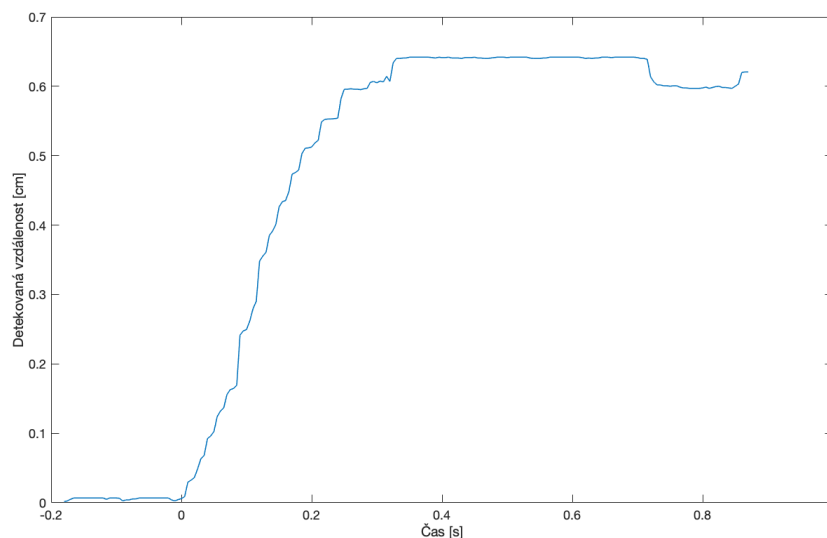
Po několika zkouškách měřícího senzoru jsem se nakonec rozhodl snímač ještě snížit, aby detekovaná výška byla ještě menší, a tím byl signál spojitější. Jediná změna tedy je, že jsem posunul senzor o 1,2 cm dolů. Všechno ostatní zůstává stejné, jelikož tvar statické charakteristiky se nemění, jen by se všechny hodnoty na svislé ose zmenšily o 1,2 cm, proto pracuji stále s tou samou, která je na obr. 33.

### 2.3.2 Dynamické vlastnosti systému

Jak již bylo uvedeno, pro návrh řízení objektu je potřeba odhadnout chování tohoto objektu pro různé strategie řízení. Je proto potřeba, aby model objektu popisoval nejen statické, ale i dynamické vazby mezi vstupy a výstupy, tj. respektoval i časové souvislosti. Model objektu využívaný pro syntézu řízení bývá převážně ve formě diferenciálních rovnic. Jelikož vstupní i výstupní veličiny regulované soustavy nabývají hodnot v blízkém okolí zvoleného pracovního bodu, využívají se pro návrh regulátoru matematické modely ve formě lineárních diferenciálních rovnic. Tato aproximace je však platná pouze pro omezené okolí pracovního bodu [29].

Dynamické vlastnosti systémů můžeme vyhodnocovat při změnách vstupních i výstupních veličin. Dynamické vlastnosti soustav se často zjišťují z odezvy dynamického systému na vstupní signály. Mezi standardní testovací vstupní signály patří jednotkový skok [29].

Pro získání dynamických vlastností jsem volil právě jednotkový skok z pracovního bodu  $PWM = 0,42$  na  $PWM = 0,47$  a změřil jsem odezvu dynamického systému. Výsledkem je přechodová charakteristika na obr. 34, kterou jsem posunul do pracovního bodu  $P_0$ . Na základě tvaru přechodové charakteristiky jsem určil, že lineární statický model budu popisovat diferenciální rovnicí druhého řádu.



**Obr. 34:** Přechodová charakteristika posunutá do pracovního bodu

## Lineární statický model popsany diferencíální rovnicí druhého řádu

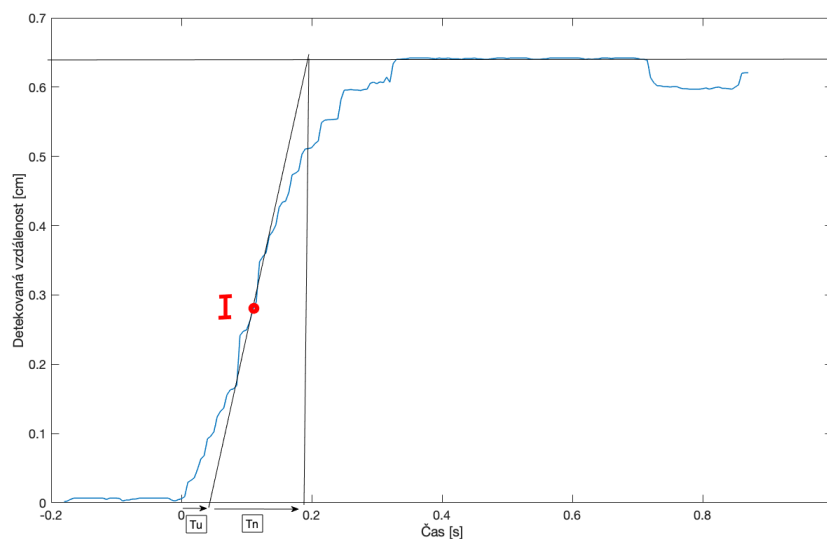
Lineární statický model druhého řádu popisující vazbu mezi vstupem a výstupem lze uvažovat ve tvaru (2.8). V závislosti na tlumení rozlišujeme systémy na kmitavý, nekmitavý a na mezi kmitavosti. Pro svůj model volím systém na mezi kmitavosti, jelikož tento systém má nejrychlejší dynamiku z nekmitavých systémů.

