



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PŘÍPRAVEK 1DOF HELIKOPTÉRY

1DOF HELICOPTER APPARATUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Dědič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Roman Dědič

ID: 230052

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Přípravek 1DOF helikoptéry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte matematický model 1DOF helikoptéry na rameni
2. Implementujte model helikoptéry v prostředí MATLAB Simulink
3. Sestavte reálný model helikoptéry z běžně dostupných dílů
4. Do prostředí MATLAB Simulink nainstalujte balíky pro podporu STM32 od STMicroelectronics
5. Vytvořte Simulink model pro obsluhu periferií podporovaného STM Discovery kitu
6. Realizujte řízení úhlu natočení ramene helikoptéry pomocí STM Discovery kitu
7. Verifikujte model helikoptéry pomocí reálné soustavy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. Computer-controlled systems: theory and design. Courier Corporation, 2013.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem přípravku 1DOF helikoptéry a jeho matematickým modelem. Důležitou částí této práce je identifikace parametrů fyzické soustavy a následné ověření pomocí simulace. Další částí je implementace řízení BLDC motoru, který byl použitý na fyzickém přípravku. V poslední části se práce zabývá návrhem řízení polohy natočení ramene 1DOF helikoptéry. Jsou zde použity regulátory PID a řízení v klouzavém režimu. Všechny metody řízení byly simulovány a následně ověřeny na přípravku. Obsluha hardwaru byla provedena pomocí mikroprocesoru STM a programu Simulink.

Klíčová slova

1DOF helikoptéra, BLDC, Six-Step Commutation, STM, Matlab, Simulink, PID, SMC, identifikace nelineárního systému

Abstract

This thesis deals with the design of a 1DOF helicopter fixture and its mathematical model. An important part of this thesis is the identification of the parameters of the physical system and subsequent verification by simulation. Another part is the implementation of the BLDC motor control that was used on the physical fixture. The last part of the thesis deals with the design of the pitch attitude control of the 1DOF helicopter arm. PID controllers and sliding mode control are used here. All control methods were simulated and then verified on the fixture. Hardware operation was performed using an STM microprocessor and Simulink software.

Keywords

1DOF helicopter, BLDC, Six-Step Commutation, STM, Matlab, Simulink, PID, SMC, nonlinear system identification

Bibliografická citace

DĚDIČ, Roman. Přípravek 1DOF helikoptéry. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151805>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Lukáš Pohl.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Roman Dědič
VUT ID studenta:	230052
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Přípravek 1DOF helikoptéry

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukášovi Pohlovi, PhD. za vedení bakalářské práce, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK.....	8
ÚVOD	9
1. TEORETICKÝ ROZBOR.....	10
1.1 MATEMATICKÝ POPIS A IDENTIFIKACE SOUSTAVY	10
1.1.1 <i>Matematický model 1DOF helikoptéry</i>	10
1.1.2 <i>Stavový popis systému</i>	11
1.1.3 <i>Identifikace parametrů soustavy</i>	12
1.2 ŘÍZENÍ ÚHLU NATOČENÍ	13
1.2.1 <i>Regulace pomocí PID regulátoru</i>	13
1.2.2 <i>Řízení v klouzavém režimu</i>	15
1.3 VÝBĚR POHONNÉ JEDNOTKY VRTULE	16
1.3.1 <i>Komutátorové DC motory (brushed DC motor)</i>	16
1.3.2 <i>Bezkartáčové DC motory (brushless DC motor)</i>	17
1.4 ŘÍZENÍ BLDC MOTORU	18
1.4.1 <i>3fázový střídač</i>	18
1.4.2 <i>Algoritmus Six-step commutation</i>	19
1.4.3 <i>Komutace s použitím Hallových snímačů</i>	20
1.4.4 <i>Komutace BLDC motoru bez použití snímače polohy</i>	20
1.4.5 <i>Metoda založená na měření indukčnosti</i>	21
1.4.6 <i>Metoda založená na měření indukovaného napětí</i>	21
2. PRAKTICKÁ ČÁST	23
2.1 PŘÍPRAVEK.....	23
2.1.1 <i>Inspirace</i>	23
2.1.2 <i>Návrh vlastního přípravku</i>	24
2.2 POUŽITÝ HARDWARE.....	26
2.2.1 <i>Vývojová deska STM Nucleo-G474RE</i>	27
2.2.2 <i>Výkonová deska X-Nucleo-IHM07M1</i>	27
2.2.3 <i>BLDC motor Bull-Running BR2804-1700kV</i>	29
2.2.4 <i>Snímač polohy AMS AS5147P</i>	29
2.3 ŘÍZENÍ BLDC MOTORU	31
2.3.1 <i>Nastavení periférií</i>	31
2.3.2 <i>Snímání polohy ramene</i>	32
2.3.3 <i>Implementace řídicího algoritmu</i>	33
2.4 IDENTIFIKACE A SIMULACE 1DOF HELIKOPTÉRY	35
2.4.1 <i>Závislost točivého momentu od motoru na střídě</i>	35
2.4.2 <i>Identifikace parametrů</i>	36
2.4.3 <i>Simulace soustavy</i>	39
2.5 NÁVRH REGULÁTORŮ ŘÍZENÍ POLOHY	40
2.5.1 <i>Regulace pomocí PID regulátoru</i>	40
2.5.2 <i>Experimentální nastavení PID regulátoru</i>	41
2.5.3 <i>Nastavení PID regulátoru pomocí programu Matlab</i>	42

2.5.4	<i>Návrh řízení v klouzavém režimu</i>	43
2.5.5	<i>Implementace řízení v klouzavém režimu</i>	46
2.5.6	<i>Porovnání regulátorů</i>	50
ZÁVĚR		51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		52
PŘÍLOHY		54

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Model 1DOF helikoptéry	10
Obrázek 2 - Vnitřní struktura PID regulátoru [4].....	13
Obrázek 3 - Principiální schéma 3f střídače	18
Obrázek 4 - Přípravek 3DOF helikoptéry od firmy Quanser [12]	23
Obrázek 5 - Ložiskový domek	24
Obrázek 6 – Díl pro uchycení motoru.....	25
Obrázek 7 - 3D model přípravku 1DOF helikoptéry	26
Obrázek 8 - STM Nucleo-G474RE.....	27
Obrázek 9 – X-Nucleo-IHM07M.....	28
Obrázek 10 - Blokové schéma snímače polohy AS5147P [13]	29
Obrázek 11 - Umístění permanentního magnetu vůči obvodu AS5147P [13].....	30
Obrázek 12 - Průběh signálů na výstupu enkodéru [14]	32
Obrázek 13 - Simulink model pro vyčítání úhlu natočení	33
Obrázek 14 - Blokové schéma zapojení řízení BLDC motoru.....	33
Obrázek 15 - Implementace řízení v programu Simulink	34
Obrázek 16 - Závislost momentu od motoru na jeho střídě	35
Obrázek 17 - Změřená data pro identifikaci	37
Obrázek 18 - Porovnání simulace a fyzické soustavy.....	38
Obrázek 19 - Model 1DOF helikoptéry vytvořený v programu Simulink	39
Obrázek 20 - Porovnání odezvy na jednotkový skok o hodnotě 72	40
Obrázek 21 - Simulace odezvy PID regulátoru.....	41
Obrázek 22 - Odezva PID regulátoru na fyzické soustavě.....	42
Obrázek 23 - Simulace odezvy PID regulátoru.....	43
Obrázek 24 - Odezva regulátoru na fyzické soustavě.....	43
Obrázek 25 - Simulink model řízení v klouzavém režimu.....	46
Obrázek 26 - Trajektorie systému při použití relé	47
Obrázek 27 - Akční zásah při použití funkce signum	47
Obrázek 28 - Ambrosinova aproximace [2].....	48
Obrázek 29 - Trajektorie systému při použití Ambrosinovy aproximace	48
Obrázek 30 - Akční zásah při použití Ambrosinovy aproximace	49
Obrázek 31 - Odezva fyzické soustavy při řízení v klouzavém režimu	49
Obrázek 32 - Porovnání jednotlivých regulátorů.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - komutační tabulka pro algoritmus Six-step commutation	20
Tabulka 2 - přiřazení IO k hardwarovým funkcím	31
Tabulka 3 - parametry PID regulátoru	41
Tabulka 4 - parametry PID regulátoru	42

ÚVOD

Tato bakalářská práce se věnuje přípravku 1DOF helikoptéry na rameni. Cílem práce je vytvoření matematického modelu, který popisuje dynamiku fyzické soustavy a navrhnout vhodné řízení úhlu natočení ramene do žadané polohy. Následuje návrh fyzického přípravku a identifikace parametrů pro co nejpřesnější napodobení chování simulované soustavy s fyzickou soustavou. Vzhledem k tomu, že je vytvořen vlastní přípravek, je nezbytnou částí i oživení a návrh obslužného modelu v programu Simulink pro obsluhu periférií mikroprocesoru STM.

Práce je rozdělena do dvou hlavní částí, na první část s názvem Teoretický rozbor a druhou část s názvem Praktická část. V teoretickém rozboru je odvozen samotný matematický model 1DOF helikoptéry na rameni. Následně je uvedena možnost reprezentace tohoto nelineárního modelu pomocí stavových rovnic, které jsou typickým matematickým aparátem právě v odvětví teorie řízení. Dále je zde popsán možný způsob identifikace parametrů soustavy. V následující části jsou popsány možné druhy elektrického pohonu vrtule. Je zde popsán rozdíl mezi kartáčovým DC motorem a bezkartáčovým DC motorem (BLDC). Z důvodu použití BLDC motoru je v další části popis hardwarové a softwarové části řízení tohoto typu motoru a snímání polohy jeho rotoru.

V praktické části následuje návrh fyzického přípravku v programu Fusion 360, který je následně vyroben. Jsou zde popsány jednotlivé konstrukční části. U většiny částí je využito výroby pomocí 3D tisku, který je v dnešní době relativně dostupný. Následuje popis konkrétního hardwaru, který byl použitý pro řízení přípravku. V další kapitole je vytvořen model v programu Simulink, který obsluhuje hardware. Nezbytnou částí tohoto modelu je algoritmus pro řízení BLDC motoru na základě snímače polohy rotoru. Na fyzické soustavě je provedena identifikace a následné ověření chování se simulovaným modelem. Poslední část se věnuje samotnému návrhu regulátorů typu PID a řízení v klouzavém režimu.