$$y''(t) + a_1 \cdot y'(t) + a_0 \cdot y(t) = b_0 \cdot u(t) \quad (2.8)$$

Parametry diferencíální rovnice (2.8) jsem identifikoval experimentálně aproximační metodou.

### Aproximační metoda prof. Strejce

Metoda je založena na aproximaci naměřené přechodové charakteristiky reálného systému náhradním systémem předem zvolené struktury, jehož parametry přizpůsobujeme naměřené dynamice [30].

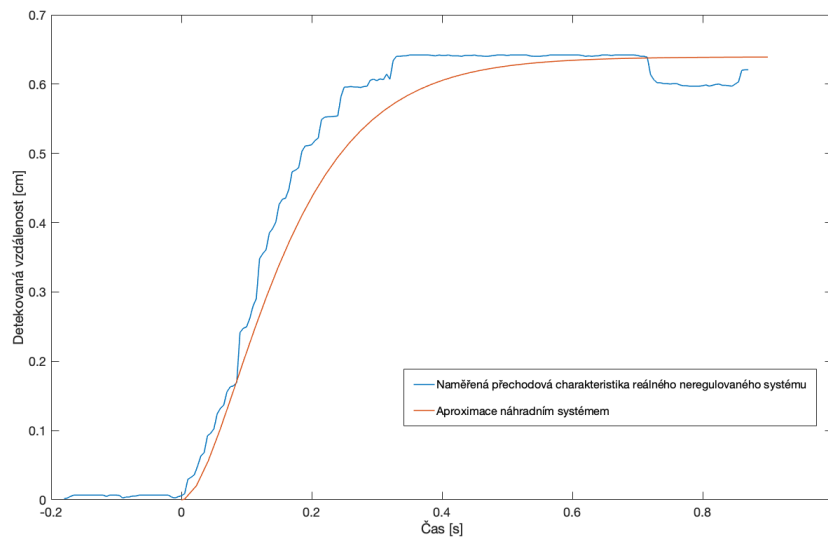


Obr. 35: Identifikace parametrů

Metoda vychází z odhadu polohy tečny charakteristiky v jejím inflexním bodě [30]. Na obr. 35 jsem právě tento odhad provedl a graficky odečetl dobu náběhu  $T_n = 0,19$  s a dobu průtahu  $T_u = 0,02$  s. Tyto hodnoty jsem dále používal pro výpočet přenosu náhradního systému. Obecné vyjádření přenosu je definováno vztahem (2.9), do kterého jsem dosadil vypočtené hodnoty a získal potřebný přenos náhradního systému (2.10), který jak je vidět na obr. 36 vhodně aproximuje naměřenou přechodovou charakteristiku.

$$G_a(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n} \rightarrow \rightarrow \frac{T_u}{T_n} = \tau_u < 0,104 \quad (2.9)$$

$$G_a(s) = \frac{1829}{s^2 + 24,3s + 143} \quad (2.10)$$



**Obr. 36:** Aproximace naměřené přechodové charakteristiky náhradním systémem

Výsledný přenos jsem poté transformoval do diferenciální rovnice druhého řádu, která má tvar (2.11).

$$y''(t) + 24,3y'(t) + 143y(t) = 1829u(t) \quad (2.11)$$

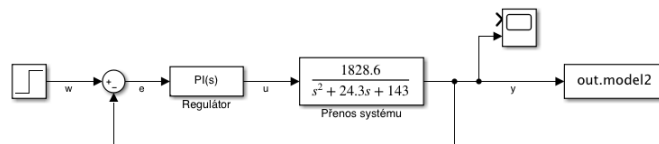


## 2.4 Návrh řídicího algoritmu

Dynamiku systému už mám popsanou, a proto se budu v této kapitole věnovat řídicímu algoritmu. Hlavním úkolem v tomto bloku je navrhnout ideální regulátor a nastavit jeho parametry tak, aby regulace minimalizovala regulační odchylku  $e$ .

Pro aktivní řízení zdvihu vzduchového polštáře jsem zvolil zápornou zpětnou vazbu. V simulinku jsem si nejprve navrhnul regulační obvod, viz obr. 37. Obecná rovnice celkového přenosu  $G_{wy}(s)$  je pak ve tvaru (2.12), kde  $R(s)$  je přenos regulátoru a  $G(s)$  je přenos systému.

$$G_{wy}(s) = \frac{R(s) \cdot G_a(s)}{1 + R(s) \cdot G_a(s)} \quad (2.12)$$



Obr. 37: Blokové schéma regulačního obvodu

### 2.4.1 Výběr regulátoru a nastavení parametrů zpětné vazby

Regulátor jsem vybral PI, který patří k nejběžněji používaným regulátorům a volíme jej pro středně náročné aplikace, u kterých vyžadujeme, aby pracovaly bez trvalé regulační odchylky  $e$ . Také zlepšuje stabilitu oproti I-regulátoru. Pro určitá nastavení parametrů regulátoru ho lze použít i pro regulaci astatických soustav [29].

Spojením proporcionální a integrační složky vznikne ideální PI-regulátor, který lze popsat vztahem (2.13) [29].

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_I \cdot \left[ \int_0^t e(\tau) d\tau \right] + u(0) \quad (2.13)$$

Derivací rovnice (2.13) obdržím popis ideálního PI-regulátoru též v často používané rychlostní formě (2.14).

$$u'(t) = r_0 \cdot e'(t) + r_I \cdot e(t) \quad (2.14)$$

Z rovnice (2.14) snadno určím přenos PI-regulátoru (2.15).

$$R(s) = \frac{r_0 \cdot s + r_I}{s} = r_0 + \frac{r_I}{s} \quad (2.15)$$

Když jsem si zadefinoval parametry  $G_a(s)$  a  $R(s)$ , dosadím je do rovnice (2.12) a dostanu celkový přenos (2.16).

$$G_{wy} = \frac{1828,6r_I + 1828,6r_0 \cdot s}{s^3 + 24,3s^2 + (143 + 1828,6r_0)s + 1828,6r_I} \quad (2.16)$$

Z tohoto přenosu vezmu jmenovatele a položím ho rovno nule, čímž obdržím tzv. charakteristickou rovnici (2.17). Z kořenů charakteristické rovnice lze posoudit stabilitu a kmitavost. Jelikož chci systém na mezi kmitavosti, kvůli rychlé dynamice a zároveň nekmitavému systému, předpokládám při rovnici 3. řádu trojnásobný kořen  $\lambda$  (tj.  $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ ) ve tvaru (2.18), což se dá rozepsat do rovnice (2.19).

$$s^3 + 24,3s^2 + (143 + 1828,6)r_0s + 1828,6r_I = 0 \quad (2.17)$$

$$s_1 = s_2 = s_3 = \alpha \rightarrow (s - \alpha)^3 = 0 \quad (2.18)$$

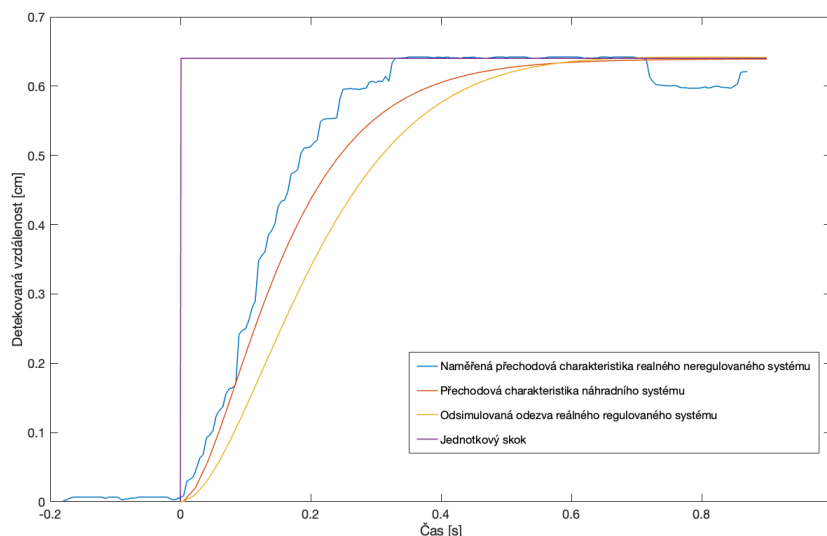
$$s^3 - 3 \cdot \alpha \cdot s^2 + 3 \cdot \alpha^2 \cdot s - \alpha^3 = 0 \quad (2.19)$$

Obě rovnice (2.17) a (2.19) jsou třetího řádu, proto stačí, když porovnám koeficienty před stejnými n-tými mocninami, a tím získám důležité parametry  $r_0 = 0,0373$  a  $r_I = 0,3685$  PI-regulátoru.

Po dosazení parametrů do rovnice (2.15) získám výslednou rovnici regulátoru ve tvaru (2.20).

$$R(s) = 0,0373 + \frac{0,3685}{s} \quad (2.20)$$

V simulinku jsem odsimuloval regulaci jednotkového skoku v blízkosti pracovního bodu, a jak je možné vidět na obr. 38, regulace funguje a systém se ustálí na požadované hodnotě bez regulační odchylky. Dynamika systému je pomalejší, ale rychlejší dynamika už by obnášela lehký překmit. Tomu se chci vyhnout, proto jsem zvolil systém na mez kmitavosti jako nejvhodnější.