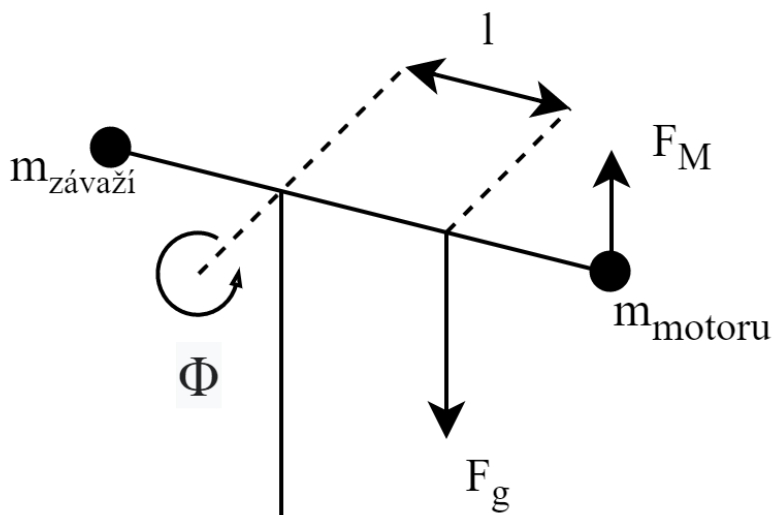
1. TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Matematický popis a identifikace soustavy

1.1.1 Matematický model 1DOF helikoptéry

Základním předpokladem pro kvalitní řízení úhlu natočení ramene je získání matematického modelu, který bude co nejlépe popisovat chování reálného přípravku včetně jeho konkrétních parametrů.

Přípravek 1DOF helikoptéry je tvořen ramenem, které je uloženo na ložiskách umožňující rotační pohyb. Tento systém má tedy pouze jeden stupeň volnosti. Na jedné straně ramene je umístěn DC motor s vrtulí, která vytváří hnací sílu ramene. Na druhé straně je umístěno závaží, které svou hmotností vyvažuje rameno tak, aby nebyl potřebný příliš velký točivý moment, který je schopný motor dodat. Přípravek je znázorněn na Obr. 1. Úhel natočení ramene byl zvolen tak, aby byl nulový v horizontální poloze ramene, narůstá při pohybu proti směru hodinových ručiček (při kladném momentu motoru). Naznačení směru jednotlivých vektorů viz. Obr. 1.



Obrázek 1 - Model 1DOF helikoptéry

Na samotné rameno působí gravitační síla, která vytváří moment a způsobuje jeho vychýlení z nulové polohy:

$$M_g = -m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Kde m je hmotnost celého ramene včetně motoru a závaží, g je tíhové zrychlení, l je vzdálenost těžiště od osy otáčení a θ je úhel natočení ramene. Tento moment je tedy závislý na úhlu natočení ramene a je největší při nulové výchylce.

Vychylování ramene je pomocí síly od vrtule, tato síla působí kolmo na rameno, není tedy závislá na úhlu natočení. Výsledný moment, který působí na rameno je úměrný otáčkám motoru a vzdálenosti jeho osy od osy otáčení ramene. Obecně můžeme tento moment popsat pomocí funkce, kterou bude nutno následně identifikovat. Tato funkce v sobě zahrnuje všechny zmíněné závislosti. Dosazením napětí (napětí je úměrné otáčkám) přiváděného na motor dostaneme moment působící na rameno:

$$M_m = f(U_m) \quad (2)$$

Při pohybu ramene působí proti tomuto pohybu dynamický moment závislý na rychlosti otáčení. Tento moment způsobuje viskózní tření vzduchu a tření ložisek, ve kterých je uložena osa ramene:

$$M_v = -B \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

Kde B_m je součinitel viskózního tření a θ je úhel natočení ramene.

Při pohybu ramene je nutné brát v úvahu ještě sílu působící od momentu setrvačnosti, který působí při změně rychlosti ramene:

$$M_J = -J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4)$$

Výsledná rovnice popisující pohyb ramene je dána součtem jednotlivých momentů:

$$M_m + M_g + M_v + M_J = 0 \quad (5)$$

Vyjádřením nejvyšší derivace získáme pohybovou rovnici ramene [1]:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{f(U_m) - m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta - B \cdot \frac{d\theta}{dt}}{J} \quad (6)$$

1.1.2 Stavový popis systému

V teorii řízení a modelování se pro matematický popis dynamiky systému většinou používá tzv. stavový popis systému. Stavové rovnice jsou nejčastěji ve tvaru soustavy diferenciálních rovnic 1. řádu zapsané v maticové, resp. vektorové formě:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (7)$$

$$\mathbf{y} = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (8)$$

$$\mathbf{x}(t_0) \quad (9)$$

kde jednotlivé x_i představují stavové veličiny, u_i vstupní veličiny, y_i výstupní veličiny a t časovou závislost systému. Pokud je systém časově invariantní, tak se zde časová závislost neuplatní. Počáteční hodnoty stavů udává vektor $\mathbf{x}(t_0)$.

Pro zápis matematického modelu 1DOF helikoptéry do tvaru stavového popisu přiřadíme stavům x_i fyzikální veličiny:

$$x_1 = \theta \quad (10)$$

$$x_2 = \dot{\theta} \quad (11)$$

stav x_1 představuje okamžitou polohu ramene a x_2 jeho okamžitou úhlovou rychlost. Nyní můžeme přepsat pohybovou rovnici do tvaru stavového popisu [2]:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{f_{Mm}(u) - m \cdot g \cdot l \cdot \cos(x_1) - B \cdot x_2}{J} \quad (13)$$

$$y = x_1 \quad (14)$$

1.1.3 Identifikace parametrů soustavy

Pro návrh řízení je nutné znát nejen matematický popis chování systému, ale také jeho konkrétní parametry. Proces zjišťování parametrů se nazývá identifikace, k danému systému se chováme jako ke „skříňce“, která má vstupy a výstupy, vnitřní struktura může či nemusí být známa. Známe-li některé informace o systému je vhodné je během identifikace použít a nesnažit se je pomocí identifikace odhadnout:

- „Černá skříňka“ („*Black box*“) – o vnitřní struktuře, a tedy ani parametrech nemáme žádnou informaci. Pro identifikaci je nutné z chování systému odhadnout jeho matematický popis a následně se pokusit identifikovat parametry.
- „Šedá skříňka“ („*Gray box*“) – vnitřní strukturu známe z matematického modelu, ale neznáme parametry. V tomto případě identifikujeme pouze parametry.
- „Bílá skříňka“ („*White box*“) – v tomto případě známe vnitřní strukturu jako u „šedé skříňky“, parametry jsme schopni dopočítat z fyzikálních znalostí systému. Není tedy potřeba systém identifikovat na základě chování fyzického modelu.

Pokud je systém lineární, není s identifikací většinou problém, chování systému je dáno operátorovým přenosem. Není tedy problém, pokud se jedná o systém typu „Černá skříňka“. Pokud je systém nelineární, je vhodné znát alespoň matematický popis chování, tedy identifikace systému typu „Gray box“. V obou případech spočívá samotná identifikace na porovnávání dat naměřených na fyzickém modelu a na simulovaném modelu, kdy se snažíme úpravou jednotlivých parametrů dosáhnout stejného průběhu dat. Tato metoda má název deterministická.

Pokud identifikujeme lineární systém, jde použít analytické metody pro řešení tohoto problému, např. metoda nejmenších čtverců. Jedná-li se o nelineární systém je obvykle nutné použít numerické metody řešení nelineárních nejmenších čtverců např. Gauss-Newton nebo Levenberg-Marquardt.

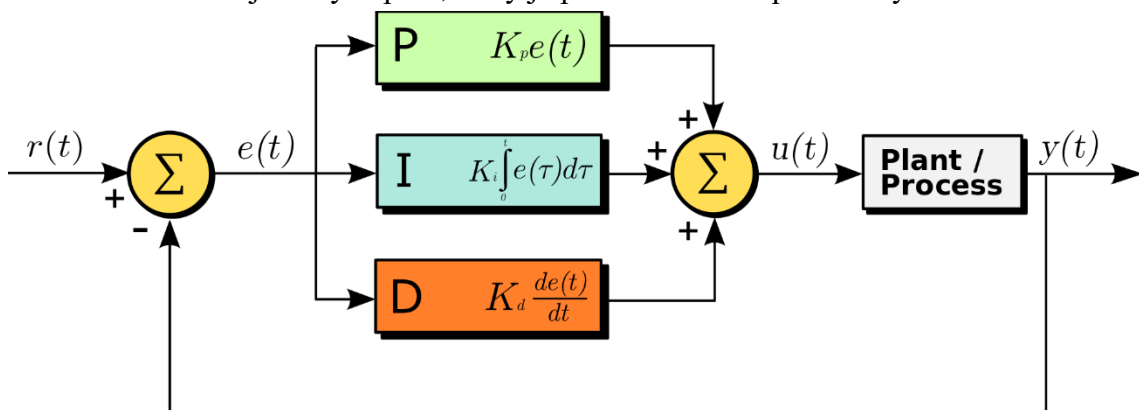
Z modelu 1DOF helikoptéry je zřejmé, že se jedná o nelineární systém, jednak z důvodu omezení maximální a minimální polohy (nelinearita typu saturace) a omezení akčního zásahu (nelinearita typu saturace a necitlivost), tak hlavně z důvodu goniometrické funkce \cos . Jelikož známe matematický popis chování, tak se jedná o identifikaci systému typu „Gray box“ [2] [3].

1.2 Řízení úhlu natočení

1.2.1 Regulace pomocí PID regulátoru

Typickým často používaným řešením regulace dané soustavy je právě použití uzavřené regulační smyčky s PID regulátorem či jednodušším vynecháním některé jeho složky. Pokud nebereme v potaz omezení výstupu (akčního zásahu), jedná se o lineární regulátor. Jak již bylo zmíněno, nejčastějším zapojením je zpětnovazební zapojení uvedeno na Obr. 2.

Do regulátoru je přiváděna tzv. regulační odchylka e , rozdíl požadované a skutečné hodnoty výstupu regulované soustavy. Regulátor na tuto odchylku reaguje nastavením akčního zásahu na jeho výstupu x , který je přiváděn na vstup soustavy.



Obrázek 2 - Vnitřní struktura PID regulátoru [4]

Vnitřní strukturu PID regulátoru je možné vidět na Obr. 2. Použitím jen některých částí vznikají kombinace jednodušších regulátorů např. P, I, PI apod. Volba konkrétního regulátoru je závislá na konkrétní aplikaci. Proporcionální člen P působí na výstup pouze hodnotou vstupu násobeným určenou konstantou K_P :

$$x(t) = K_P \cdot e(t) \quad (15)$$

Integrační část I má na výstupu integrál regulační odchylky, tato hodnota je ještě násobena konstantou jako u P složky, aby bylo možné měnit její vliv na celkový výstup regulátoru:

$$x(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + x(0) \quad (16)$$

Derivační složka má na výstupu derivaci regulační odchylky, opět je tento člen násoben konstantou pro nastavení vlivu na výstup regulátoru:

$$x(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Součtem jednotlivých výstupu těchto složek vznikají kombinace, jak již bylo uvedeno. Prvotní výběr může být ovlivněn tím, zda chceme dosáhnout nulové regulační odchylky. Pokud soustava nemá integrační charakter (nemá pól v nule), je nutné pro dosažení nulové regulační odchylky zařadit integrační člen do regulátoru. Pokud chceme dosáhnout nulové regulační odchylky i při působení skokové změny poruchy, je tato složka v regulátoru nutností. Návrhových metod tohoto regulátoru na lineární systém je několik např. Ziegler-Nichols (nastavení parametrů na základě chování regulační smyčky na mezi stability), metoda pokus-omyl, metoda nastavení podle průběhu frekvenční charakteristiky. Další z možností návrhu je pomocí programu Matlab, ať už pomocí nástroje sisotool nebo pomocí funkce PID tuning přímo v bloku PID regulátoru v prostředí Simulink. Volba metody závisí na konkrétních možnostech a požadavcích. Pokud máme nelineární soustavu, pak je nutné provést její linearizaci a pro tento lineární přenos následně navrhnout regulátor. Přenos spojitého regulátoru v bloku PID v programu Simulink je dán tímto vzorcem:

$$F(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D N}{1 + N \frac{1}{p}} \quad (18)$$

Pro přenos diskrétního regulátoru platí tento vzorec:

$$F(z) = K_P + \frac{K_I T_S}{z-1} + \frac{K_D N}{1 + N T_S \frac{1}{z-1}} \quad (19)$$

Parametr N je filtrační koeficient, který zamezuje zesilování šumu derivační složkou a zároveň zaručí kauzalitu regulátoru. U diskrétního regulátoru ještě vstupuje do výpočtu vzorkovací frekvence [5].

V případě řízení nelineárních soustav může nastat problém s tzv. „Wind-up“ jevem, kdy dochází k „naintegrovaní“ velké hodnoty v případě soustavy s dlouhou časovou konstantou nebo pokud není možné dosáhnout požadované hodnoty vlivem saturace. V případě následné změny požadované hodnoty regulátor musí nejdříve tuto hodnotu nejdříve „odintegrovat“, to způsobí, že se po určité dobu regulační smyčka chová jinak, než se předpokládá. K zamezení tohoto jevu je možné použít několik metod. Jedna z možností, která je v Simulink bloku označena jako „Back-calculation“ porovnává hodnotu výstupu regulátoru s modelem saturace, pokud dojde k překročení, je přiveden rozdíl mezi těmito signály na vstup regulátoru přes určité zesílení. Další varianta je tzv. „Clamping“, tedy omezení maximální hodnoty integrátoru [2].

1.2.2 Řízení v klouzavém režimu

Tento způsob řízení se řadí mezi nelineární. Návrh tohoto regulátoru vyžaduje alespoň částečnou znalost chování systému (stavový popis systému). Tento typ řízení již spadá mezi metody tzv. robustního řízení. Použití řízení v klouzavém režimu dovoluje použití modelu, který úplně nereprezentuje fyzickou soustavu, např. neznalost některých parametrů, zjednodušený či vynechaný popis dynamiky systému. Nejistoty znalosti systému tedy lze rozdělit na dvě skupiny:

- *Strukturované (parametrické)*
- *Nestrukturované (nezahrnutí dynamiky)*

První případ zahrnuje popis chování dynamiky v matematickém modelu, ale nejsou známy (nebo jsou známy nepřesně) konkrétní parametry. V druhém případě může jít o zjednodušení či vynechání popisu dynamiky systému, např. snížení řádu systému. Další typická aplikace robustního řízení je v případě, že se mění parametry v čase (např. změna vlastností vzduchu při změně nadmořské výšky), pak je další variantou tzv. adaptivní řízení.

Základní myšlenkou je, že je jednodušší řídit systém, který je popsán pouze jednou rovnicí prvního řádu než řídit systém vyššího řádu. Návrh tohoto řízení využívá znalosti okamžitých hodnot stavů tak jak je tomu např. u zpětnovazební linearizace. Výsledný systém se snaží pomocí akčního zásahu „dostat“ hodnoty stavů na určenou přímku (obecně křivku), po které následně „klouže“ do určeného místa (většinou hodnoty stavů rovny nule) [2] [6].

Postup návrhu je uveden v praktické části již se změřenými hodnotami.

1.3 Výběr pohonné jednotky vrtule

Při výběru pohonné jednotky vrtule, která bude tvořit hnací sílu pro natočení ramene, je nutné dbát na některé požadavky. Při tomto malém modelu ramene jsou požadovány otáčky motoru přibližně 10000ot/min (výrobce motoru udává maximální otáčky 19000ot/min) úměrná hmotnost vůči hmotnosti ramene a plynulá regulace otáček, respektive točivého momentu. Elektrický motor převádí elektrickou energii na kinetickou, točivý moment je tvořen interakcí mezi dvěma magnetickými poli, magnetickým polem statoru a magnetickým polem rotoru. Základní rozdělení je na AC a DC motory. U DC motorů je nutné zajistit, aby vinutím tekla střídavý proud (z důvodu zajištění točivého magnetického pole), to se provádí pomocí komutátoru (mechanický střídač) nebo elektronicky. Motory s elektronickou komutací (anglicky EC motor – electronically commutated motor) musí být řízeny kontrolérem (střídačem), který zajistí střídavé buzení vinutí, jedná se tedy v podstatě o AC synchronní motory. Standartní AC asynchronní a synchronní motory nejsou pro požadovanou aplikaci vhodné, budeme se tedy zabývat pouze DC motory.

1.3.1 Komutátorové DC motory (brushed DC motor)

Komutátorové DC motory jsou jedny z nejdéle známých motorů. Tento typ motoru tvoří tři základní části – rotor, stator a komutátor. Působením magnetické síly mezi statorem a rotorem je tvořen točivý moment. Magnetické pole statoru je stacionární, nemění se. Statorové pole je tvořeno buďto permanentními magnety (většinou u malých motorů) nebo pomocí vinutí, které je buzeno stejnosměrným proudem (větší motory). Stator je vždy tvořen vinutím, respektive více vinutími. Tyto vinutí jsou přepínány pomocí komutátoru a tím je zajištěno, že mezi statorem a rotorem stále působí síla. Komutátor je tvořen kartáči, které jsou na statorové části a lamelami, které jsou na rotorové části.

Točivý moment motoru je dán vztahem:

$$M = k \cdot \phi \cdot I_A \quad (20)$$

Točivý moment je úměrný magnetickému toku statoru a proudem procházejícím rotorovým vinutím.

Otáčky motoru jsou dány vztahem:

$$n = \frac{U}{k \cdot \phi} \quad (21)$$

Otáčky jsou tedy přímo úměrné napětí, které přivádíme na rotorové vinutí a nepřímo úměrné magnetickému toku statoru. Otáčky tedy lze měnit změnou napájecího napětí.

Výhodou těchto motorů je jednoduché řízení, není nutné použití složitých střídačů, změna otáček, tedy napájecího napětí, je možná např. pomocí PWM (pulse width modulation – pulzně šířková modulace). Největší nevýhodou je právě komutátor, kdy vlivem mechanického tření mezi kartáčem a lamelami dochází k jeho opotřebením, tímto je tedy omezena životnost těchto motorů. U některých aplikací může být také nežádoucím jevem komutátoru vznik rušení, nečistot mechanickým opotřebením či větší hlučnost oproti motorům bez komutátoru. Komutátor také omezuje maximální možné otáčky. Z důvodu vyšší hmotnosti rotoru než u BLDC motorů (podle konstrukce) mají oproti nim větší moment setrvačnosti a tím i menší hodnotu zrychlení [7].

1.3.2 Bezkartáčové DC motory (brushless DC motor)

Tyto motory se skládají, stejně jako komutátorové DC motory, ze statoru a rotoru. Rotor je v případě těchto motorů tvořen permanentními magnety, na rotační část tedy není nutné přivádět elektrické napětí pro buzení magnetického toku a odpadá tedy nutnost použití sběracích kartáčů a kroužků. Statorová část je tvořena vinutími. Toto vinutí může být 1fázové či vícefázové, podle požadavků na konkrétní aplikaci. Jednoduché motory s 1fázovým či 2fázovým vinutím se používají např. pro pohon ventilátorů ve spotřební elektronice. Nejčastěji se však můžeme setkat s motory s 3fázovým vinutím, tyto vinutí jsou zapojena buďto do hvězdy nebo do trojúhelníka. Zapojení střídače a budicí signály jsou v obou případech stejné.

Točivý moment opět vzniká vzájemným působením magnetického pole statoru a magnetického pole rotoru, tedy dochází zde k silovému působení mezi magnetickým tokem tvořeným průchodem proudu statorovým vinutím a magnetickým polem permanentních magnetů v rotoru. Jelikož se magnetické pole statoru i rotoru točí stejnou úhlovou rychlostí, patří tyto motory do skupiny synchronních motorů.

Podle konstrukce magnetického obvodu statoru a rotoru se motory liší počtem magnetických pólů. Nižší počet pólů je lepší v případě požadavku na vyšší otáčky, vyšší počet pólů zase v případě požadavku na větší točivý moment.

Podle umístění permanentních magnetů rotoru vůči statoru se rozdělují BLDC motory na tzv. inrunner a outrunner. Motor typu inrunner má rotor umístěn uvnitř statoru, tyto motory dosahují zpravidla vyšší rychlosti oproti motorům typu outrunner, které mají rotor vně statoru, permanentní magnety jsou tedy umístěny po obvodu v plášti rotoru. Tyto typy motoru dosahují oproti motorům typu inrunner vyššího točivého momentu.

Bezkartáčové motory mají tedy oproti komutátorovým motorům tyto výhody:

- Lepší závislost rychlosti a točivého momentu
- Vyšší účinnost
- Vyšší životnost
- Menší hlučnost
- Zpravidla vyšší otáčky

Bezkartáčový motor o stejné velikosti jako komutátorový motor tedy dosahuje většího momentu, to je výhodou, pokud je ve výsledné aplikaci požadavek na nízkou hmotnost a velikost motoru. Mezi nevýhody patří složitější způsob řízení motoru z důvodu nutnosti použití střídače. Při řízení těchto motorů je nutné znát úhel natočení rotoru vůči statoru, to je provedeno pomocí snímače polohy natočení rotoru, Hallových snímačů nebo měřením elektromotorického napětí (back EMF), které motor generuje při odpojeném vinutí [8].

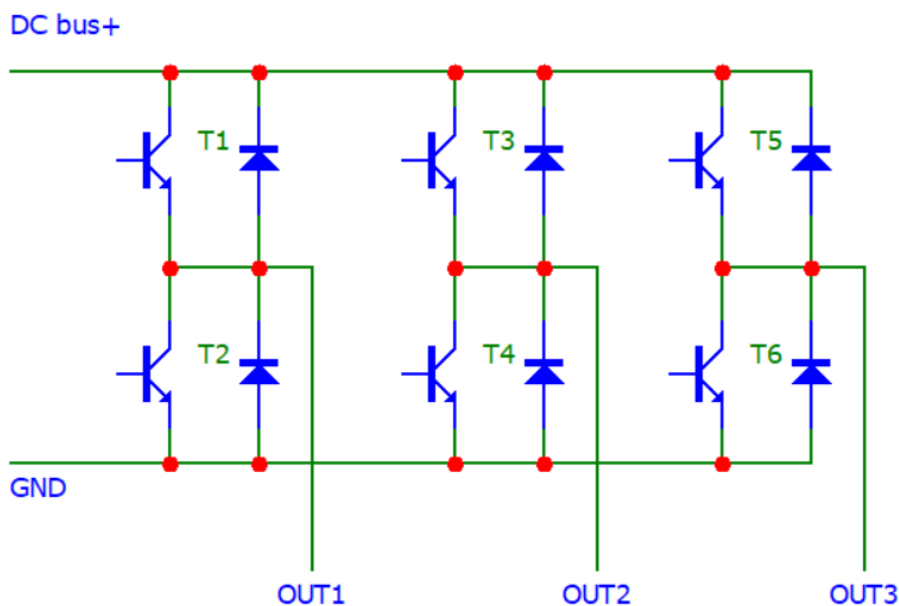
Řízením BLDC motoru se zabývá další kapitola této práce. Jako pohon vrtule pro řízení úhlu ramene bude tedy použit BLDC motor.