**Obr. 38:** Porovnání odsimulované odezvy regulovaného systému s ostatními výstupy

## 2.4.2 Diskretizace PI regulátoru

Číslicové regulátory PS (Proporcionálně-Sumační) jsou diskrétní analogií spojitých PI regulátorů. Jedná se o náhradu integrálu sumací. Z toho vyplývá, že PS regulátory se svým chováním pouze přibližují spojitým PI regulátorům. Jestliže se vychází z ideálního tvaru spojitého PI regulátoru, jenž je popsán integro-diferenciální rovnicí (2.13), pak ekvivalentní PS regulátor je definován v diskrétních časových okamžicích  $t = i \cdot \Delta t$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  rovnicí (2.21) [31].

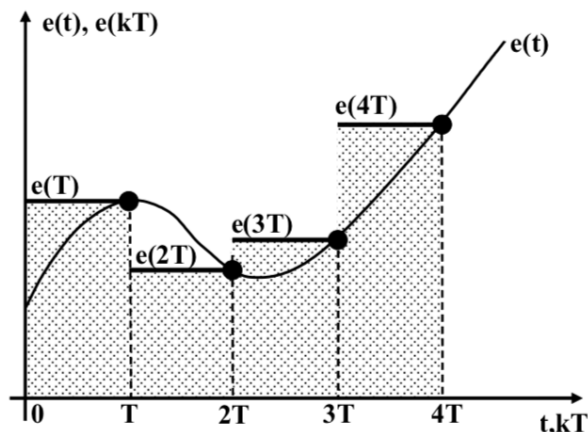
$$u(i \cdot \Delta t) = r_0 \cdot e(i \cdot \Delta t) + r_1 \cdot I(i \cdot \Delta t) \quad (2.21)$$

Kde  $I(i \cdot \Delta t)$  je náhrada integrálu v diskrétním časovém okamžiku. Vzorkovací periodu regulátoru jsem zvolil  $\Delta t = 10$  ms. Při zmenšování periody vzorkování se s PS regulátory můžeme blížit k analogovému výstupu, ovšem tím vznikají problémy, které jsou popsány v kap. 2.2.

Pro náhradu integrace jsem zvolil zpětnou obdélníkovou náhradu popsanou rovnicí (2.22).

$$I(i \cdot \Delta t) = \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \approx \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k e(i \cdot \Delta t) = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k e_i \quad (2.22)$$

Hodnota integrálu se nahrazuje součtem ploch obdélníků nahrazujícím plochu pod původní spojitou křivkou  $e(t)$ , viz obr. 39. Perioda vzorkování určuje šířku obdélníků. Výšku  $i$ -tého obdélníku určuje aktuální hodnota vzorku  $e_i$ , kde  $i = 1, \dots, k$  [29], [31].



Obr. 39: Zpětná obdelníková náhrada [31]

U spojitého regulačního obvodu s regulátorem (PID) je nepřetržitá vazba mezi všemi veličinami řízeného obvodu, jež jsou spojitě v čase. Regulátor tedy nepřetržitě dle řídicího zákona určuje průběh akční veličiny v závislosti na průběhu žádané veličiny a regulované veličiny [27]. Toto nepřetržité sledování však není při regulaci potřebné a je náročné na zpracování. Proto se používá číslicový regulátor, který poskytuje informace o průběhu jen v diskrétních časových okamžicích.

### 2.4.3 Implementace řídicího algoritmu

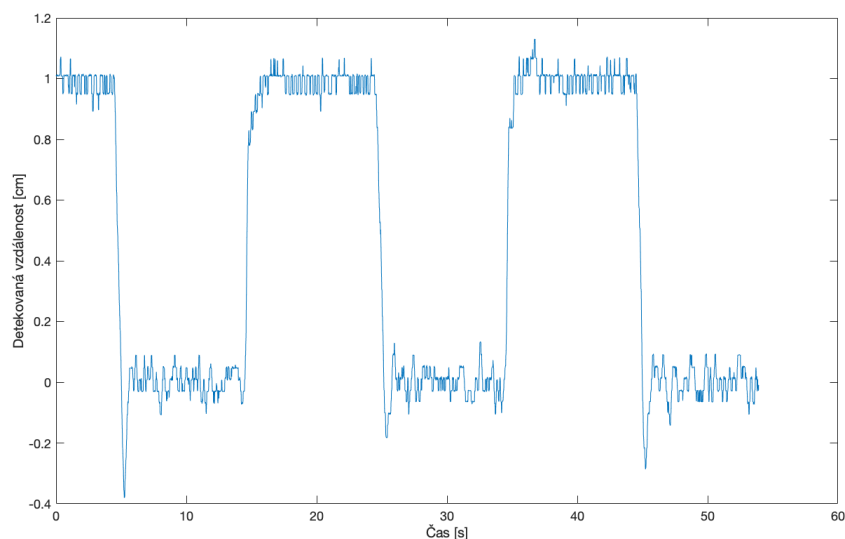
Pro programování mikrokontroléru jsem využil platformy Mbed, která nabízí vlastní open source nástroje pro vývoj s Arm procesory [32]. Pro vývoj jsem zvolil bare-metal verzi Mbed místo RTOS, kde jsou veškeré aktivity mikroprocesoru řízeny pouze pollingově v hlavní smyčce programu, nebo pomocí interruptů. API využitě pro práci s mikrokontrolerem jsou napsány v jazyce C++ [27].