1.4 Řízení BLDC motoru

Tato část práce se bude zabývat možnými způsoby řízení 3fázových BLDC motorů. Pro řízení těchto motorů je nutné generovat 3fázový střídavý signál z napájecího DC napětí. Všechny metody popisované v této kapitole mají stejnou část – koncový výkonový stupeň – střídač, liší se pouze způsobem měření polohy rotoru, průběhy budících signálů a samotným algoritmem.

1.4.1 3fázový střídač

Střídač je elektronický obvod, který zajišťuje vytvoření střídavého napětí ze stejnosměrného napětí. Tímto napětím je následně buzeno statorové vinutí motoru. Střídač pro 3fázový motor tvoří 3 páry tranzistorů, každý pár je zapojen jako půl můstek. Většinou jsou používány tranzistory MOSFET nebo IGBT. Principiální schéma zapojení tranzistorů je možné vidět na Obr. 2.



Obrázek 3 - Principiální schéma 3f střídače

Každý pár tranzistorů je připojen k napájecímu napětí. Spínáním horního (T1) či dolního (T2) tranzistoru je zajištěno, že výstup půl můstku je připojen buďto k napájecímu napětí (DC bus) nebo k zemi (GND). Je nutné zajistit, aby nedošlo k sepnutí obou tranzistorů v jednu chvíli, a tím ke zkratu napájecího zdroje. Buzení tranzistorů zajišťuje většinou budicí obvod, který splňuje požadavky pro spínání těchto tranzistorů. Jedním z požadavků je dostatečný proud, který je nutný pro sepnutí tranzistoru (nabití kapacity přechodu G-S tranzistoru), dále zajištění plovoucího buzení horního tranzistoru. Některé obvody mají integrovanou logiku pro ochranu tranzistorů, např. ochrana proti zmíněnému sepnutí obou tranzistorů v jednu chvíli nebo časovou prodlevu při přepínání tranzistorů (deadtime).

Plovoucí buzení horního tranzistoru je nutné, protože není možné připojit source horního tranzistoru k zemi (došlo by k „vyřazení“ dolního tranzistoru a uzel půl můstku by byl připojen k zemi).

Střídač může být tedy integrován v jednom obvodu nebo může být tvořen samostatnými tranzistory a budícím obvodem. Podle vstupních signálů a možnosti sepnutí jednoho tranzistoru se rozlišují na obvody s nezávislým nebo s komplementárním spínáním. Při nezávislém spínání má každý tranzistor svůj řídicí signál, při komplementárním spínání je jeden signál společný pro jeden pár tranzistorů a tento signál určuje, zda bude sepnutý horní nebo dolní tranzistor.

1.4.2 Algoritmus Six-step commutation

Při použití tohoto algoritmu se napájí pouze dvě fáze motoru, třetí fáze je odpojena. Tento algoritmus vyžaduje znalost polohy natočení rotoru. Podle aktuální polohy a požadovaného směru se generují průběhy pro řízení tranzistorů. Na jednu otáčku motoru připadá 6 kroků natočení vektoru magnetického pole, vektor magnetického pole se tedy mění po 60° (platí pro dvou pólový motor). Při více pólový motor připadá na jeden krok menší úhel natočení vektoru magnetického pole. Z důvodu skokové změny natočení magnetického vektoru dochází ke zvlnění točivého momentu, pro některé aplikace to může být nevhodné. Z důvodu, že jsou v jednu chvíli sepnuty pouze 2 fáze, není možné dosáhnout maximálního momentu, kterého je motor schopný dosáhnout.

Pro snímání polohy natočení rotoru je možné použít tři Hallovy snímače, snímač polohy (enkodér) nebo některou z metod bez sensorového snímání polohy. Spínání jednotlivých tranzistorů podle polohy rotoru je uvedeno v komutační tabulce (tab. 1).

Tabulka 1 - komutační tabulka pro algoritmus Six-step commutation

Krok	Stav snímačů			Stav tranzistorů střídače					
	H1	H2	H3	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	1	0	1	1	0	0	1	0	0
2	0	0	1	1	0	0	0	0	1
3	0	1	1	0	0	1	0	0	1
4	0	1	0	0	1	1	0	0	0
5	1	1	0	0	1	0	0	1	0
6	1	0	0	0	0	0	1	1	0

1.4.3 Komutace s použitím Hallových snímačů

Ve statorové části jsou umístěny 3 Hallovy snímače. Tyto Hallovy snímače jsou ovlivňovány magnetickým polem, které tvoří permanentní magnety rotoru. Snímače musí být správně zarovnané. Podle signálu ze snímačů je možné zjistit polohu rotoru s přesností $\pm 30^\circ$. Každý Hallový snímač je aktivní v rozsahu natočení rotoru 180° . Podle signálů z Hallových snímačů se spínají tranzistory střídače pomocí komutační tabulky, která udává stavy sepnutí jednotlivých tranzistorů na základě polohy rotoru. V jednom okamžiku je tranzistor v jedné větvi otevřen a tranzistor ve druhé větvi řízen pomocí PWM.

Změnou střídý PWM signálu zajišťujeme změnu střední hodnoty signálu a tím i proud procházející vinutím (měníme točivý moment motoru). Při použití jiného snímače polohy, např. enkodéru, je algoritmus řízení totožný, musíme akorát z impulzů ze snímače vhodným způsobem přepočítávat polohu tak, aby bylo možné pomocí komutační tabulky spínat tranzistory střídače. Enkodér je relativní typ snímače, je nutné využít např. index pulzu pro převod hodnoty na absolutní.

1.4.4 Komutace BLDC motoru bez použití snímače polohy

Řízením BLDC motoru bez použití snímače se myslí to, že není použit žádný hardwarový snímač polohy rotoru, poloha se snímá pouze využitím samotného vinutí statorové části motoru. Nepoužívání hardwarového snímače přináší několik výhod, zařízení je levnější právě o samotné snímače a obvody, které zpracovávají signály z těchto snímačů, dále dochází ke zvýšení spolehlivosti, protože je zde méně částí, které by se mohli pokazit. Metod bez sensorového snímání polohy rotoru je několik, volba závisí na konkrétní aplikaci.

1.4.5 Metoda založená na měření indukčnosti

Tato metoda je založená na principu měření změny indukčnosti statorového vinutí v závislosti na poloze rotoru. Funguje v poměrně malém rozsahu otáček. Polohu lze takto měřit od stojícího rotoru až po přibližně 20 % nominálních otáček (závisí na konstrukčních vlastnostech motoru) Při otáčení rotoru dochází ke změně uspořádání magnetického obvodu, tedy dochází i ke změně indukčnosti. Velikost změny indukčnosti na poloze rotoru je závislá na mechanických (konstrukčních) vlastnostech daného motoru. Jeden z možných způsobů měření indukčnosti je měření průběhu přechodného děje proudu procházejícím statorovým vinutím, změna indukčnosti způsobí rozdílné časové konstanty.

1.4.6 Metoda založená na měření indukovaného napětí

Tato metoda využívá měření napětí na právě nepoužívané fázi. Rozsah, pro který se tato metoda využívá je přibližně od 10 % až po 100 % nominálních otáček, spodní hranice rozsahu závisí na velikosti amplitudy indukovaného napětí.

Jeden z možných způsobů je měření průchodu indukovaného napětí nulou (označováno jako BEMF zero crossing method). Měření průchodu indukovaného napětí nulou je možné více způsoby, v závislosti na elektrickém zapojení a spínacím algoritmu. Obecným požadavkem je, aby v okamžiku měření byla daná fáze odpojena a neprotékal přes ni proud. V případě vyvedeného středu motoru zapojeného do hvězdy je možné měřit přímo fázové napětí, avšak střed nebývá často vyveden, jsou zde jiné metody, jak získat toto indukované napětí.

První možnost je v případě, že je jedna ze zbývajících fází přivedena na napájecí napětí a druhá na GND. Pro indukované napětí ve třetí fázi poté platí vztah:

$$u_C = \frac{3}{2} \cdot u_{IC} + \frac{u_{dc}}{2} \quad (22)$$

Měřené napětí je dáno součtem 3/2 indukovaného napětí a 1/2 napětí na napájecí sběrnici. Jelikož chceme zjistit, kdy indukované napětí prochází nulou, platí tedy, že $u_C = 0$ V. Výsledné napětí změřené na fázi tedy musí být:

$$u_C = \frac{u_{dc}}{2} \quad (23)$$

Při použití této metody je tedy nutné porovnávat změřené indukované napětí s polovinou napětí na napájecí sběrnici DC bus.

Další možností je měření indukované napětí v případě, že jsou dvě fáze připojeny na GND a na třetí fázi měříme napětí. Při této možnosti je výsledné změřené napětí dáno vztahem:

$$u_C = \frac{3}{2} \cdot u_{IC} \quad (24)$$

Platí stejná podmínka jako v předchozím případě, tedy že $u_C = 0$ V. Je tedy nutné porovnávat napětí u_C , které měříme s nulovou referenční hodnotou.

Třetí možností je vytvoření umělého (virtuálního) středu motoru pomocí rezistorového děliče. Poté je možné měřit napětí na odpojené fázi stejně jako u metody měření napětí vůči fyzickému středu motoru, výsledné napětí je rovno napětí fázovému.

Přesnosti jednotlivých metod je dána velikostí indukovaného napětí, přesností samotného měření napětí a také u některých metod přesností rezistorového děliče pro vytvoření virtuálního středu. Výsledné zpracování je již jednoduché, vždy měříme průchod nulou na odpojené fázi, při detekci průchodu nulou přepneme dle komutační tabulky sepnutí tranzistorů střídače a měříme napětí na jiné, právě odpojené fázi [9] [10] [11].

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Přípravek

2.1.1 Inspirace

Tato část se bude zabývat samotným přípravkem 1DOF helikoptéry. Tyto přípravky se používají jako nástroj pro vývoj, testování a ověření řídicích algoritmů. Cílem je nejvíce se přiblížit chováním a vlastnostmi reálné soustavy. Výrobou a vývojem těchto přípravků se zabývají i některé firmy. Příkladem může být kanadská firma Quanser, která dodává vlastní přípravky z různých odvětví z oboru řízení systémů a robotiky. Jedním z přípravků je právě model helikoptéry, konkrétně se třemi stupni volnosti, jedná se tedy o 3DOF helikoptéru.