Vybraný PI regulátor je funkční pro ideální lineární systém. Reálný systém má ovšem několik omezení, které se do funkce regulátoru promítnou. Jednou z nich je i wind up jev. Jedná se o stav regulátoru, kdy se integrační složka stále zvyšuje i přes to, že akční zásah regulátoru je již saturován. V případě, že se následně změní znaménko regulační odchylky, trvá dlouho, než se integrační složka dostatečně sníží a během této doby je akční zásah stále v saturovaném stavu. To má neblahý vliv na průběh regulace. Jednou z možností, jak tomuto jevu předejít, je zastavit integraci, v případě, že je akční zásah saturován a spustit ji opět pokud regulační odchylka dosáhne opačného znaménka [27].

## 2.5 Experimentální verifikace

V poslední kapitole v praktické části se budu zabývat ověřením funkce navrženého řízení. Věnuji se zde také porovnávání výsledků v podobě odezvy na jednotkový skok, které byly odsimulované a naměřené. V případě, že podobnost simulované a reálné odezvy nebude dostatečně přesná bude potřeba změnit parametry regulátoru.

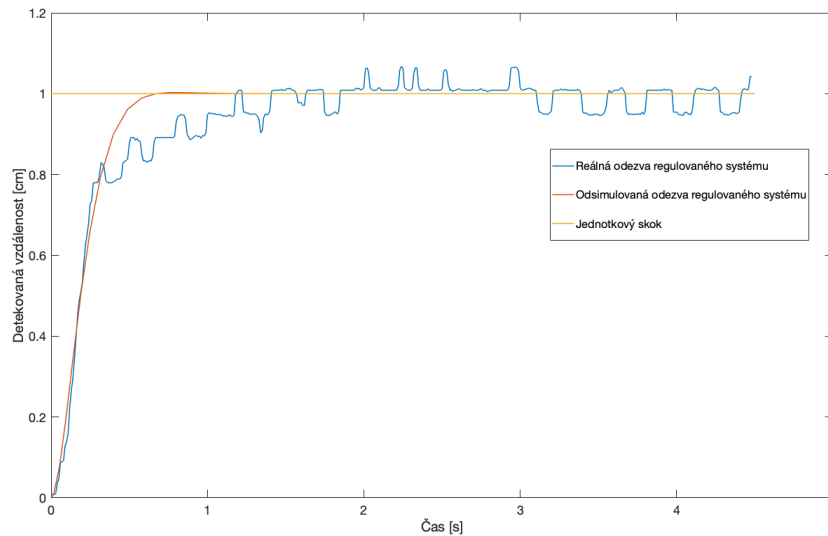
Pro testování jsem implementoval vybraný řídicí algoritmus a nastavil parametry navržené v kap. 2.4. Nejprve jsem do algoritmu nastavil, že se má vznášedlo vznést do pracovního bodu  $P_0$  a tento bod jsem bral jako počáteční. Po 10 s se měl provést skok o 1 cm, který trval 10 s. Poté by se vznášedlo mělo zase vrátit do pracovního bodu a takto stále dokola. Odezva systému na jednotkové skoky je vidět na obr. 40.