Obrázek 4 - Přípravek 3DOF helikoptéry od firmy Quanser [12]

Přípravek je možné vidět na Obr. 4. Hlavní částí je základna, která slouží jako podstavec pro celý model. Na této základně je umístěno rameno, které je uloženo v ložiskách, která umožňují pohyb, v tomto případě ve dvou osách. Třetí stupeň volnosti je v uchycení samotných pohonů vrtulí, které umožňuje měnit jejich náklon. Přípravek uvádějí do pohybu dva stejnosměrné motory s vrtulí. Snímání polohy v jednotlivých osách je pomocí enkodérů. Rotace v jednotlivých osách se většinou nazývají standardními názvy. Rotace kolem horizontální osy, která je kolmá na směr pohybu, se značí elevace (anglicky pitch) a rotace kolem vertikální osy azimut (anglicky yaw). Tyto názvy budou používány i dalších částech této práce.

Tento přípravek od firmy Quanser bude základní inspirací návrhu vlastního přípravku, i přesto, že cílem této práce je model helikoptéry pouze s jedním stupněm volnosti.

2.1.2 Návrh vlastního přípravku

V této části se budeme zabývat návrhem samotného přípravku 1DOF helikoptéry. Cílem je tento přípravek sestavit z běžně dostupných dílů. Pro výrobu některých dílů je využito 3D tisku, díky tomu je možné vytvořit vlastní díly přímo dle konkrétních požadavků. Pro všechny tištěné díly byl použitý materiál PETG, který má vyhovující vlastnosti a zároveň není náročný na tisk. Pro kompletní 3D návrh byl použitý program Autodesk Fusion 360.

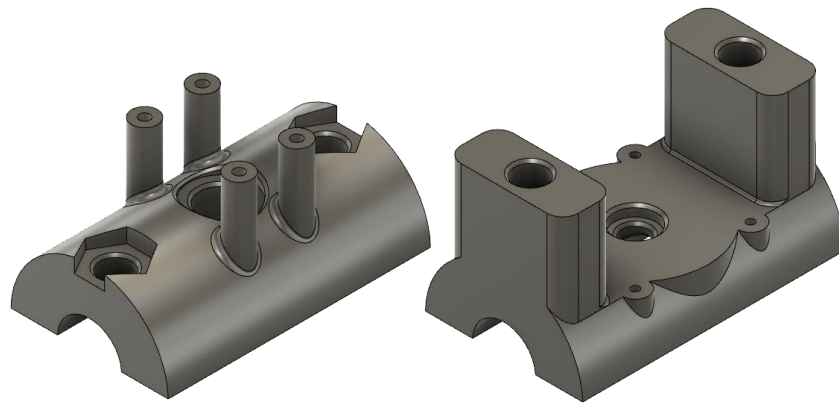
Pro výrobu základny byl zvolen konstrukční hliníkový profil o rozměrech 30 mm x 30 mm. Výhodou je jednoduché spojování díky drážce, do které je možné vložit matici a odpadá tedy nutnost vytváření děr pro spojovací materiál. Další výhodou je variabilita v případě dalších vylepšení nebo úprav. Rozměr základny byl zvolen tak, aby přípravek byl dostatečně stabilní i v případě budoucího přidání dalšího stupně volnosti. Základna je čtvercového tvaru o rozměrech 200 mm x 200 mm. Ve středu je umístěn profil pro uchycení vertikálních profilů, na kterých budou umístěny ložiskové domky. Jejich délka je 200 mm. Spojení jednotlivých částí je pomocí profilů ve tvaru L, resp. U, které byly vytištěny na 3D tiskárně. Byly zde použity dva tvary spojovacích prvků viz. Obr. 7. Jako spojovací materiál slouží šrouby M6 a matice, které jsou určeny pro vložení do T drážky hliníkového profilu.

Uchycení ramene je pomocí dvou ložisek od firmy ZVL o rozměru 608-ZZ. Jedná se o ložisko s vnějším rozměrem 22 mm x 7 mm a s vnitřním průměrem pro hřídel 8 mm. Ložiska jsou umístěna v plastových ložiskových domcích a uchycena pomocí šroubu M8 do vertikálních profilů. Do středu těchto profilů je nutné vyříznout závit. Na jeden z domků je přímo umístěn držák snímače polohy natočení ramene, který bude popsán v další části této práce. Ložiskový domek je vidět na Obr. 5.



Obrázek 5 - Ložiskový domek

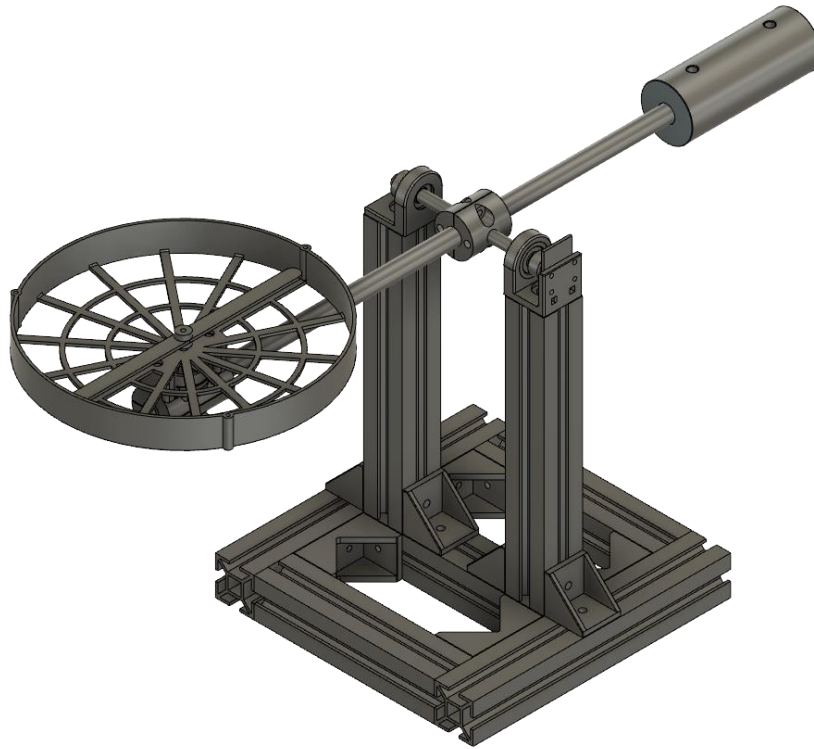
Samotné rameno je z hliníkové trubky o vnějším průměru 12 mm a šířkou stěny 1,5 mm. Tento materiál byl zvolen z důvodu nízké hmotnosti např. oproti oceli. Délka ramene je 500 mm. Středem ramene je protažena hřídel o průměru 8 mm, která je uložena v ložiskách. Uchycení hřídele je pomocí dvou dílů ve tvaru C. Pro zamezení axiálního pohybu osy je využito držáku magnetu, který je dodáván spolu s magnetickým enkodérem. Na druhou stranu hřídele je vymodelován díl, který se nalisuje na hřídel. Axiální vůli hřídele je možné v určitém rozsahu měnit posunem držáku magnetu. Rotace ramene vůči ose je zamezena pomocí dvou šroubů M5. Na jednom konci ramene je umístěn motor, který pohání celý přípravek. Držák motoru je složen ze dvou dílů viz. Obr. 6. Tyto díly jsou spojeny pomocí dvou šroubů M8, které prochází i samotným ramenem, tím je zajištěna fixace polohy. Zároveň tyto šrouby spojují s držákem i kryt vrtule. Na spodní části držáku je umístěn snímač polohy motoru, který je potřebný pro metodu řízení, která je použita v této práci. Snímač bude popsán v další části práce. Na druhé části je upevněn samotný motor, který má vyvedenou hřídel do obou stran. Jedna část hřídele prochází skrz rameno směrem ke snímači polohy. Vrtule je připevněna pomocí unašeče, který byl také vyroben pomocí 3D tisku. Vrtule byla zakoupená v obchodě se sortimentem pro modelářství. Jedná se o vrtuli o průměru 175 mm.



Obrázek 6 – Díl pro uchycení motoru

Na držáku motoru je přichycen kryt, který částečně zamezuje kolizi s okolními objekty a nechtěnému kontaktu obsluhy při manipulaci a zároveň směřuje tok vzduchu ve směru osy vrtule a zvyšuje tak její účinnost. Pro úplné zakrytí jsou zde připraveny otvory pro uchycení horního krytu, ten ale nebyl nakonec použit.

Na protější straně ramene je umístěno protizávaží, jeho poloha se dá měnit pro vyhovující vyvážení ramene. Jeho hmotnost byla odvozena experimentálně přidáváním známé hmotnosti na konec ramene. Potřebná hmotnost byla 170 g, hmotnost vyrobeného závaží je 178 g. Závaží tvoří tištěný díl, ve kterém jsou umístěny ocelové kulatiny, které zajistí potřebnou hmotnost. Výsledný přípravek je možné vidět na Obr. 7.



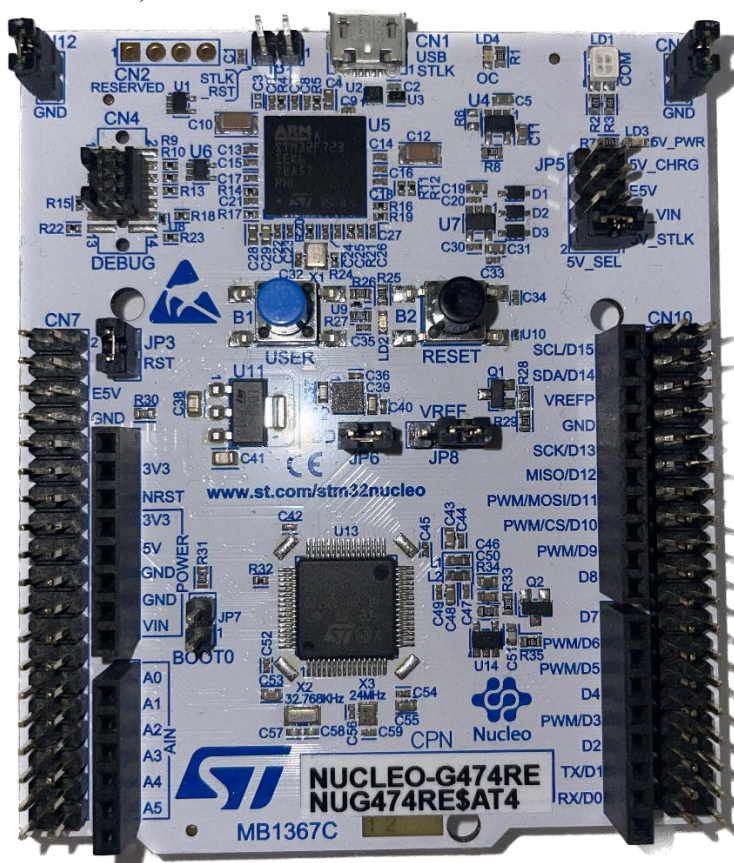
Obrázek 7 - 3D model přípravku 1DOF helikoptéry

2.2 Použitý hardware

Řízení motoru bude implementováno v programu Simulink. Pro řízení BLDC motoru a úhlu natočení ramene bude využita vývojová deska s mikroprocesorem od firmy STM ve formě kitu pro řízení motoru. Jednotlivé komponenty jsou popsány v další části této práce.