**Obr. 40:** Odezva systému na jednotkové skoky

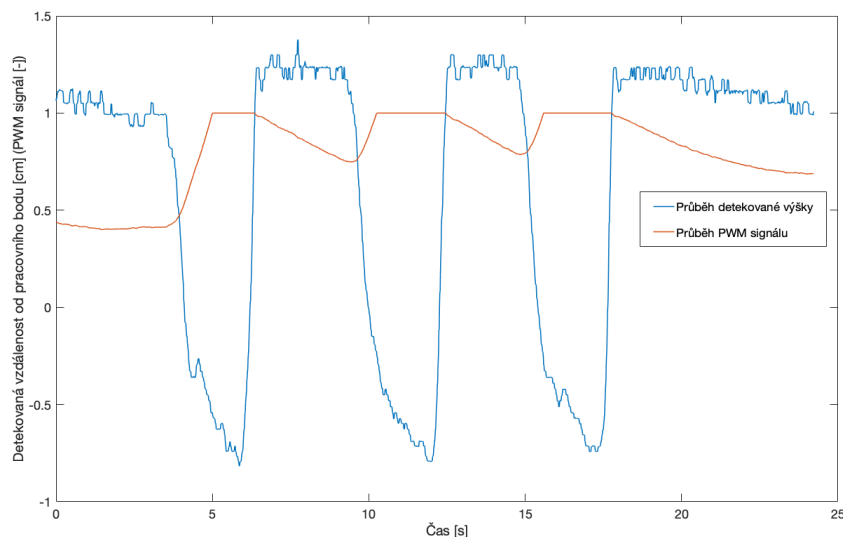
Systém se v rámci možností ustálí vždy na požadované hodnotě. Odchyly na první pohled nejsou tak velké a ve výsledném pohledu jsou ještě menší, protože zobrazená detekovaná výška na obr. 40 je 1 cm, ale skutečná výška vznášedla je 7,1 cm. V této výšce budou kmitavé odchyly ještě méně viditelné. Kmitavé odchyly jsou vlivem kvantizace senzoru, a také vibrací vznášedla.

Jelikož jsem schopný zajistit stejné vstupní podmínky pro simulační i reálnou odezvu, porovnám je, a tím zjistím, jak hodně se od sebe liší, protože nějaké odchyly být vždy musí. Toto porovnání je zobrazeno na obr. 41 a podobnost mezi simulační a reálnou odezvou je do 0,8 cm totožná. Až v této hodnotě se reálná odezva trochu zpomalí a ustálí se později. Důležité však je, že obě dosáhnou požadované hodnoty bez trvale regulační odchyly.



**Obr. 41:** Porovnání odezvy na jednotkový skok reálného a simulačního systému

Poté jsem ještě testoval schopnost algoritmu reagovat na jednotkový skok v podobě snížení paluby vznášedla tím, že budu tlačit rukama na vznášedlo. Vznášedlo se nejprve vzneslo do 1 cm nad pracovní bod, kde jsem chvíli čekal až se systém ustálí, a pak jsem začal tlačit na vznášedlo a snižovat jeho výšku. Na první pohled bylo vidět, že regulovaný systém na snížení výšky okamžitě reaguje, protože otáčky motoru se začaly rapidně zvětšovat. Pro podrobnější průzkum jsem si nechal zobrazit data z průběhu tohoto měření, které jsou vidět na obr. 42.



**Obr. 42:** Odezva regulovaného systému na vnější jednotkový skok v podobě snížení výšky vznášedla rovnoměrným tláčením na palubu

Jak je možné pozorovat na obr. 42, zobrazené průběhy výšky a PWM signálu jsou na sobě závislé. V době když jsem začal snižovat výšku vznášedla tláčením, PWM signál do motoru se začal okamžitě zvětšovat. Z obr. 42 je také možné zjistit, že regulace v 1 cm nad

pracovním bodem je schopná reagovat na snížení jen o 1,55 cm, jelikož v tomto momentě se sepne plný PWM signál. To znamená, že když budu vznášedlo snižovat ještě níže, regulace na tuto změnu nemá už jak lépe reagovat než použít plný PWM, ale tato regulace už nebude tak účinná.

Poslední poznatek z obr. 42 je, že PWM signál pro prvotní a konečný ustálený stav není shodný. Je to tím, že v průběhu měření se baterie vybijí, jelikož se do motoru často pouští plný PWM signál a tak je na konci měření pro ustálený stav potřeba vyšší PWM signál než na začátku.

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat prototypu vznášedla se zpětnovazebním řízením výšku vzduchového polštáře s následným ověřením funkčnosti. Problematika byla rozdělena do několika částí, se kterými bylo třeba se vypořádat pro dosažení zadaného cíle.

Část teoretická byla zaměřena na rešerši principu pohybu a řízení vznášedla. V tomto prvním bloku jsem se z velké části věnoval rešerši, kde jsem porovnával různé možnosti senzorů pro detekci vzdálenosti, ze kterých jsem následně vybral ten nejvhodnější typ a to infračervený. Na akční členy, jako je elektromotor, vrtule, servomotor, mikrokontroler a regulátor, jsem se zaměřil až na konci této části.

Na začátku druhé části praktické jsem představil z čeho, a jak jsem můj prototyp vznášedla zkonstruoval. Na základě teoretické části jsem finálně vybral senzor vzdálenosti, kterým byl infračervený snímač SHARP GP2Y0A51SK0F. Tomuto snímači jsem se věnoval celkem velkou část své práce, jelikož je senzor nelineární, bylo potřeba nejprve jeho nelinearitu popsat exponenciální závislostí. Poté jsem se potýkal se šumem v signálu, který přicházel ze senzoru. Pro odstranění tohoto rušivého prvku, jsem navrhl nejprve analogový filtr, který se však ukázal jako nedostatečný, proto jsem musel použít ještě filtr digitální ve formě klouzavého mediánu. Naneštěstí jsem ještě zjistil, že senzor podléhá ve středních a vyšších výškách svého rozsahu kvantizaci. Proto jsem musel senzor vysunout pod palubu co nejnižší, aby měřená vzdálenost bylo co nejmenší, kde kvantizace není tak velká.