2.2.1 Vývojová deska STM Nucleo-G474RE

Vývojová deska je osazena mikroprocesorem Arm Cortex-M4 (STM32G474) s pracovní frekvencí až 170 MHz, disponující jednotkou FPU. Mikroprocesor lze programovat přímo přes rozhraní USB (ST-Link) bez použití externího programátoru. Deska je vybavena konektory v uspořádání ST-Morpho, je tedy možné připojovat rozšiřující moduly bez použití propojovacích vodičů. Program pro řízení motoru byl vytvořen pomocí programu Simulink a STM32CubeMx. Při běhu programu lze přenášet data z paměti do Simulinku pomocí rozhraní UART s využitím DMA (v programu Simulink pod názvem External Mode).



Obrázek 8 - STM Nucleo-G474RE

2.2.2 Výkonová deska X-Nucleo-IHM07M1

Tato deska slouží jako rozšíření základní vývojové desky s mikroprocesorem o 3fázový střídač pro řízení BLDC motorů. Deska je osazena obvodem STM L6230. Desku je možné přímo připojit k mikroprocesorové desce pomocí konektorů (ST Morpho). Kromě výkonového obvodu deska obsahuje součástky potřebné pro jeho funkci, tak i součástky zajišťující ostatní funkce, které jsou potřebné pro řízení BLDC motoru.

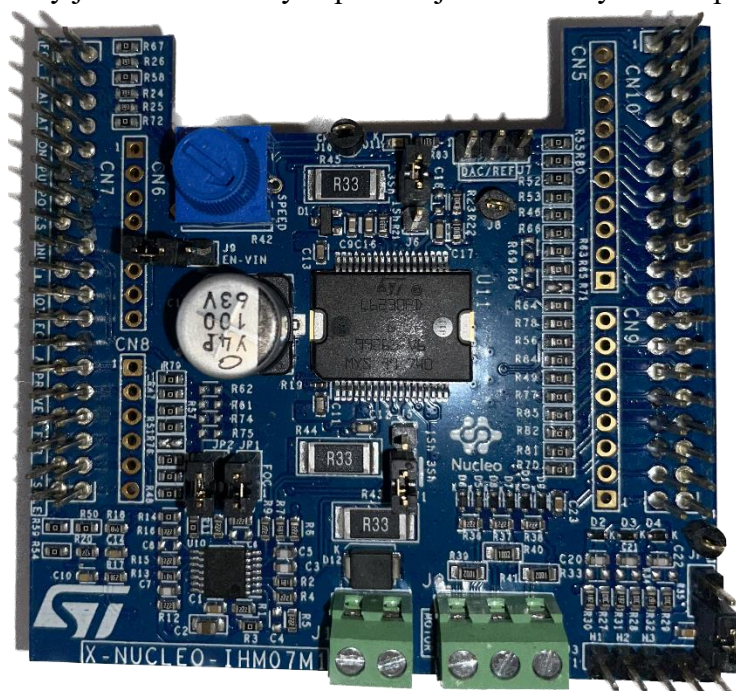
Měření proudu v jednotlivých fázích je provedeno pomocí měřících rezistorů (shunt). Úbytek napětí na těchto rezistorech je zesílen operačním zesilovačem v rozdílovém zapojení. Podle způsobu řízení se pomocí propojek volí, zda se bude měřit pouze jeden celkový proud, který teče přes DC bus, nebo nezávisle jednotlivé proudy ve fázích (vhodné pro vektorové řízení). Tento obvod také zajišťuje funkci proudové ochrany před přetížením výkonového obvodu. Jednotlivé výstupy operačních zesilovačů jsou přivedeny na ADC piny mikroprocesoru.

Dále jsou zde obvody pro připojení snímače polohy rotoru. Tyto obvody obsahují filtrační obvody proti rušení a ochranné obvody před přepětím pro ochranu mikroprocesoru. Tyto 3 vstupy lze využít pro připojení jednotlivých Halloových snímačů nebo enkodéru. Tyto signály jsou přivedeny na digitální vstupy mikroprocesoru.

Deska dále obsahuje teplotní snímač pro měření teploty, indukovaného napětí pro BEMF a potenciometr, který je také připojen na ADC mikroprocesoru.

Samotné tranzistory střídače jsou integrovány uvnitř výkonového obvodu včetně potřebných pro samotný chod střídače jako jsou ochranné obvody proti sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi, obvody zajišťující časovou prodlevu mezi přepínáním horního a spodního tranzistoru (deadtime). Zjednodušený blokový diagram je možné vidět na Obr. 11. Napětí pro spínání horních tranzistorů (plovoucí buzení) je získáno pomocí nábojové pumpy a externího kondenzátoru.

Jednotlivé větve střídače lze řídit nezávisle pomocí dvou signálů EN a IN. Jedná se o komplementární řízení, vstupem IN určujeme, zda je sepnutý spodní či horní tranzistor. Signálem EN povolujeme sepnutí tranzistorů v dané větvi, pokud je signál EN ve stavu log. 0, oba tranzistory jsou zavřené a výstup větve je ve stavu vysoké impedance.



Obrázek 9 – X-Nucleo-IHM07M

Základní parametry desky jsou:

- Rozsah vstupního napětí: 8–48 V
- Maximální výstupní proud: 2,8 A
- Maximální frekvence: 100 kHz

2.2.3 BLDC motor Bull-Running BR2804-1700kV

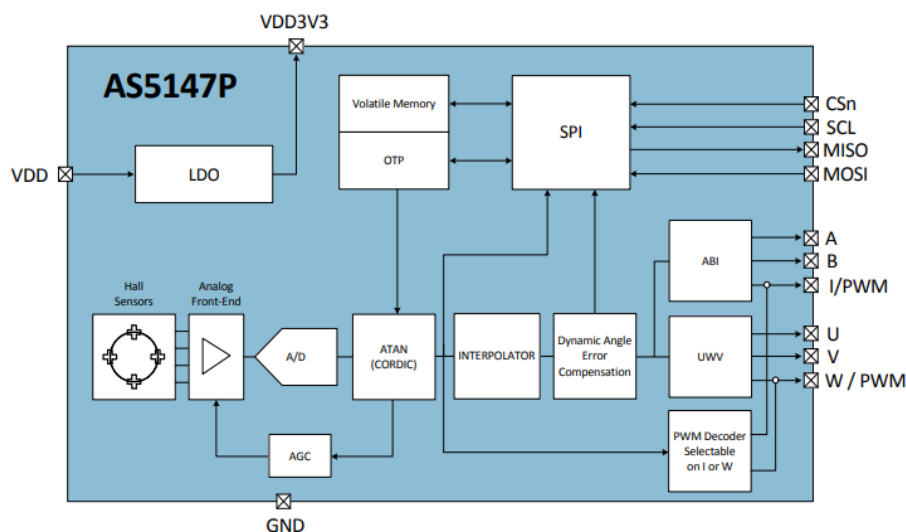
Jedná se o BLDC třífázový motor typu Outrunner bez Hallových snímačů. Pro snímání polohy rotoru je tedy nutné přidat externí snímač. Zde jsou uvedeny některé základní parametry motoru:

- Nominální napětí: 11,1 V
- Maximální proud: 5 A
- Počet pólových párů: 7
- Maximální otáčky: 19000 ot/min

2.2.4 Snímač polohy AMS AS5147P

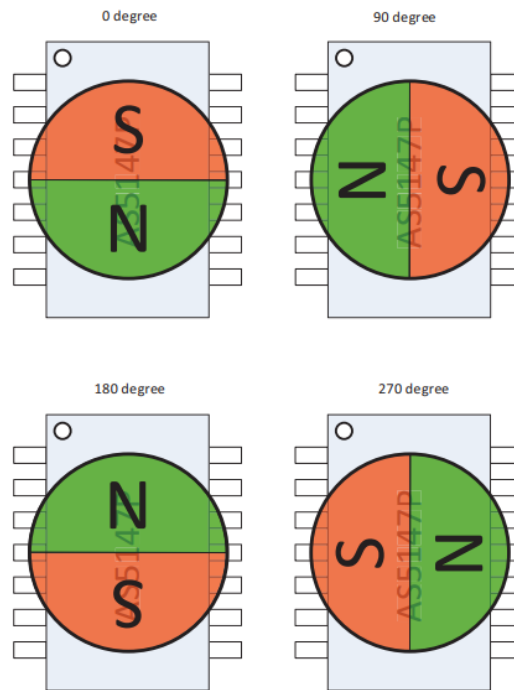
Jelikož nemá použitý motor integrované Hallovy snímače pro snímání polohy rotoru, je použit tento snímač. Jedná se o magnetický enkodér, na hřídeli motoru je umístěn permanentní magnet. Snímač je umístěn v ose tohoto magnetu (Obr. 11).

Uvnitř tohoto snímače je integrována skupina Hallových snímačů, pomocí kterých je možné určit úhel natočení magnetu. Výsledné signály z těchto snímačů jsou následně převedeny na konkrétní hodnotu úhlu. Předností použití tohoto snímače je to, že nevyžaduje mechanický zásah do motoru jako je tomu např. při integraci Hallových snímačů přímo to statorové části (v některých možnostech to ani není možné). Blokové schéma snímače je na Obr. 10.



Obrázek 10 - Blokové schéma snímače polohy AS5147P [13]

Tento konkrétní obvod disponuje několika výstupy, které lze využít pro připojení k mikroprocesoru. Jednou z možností je využití třech výstupů UVW, které jsou totožné, jako kdyby byly v motoru integrovány reálné Hallovy snímače. Dalším výstupem jsou signály ABI, které simulují rotační enkodér. Na výstupech A, B jsou fázově posunuté obdélníkové signály o 90°, na výstupu I je impuls, který značí dosažení referenční polohy. Snímač také disponuje PWM výstupem, na kterém je obdélníkový signál s proměnlivou střídou v závislosti na poloze magnetu. Polohu lze také vyčítat pomocí komunikace přes sběrnici SPI.



Obrázek 11 - Umístění permanentního magnetu vůči obvodu AS5147P [13]

Nastavení některých parametrů snímače jako např. počet pólů motoru, výběr požadovaného výstupu, nastavení nulové pozice apod. lze také přes sběrnici SPI.

V této práci je snímač použit s výstupy UVW (simulace Hallových snímačů).

2.3 Řízení BLDC motoru

2.3.1 Nastavení periférií

Jednou z podmínek pro vytvoření a spuštění Simulink projektu na hardwaru je vytvoření projektu v programu STM32CubeMX. Tento program slouží ke konfiguraci mikroprocesorů od firmy STM pomocí grafického rozhraní. Základní konfigurace, kterou Simulink vyžaduje je zaškrtnutí volby v záložce „Project Manager“:

- *Project – Do not generate the main()*
- *Advanced Settings – nastavit LL a vypnout Visibility (Static)*

Dále bylo potřeba nastavit konkrétní periférie na požadovanou funkčnost v záložce „Pinout & Configuration“. Zdrojem časové základny je časovač TIM2. Jednotlivé přiřazení pinů mikroprocesoru ke konkrétní hardwarové funkci je v tab. 2.

Tabulka 2 - přiřazení IO k hardwarovým funkcím

Pin	Značení	Popis
PB14	DIAG/EN	Globální povolení sepnutí tranzistorů střídače
PA8	IN1	Vstupy pro řízení tranzistorů
PA9	IN2	
PA10	IN3	
PC10	EN1	Povolení sepnutí tranzistorů v jednotlivých větvích
PC11	EN2	
PC12	EN3	
PA15	H1	Signály z Hallových snímačů
PB3	H2	
PB10	H3	
PA1	Vbus	Napětí na DC bus
PC1	CurrB	Celkový proud protékající motorem
PC6	EncA	Signál A z enkodéru měření polohy
PC7	EncB	Signál B z enkodéru měření polohy
PA0	Encl	Signál I z enkodéru měření polohy

Pro generování PWM signálu pro řízení tranzistorů je nutné správně nastavit časovač TIM1. Signál z čítače je pomocí komparátoru porovnáván s hodnotou v registru, pomocí kterého se nastavuje hodnota střidy. Výstupem čítače je pilový, resp. trojúhelníkový diskretní průběh. Konkrétní nastavení pro TIM1:

- *Prescaler (PSC) – 0*
- *Counter Mode – Center Aligned mode 3*
- *Counter Period (AutoReload Register) – 4096*
- *Repetition Counter (RCR) – 1*
- *Trigger Event Selection TRGO – Update Event*

Při tomto nastavení je výstupem časovače právě trojúhelníkový průběh a výstupní PWM signál má střed v bodě, kde dochází ke změně směru čítání (přechod z up do down). Toto je potřebné v případě, že bude měřen proud protékající motorem. Měření proudu bylo nakonec vynecháno, nebylo pro tuto aplikaci nutné, nastavení periférií už bylo takto ponecháno.

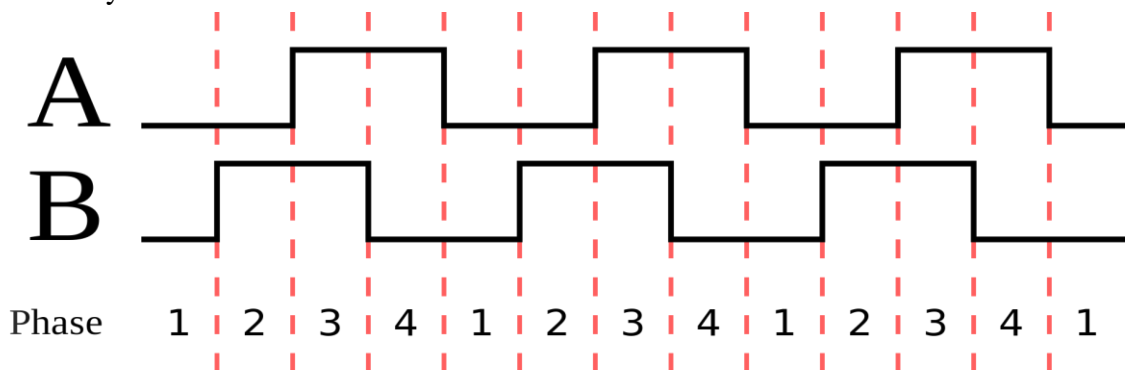
Nastavení hodnoty do registru „AutoReload Register“ určujeme maximální hodnotu po které dochází k vynulování či změně směru čítání čítače. Nastavení tohoto parametru ovlivňuje frekvenci PWM signálu. Dále je zde registr „RCR“, který určuje, jak často bude generován event. Nastavením na hodnotu jedna dosáhneme toho, že je event generován právě ve chvíli, kdy je dosaženo maximální hodnoty čítače (nutné pro měření proudu ve správný okamžik). Ostatní nastavení je ponecháno na výchozí hodnotě.

Nastavení ADC převodníku pro měření proudu bylo také nastaveno, i když měření proudu nebylo nakonec implementováno. Spouštění časovače je prováděno právě od časovače TIM1 pomocí „Trigger Out Event“. Položka „Number Of Conversions“ byla nastavena na hodnotu jedna, převod probíhá v tomto případě jenom pro jeden vstup.

Nastavení binárních vstupů a výstupů bylo provedeno pouze volbou „GPIO_Input“ nebo „GPIO_Output“.

2.3.2 Snímání polohy ramene

Pro snímání polohy ramene je nutné nastavit periférie mikroprocesoru do režimu enkodéru. Použitý snímač je AMS AS5147P, stejný typ jako u snímání polohy motoru. Využito je v tomto případě výstupu, který emuluje rotační enkodér na základě natočení magnetu vůči snímači. Výstupními signály jsou A, B, I, kde AB je kvadrurní signál pro zpracování změny polohy, a I je signál při dosažení referenční polohy. Průběhy jsou zobrazeny na Obr. 12.



Obrázek 12 - Průběh signálů na výstupu enkodéru [14]

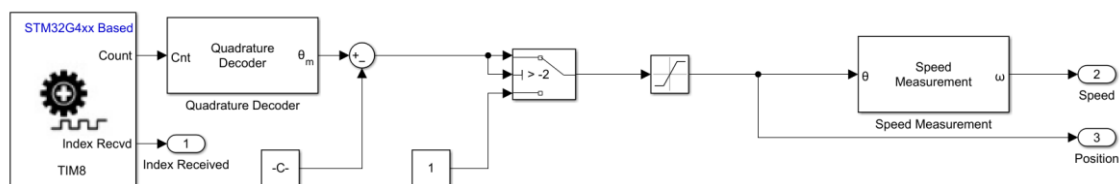
Zpracování probíhá pomocí časovače TIM8, který je nastaven právě v režimu enkodér. Signály je nutné přivést na specifikované vstupy mikroprocesoru viz. tab. 2.

Časovač je nutné nastavit na hodnoty:

- *Combined channels – Encoder Mode + Index*
- *Counter Period (AutoReload register) – 4096*
- *Encoder Mode – Encoder Mode TI1 and TI2*

Ostatní hodnoty jsou ponechány ve výchozím nastavení. Tímto je umožněno vyčítání polohy z enkodéru v programu Simulink pomocí bloku encoder.

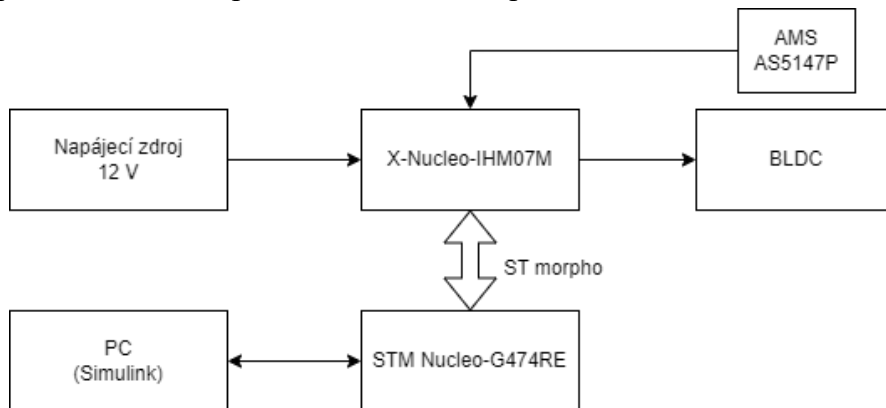
Implementace snímání polohy v Simulinku je na Obr. 13. Základem je právě zmíněný blok pro vyčítání hodnoty z mikroprocesoru. Následuje blok „Quadrature Decoder“, který převede hodnotu registru na hodnotu v požadovaných jednotkách, konkrétně rad. V tomto bloku je nutné nastavit rozlišení enkodéru a požadovanou jednotku na jeho výstupu. Následuje zpracování signálu jako je posun nulové polohy podle fyzického přípravku tak, aby odpovídala vodorovné poloze ramene a dále omezení výstupu pomocí saturace. Pro zjištění rychlosti je použitý blok „Speed Measurement“. Rychlost ramene je nutná pro řízení v klouzavém režimu.



Obrázek 13 - Simulink model pro vyčítání úhlu natočení

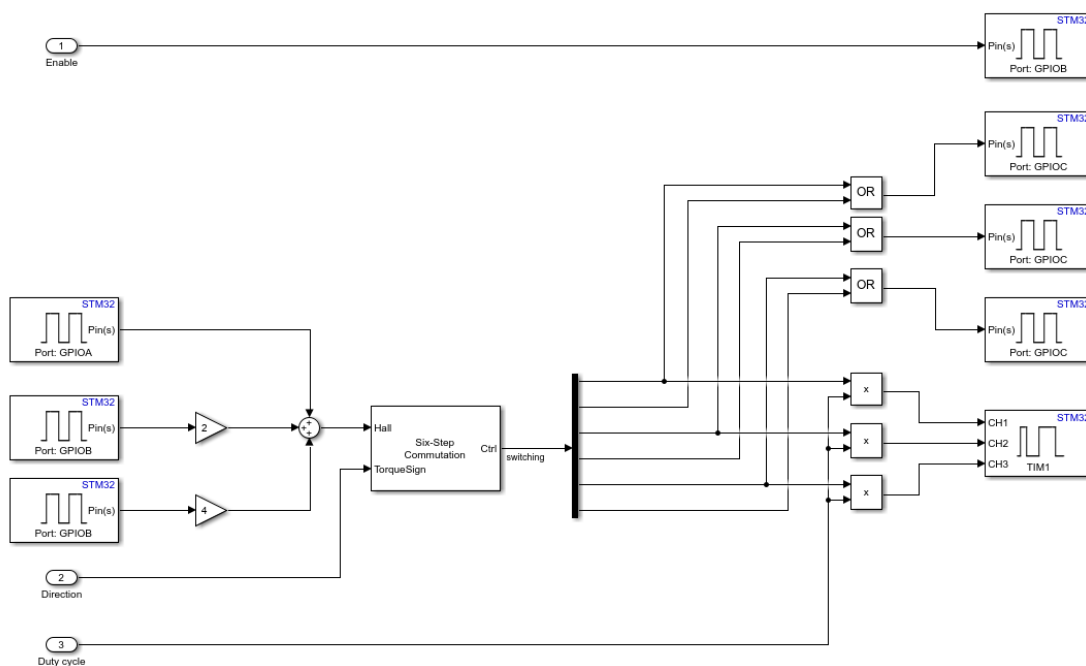
2.3.3 Implementace řídicího algoritmu

Algoritmus pro řízení BLDC motoru je implementován v programu Simulink s nainstalovaným rozšířením pro obsluhu hardwaru STM, konkrétně „Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics STM32 Processors“. Dále je využito rozšíření Motor Control Blockset. Spouštění smyčky je právě pomocí „Trigger Out Event“ od časovače TIM1. Pokud by bylo implementováno měření proudu, smyčka by byla spouštěna po dokončení AD převodu naměřeného proudu.