Po zprovoznění senzoru jsem zjišťoval statické a dynamické vlastnosti systému pro experimentální identifikaci matematického modelu v okolí určeného pracovního bodu. Z naměřené přechodové charakteristiky jsem aproximační metodou prof. Strejce získal přenos náhradního systému. Tento systém mi následně posloužil ke zjištění parametrů PI regulátoru, který byl vybrán. Celkový přenos náhradního systému s PI regulátorem jsem zvolil na mezi kmitavosti, protože je to nekmitavý systém s nejrychlejší dynamikou.

Na základě vytvořeného náhradního systému s regulátorem byl navržen algoritmus pro řízení vznášedla. Ten byl založen na zpětné vazbě na detekované vzdálenosti infračerveným senzorem. Navržený řídicí algoritmus byl implementován na vybraném mikrokontroléru s využitím platformy Mbed.

Regulovaný systém byl nejprve odsimulován v MATLABU s využitím Simulinkového toolboxu, kde se ukázaly spočítané parametry regulátoru jako vhodné. Poté byla regulace výšky otestována na reálném prototypu vznášedla, kdy jsem vyzkoušel dva různé jednotkové skoky. Vnitřní spočíval v nastavení jednotkového skoku do programu. Vnější jednotkový skok jsem zařídil, tak že jsem na palubu vznášedla tlačil směrem dolů. Odsimulovaná a reálná odezva se od sebe příliš nelišily. Pro mé výsledky bylo však důležité, že obě odezvy se po určité době ustálily na stejné hodnotě. Regulace bude plně funkční pouze v okolí pracovního



bodou, který jsem si určil ve statické charakteristice.

Experimentální verifikací jsem tedy potvrdil úspěšné dosažení cíle bakalářské práce, kterým byl návrh základního zpětnovazebního řízení modelu vznášedla s aktivním řízením výšky polštáře a jeho následném otestování na reálném prototypu. I přes drobné odchylky se zdá navrhnuté zpětnovazební řízení jako použitelné.

Na závěr bych chtěl dodat, že řízení výšky u vznášedel je dobré právě pro jeho komplexnost, Jelikož se dokáže vznášet nad jakýmkoliv povrchem, a každý povrch má jiné vlastnosti, výška vznášedla bude za konstantních otáček nad každým povrchem jiná, proto je dobré mít výšku vznášedla hlídanou.

Přidávám ještě kompletní model mého prototypu vznášedla viz obr. 43, které je tedy ještě navíc schopno, skrze vysílačku, pohybu vpřed a zatáčení pomocí kormidel, která jsou umístěna za pohonnou vrtulí.



**Obr. 43:** Kompletní prototyp vznášedla

## Seznam použité literatury

- [1] ČTK, Roman VŠETEČKA. Vysoké náklady na provoz a pořízení brzdí jeho využití. *Historie vznášedla a jeho uplatnění v dnešní době* [online] Zveřejněno: 11.června 2009 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/technet/technika/vznasedlo-slavi-50-let-vysoke-naklady-na-provoz-a-porizeni-brzdi-jeho-vyuziti.A090610\\_142359\\_tec\\_technika\\_vse](https://www.idnes.cz/technet/technika/vznasedlo-slavi-50-let-vysoke-naklady-na-provoz-a-porizeni-brzdi-jeho-vyuziti.A090610_142359_tec_technika_vse)
- [2] Bohumil TESAŘÍK. Myšlenka vznášedla se zrodila před třemi stoletími. *Christopher Sydney Cockerell první konstrukce vznášedla* [online] Zveřejněno: 12. února 2017 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/biografie/1966-myslenka-vznasedla-se-zrodila-pred-tremi-stoletimi>
- [3] BCA. Marek LHOTSKÝ. *Design vznášedla* [online] Brno, 2012 [cit. 2021-04-20]. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148088](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148088). Diplomová práce. VUTvBrně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav konstruování.
- [4] *Princip vznášedla* [online]. Vznasedla.com [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.vznasedla.com/princip-vznasedla/>
- [5] *Automatizace – Prostředky pro získávání informace* [online] [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Prvky.pdf>
- [6] František ŠŤASTNÝ *Senzory* [online] Zveřejněno: 1997 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: [http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node16.html](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html)
- [7] Antonín VOJÁČEK *Ultrazvukové senzory přiblížení - funkce, provedení, použití* [online] Zveřejněno: 7. Červenec 2017 - 18:40 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html>
- [8] Mgr. Petr BRABEC a Filip BARTŮNĚK *Rychlost zvuku* [online] Zveřejněno: 13. 11. 2012 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/rychlost-zvuku>
- [9] RNDr. Jaroslav KUSALA *Radarová encyklopedie* [online] Zveřejněno: 2008 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: [https://www.army.cz/images/id\\_8001\\_9000/8753/radar/radar.htm](https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/radar.htm)
- [10] Christian WOLFF *Měření vzdálenosti pomocí radaru* [online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb07.cz.html>
- [11] Benne de BAKKER *How to use a SHARP GP2Y0A21YK0F IR Distance Sensor with Arduino* [online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.makerguides.com/sharp-gp2y0a21yk0f-ir-distance-sensor-arduino-tutorial/>
- [12] Antonín VOJÁČEK *PSD - Position Sensitive Detector* [online] Zveřejněno: 10. Březen 2005 - 11:43 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z:

<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005031001>

- [13] Martinek RRADISLAV *Senzory v průmyslové praxi*. Vydavatelství BEN - technická literatura. 30.3.2004. ISBN 80-7300-114-4 9788073001148
- [14] Pavel POSPÍCHAL *Optické sítě* [online] [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: [https://extranet.kr-vysocina.cz/download/odbor\\_informatiky/prezentace/comdays/26-04-04/Optokon.pdf](https://extranet.kr-vysocina.cz/download/odbor_informatiky/prezentace/comdays/26-04-04/Optokon.pdf)
- [15] Matin NOVÁK *Technická měření* Vydavatelství ČVUT v Praze. 2018, ISBN 978-80-01-06388-0
- [16] Antonín VOJÁČEK *Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření* [online] Zveřejněno: 13. Červenec 2015 - 0:00 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [17] Jakub ČÍŽEK *Pojďme programovat elektroniku: Jak vlastně funguje akcelerometr a gyroskop nejen ve vašem telefonu*. In: zive.cz [online] Zveřejněno: 2. září 2018 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-jak-vlastne-funguje-akcelerometr-a-gyroskop-nejen-ve-vasem-telefonu-sc-3-a-194858/default.aspx#articleStart>
- [18] Debra *Gyroscopes and Accelerometers on a Chip* [online] Zveřejněno: 31. Března, 2013 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.geekmomprojects.com/gyroscopes-and-accelerometers-on-a-chip/>
- [19] Jana BŘEZINOVÁ *Poznejte tajemství elektromotoru* In: elektrina.cz [online] Zveřejněno: 7. února 2020 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/jak-funguje-elektromotor>
- [20] *Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory* In: elektroprumysl.cz [online] Zveřejněno: 13. Září 2019 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/bezkartacove-stejnosmerne-bldc-motory>
- [21] DEJAN *How Brushless Motor and ESC Work* [online] [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>
- [22] Ing. Jan VIDIM *PWM signál a práce s ním* In: vytapeni.tzb-info.cz [online] Zveřejněno: 17. Listopadu 2014 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/11990-pwm-signal-a-prace-s-nim>
- [23] David ZAHRADNÍK *KONSTRUKCE BEZPILOTNÍHO LETADLA PRO GEODETICKÉ PRÁCE* [online]. Praha, Červen 2019 [cit. 2021-05-18]. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Ústav geodézie a kartografie. Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D

- [24] *Princip detekce překážek ultrazvukem* [online]. 6. Června 2018 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2018/microbit-a-sonar/>
- [25] *NUCLEO-F103RB STMICROELECTRONICS* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/nucleo-f103rb/vyvojove-kity-pro-obvody-stm/stmicroelectronics/>
- [26] *Datasheet senzoru GP2Y0A51SK0F* [online]. [cit. 2020-05-22]. <https://www.pololu.com/file/0J845/GP2Y0A41SK0F.pdf.pdf>
- [27] Ing. Daneil ŠEBÍK. *Ovládání elektrického longboardu přenosem vlastní váhy jezdce* [online] Praha, 2020 [cit. 2021-05-23]. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90333>
- [28] Jaroslav Reichl a Martin Všeticka *Kvantování signálu* [online] [cit. 2021-05-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1357-kvantovani-signalu>
- [29] HOFREITER, Milan. *Základy automatického řízení*. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2016. ISBN 978-80-01-05007-1.
- [30] *Identifikace dynamických systémů* [online] [cit. 2021-05-30]. Dostupné z: 1.SŠidentifikacedynamickýhsystémů-4.pdf
- [31] Bc. Pavel Konfršt. *Metody samočinného nastavování PID regulátorů* [online] Pardubice, 2014 [cit. 2021-06-12]. [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/56085/KonfrstP\\_SamocinneNastaveni\\_LK\\_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y&fbclid=IwAR2klnXaTw5aYoXrgyridvoozyboiRMInfvd9D9J7rU5etGQTRgwmu1LeEE](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/56085/KonfrstP_SamocinneNastaveni_LK_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y&fbclid=IwAR2klnXaTw5aYoXrgyridvoozyboiRMInfvd9D9J7rU5etGQTRgwmu1LeEE)
- [32] *Arm MBED: Mbed OS* [online]. [cit. 2021-06-3]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/mbed-os/>