Obrázek 14 - Blokové schéma zapojení řízení BLDC motoru

Samotný program je možné vidět na Obr. 15. Na levé straně jsou 3 vstupy od jednotlivých signálů ze snímače polohy. Tyto signály jsou převedeny na jeden signál, který vyžaduje blok „Six-Step Commutation“ z knihovny Motor Control Blockset. Tento blok má tedy na prvním vstupu hodnotu z Hallových snímačů a na druhém konstantu o hodnotě -1 nebo 1 pro určení směru otáčení. Výstupem je 6 signálů, které již odpovídají sepnutí jednotlivých tranzistorů střídače. Jelikož použitý obvod STM L6230 pracuje v komplementárním režimu, je nutné signály vhodně upravit. Bloky s funkcí OR v horní části vytvářejí signál EN, kterým se povoluje sepnutí tranzistorů střídače. Tyto signály jsou přivedeny na příslušné výstupy mikroprocesoru. Na blok TIM1 jsou přivedeny jednotlivé střídy pro jednotlivé fáze motoru, střída je dána vstupem. Tranzistory střídače jsou spínány následovně – pokud má být sepnutý dolní tranzistor, je hodnota střídy nastavena na 0 %, hodnota signálu EN je ve stavu log. 1, spodní tranzistor je sepnutý po celou dobu periody časovače TIM1, pokud má být sepnutý horní tranzistor, je kromě signálu EN v log. 1 nastavena ještě střída na konkrétní hodnotu. Pro zapnutí výkonového stupně je ještě nutné přivést log. 1 na globální EN.



Obrázek 15 - Implementace řízení v programu Simulink

2.4 Identifikace a simulace 1DOF helikoptéry

2.4.1 Závislost točivého momentu od motoru na střídě

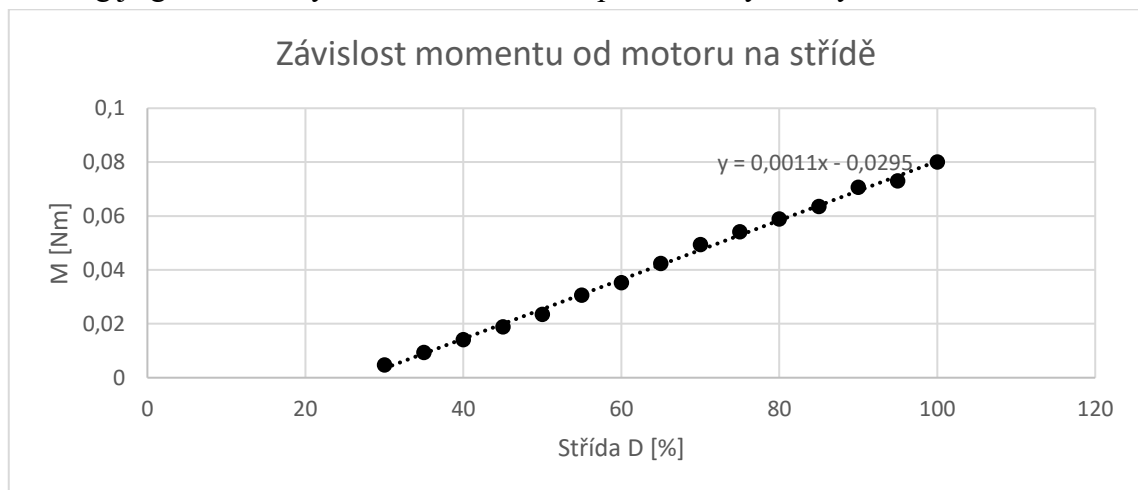
V teoretické části byla uvedena funkce, která vyjadřuje závislost momentu působícího na rameno na vstupním napětí motoru. Motor vytváří moment, který způsobí rotační pohyb vrtule, která následně vytváří sílu. Tato síla působí kolmo k ramenu a podle vzdálenosti motoru od osy uchycení působí na rameno určitým momentem. Hledaná funkce v sobě tedy zahrnuje závislost mezi úhlovou rychlostí vrtule a vzniklou silou, kterou vytváří, a zároveň také vzdálenost uchycení motoru od osy rotace.

Měřením bylo zjištěno, že mezi momentem působícím na rameno a střídou, která je vstupní hodnotou řídicího algoritmu motoru (více v kapitole o řízení BLDC motoru) existuje lineární závislost.

Měření bylo prováděno následujícím způsobem: protizávaží bylo umístěno tak, aby se rameno vychylovalo na jeho stranu, následně bylo k ramenu v ose motoru připevněno přídavné závaží o znatelně vyšší hmotnosti, než je hmotnost protizávaží. Toto závaží bylo celou dobu umístěno na váze. Referenční hodnotou byla hmotnost změřená při nulové střídě. Síla, kterou vytváří vrtule působí proti síle působící od přidaného závaží, a to se projeví snížením síly působící na váhu. Výsledný moment při konkrétní střídě je dán tímto vzorcem:

$$M_m = (m_{ref} - m_D) \cdot g \cdot l \quad (25)$$

kde m_{ref} je referenční hmotnost při nulové střídě, m_D změřená hmotnost při konkrétní střídě, g je gravitační zrychlení a l vzdálenost působící síly od osy otáčení.



Obrázek 16 - Závislost momentu od motoru na jeho střídě

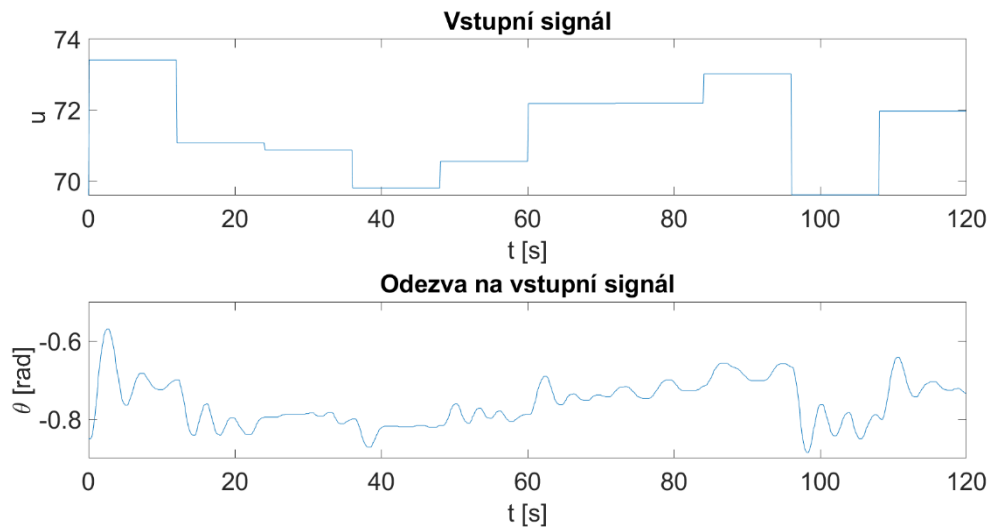
Takto bylo postupným zadáváním hodnot střídy 0–100 % s krokem 5 % změřena závislost momentu v celém rozsahu (tabulka v příloze D). Jelikož byla střída v rozsahu 0-25 % nedostatečná pro pohyb motoru, nejsou tyto hodnoty použity pro další výpočty. Závislost momentu na střídě je možné vidět na Obr. 16. Proložení spojnicí trendu dostaneme funkční předpis pro výpočet momentu v závislosti na střídě D:

$$f_{Mm}(D) = \begin{cases} 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot D - 0,03, & D \geq 30 \\ 0, & D < 30 \end{cases} \quad (26)$$

Lineární závislost je nejspíše způsobena tím, že vrtule je vyrobena tak, aby byl točivý moment, který vytváří přímo úměrný otáčkám. Pokud je tedy lineární závislost mezi otáčkami a točivým momentem a zároveň mezi napětím na motoru a jeho otáčkami, tak vznikne takováto závislost. Důležitou poznámkou je, že motor musí mít dostatek síly pro otáčení vrtule, aby byly jeho otáčky konstantní. Dále je nutné zmínit, že se jedná o charakteristiku, který odpovídá ustálenému stavu. V reálném případě zde dochází k nepřesnosti vlivem konečné doby trvání přechodného děje (jedná se o systém vyššího řádu než nula). Tato skutečnost byla v modelu zanedbána.

2.4.2 Identifikace parametrů

Identifikace soustavy byla provedena pomocí programu Matlab s využitím rozšíření System Identification Toolbox a Optimization Toolbox, konkrétně pomocí nástroje Grey-Box Model Estimation. Pro identifikaci je nutné implementovat model v prostředí Matlab a změřit data na reálné soustavě. Jelikož je cílem získat z fyzické soustavy co nejvíce informací, byl na její vstup přiveden pseudonáhodně vygenerovaný signál, tím je možno získat chování soustavy v různých stavech. Tento vstupní signál byl vytvořen pomocí programu Matlab v rozsahu hodnot -10 až 10, následně k němu byla přičtena konstanta (offset) tak, aby se rameno pohybovalo v určitém rozsahu. Ke změně hodnoty signálu docházelo po 12 s. Rozsahy úhlů větší než nula nebylo možné měřit, docházelo z důvodu nelinearity k „přetočení“ ramene až na mechanický doraz. Vstupní signál a odezvu na něj, tedy okamžitou polohu ramene je možné vidět na Obr. 17. Tyto signály byly následně využity pro identifikaci systému.



Obrázek 17 - Změřená data pro identifikaci

Vytvoření modelu soustavy v programu Matlab je možné více způsoby, jedna z možností je implementace pomocí funkce. Hlavička této funkce má přesně předepsaný tvar, který je nutno dodržet viz. následující úsek kódu. Návrátovou hodnotou je vždy vektor derivací stavů x a vektor výstupních hodnot. Vstupním parametrem je čas t , vektor hodnot stavů x , vektor hodnot vstupů a následuje libovolný počet parametrů. Poslední musí být uvedeno klíčové slovo `varargin`.

```
function[dx,y] = oneDofHeliModel(t,x,u,k_m,C,B,J,offset,varargin)
%oneDofHeliModel Model přípravku 1DOF helikoptéry
% Standartní tvar modelu pro použití s nástrojem nlgreyest

g = 9.81; % Definice konstanty g

y = [x(1)]; % Definice výstupního vektor

Mmot = k_m*u(1)-offset; % Výpočet momentu motoru a saturace
if Mmot < 0
    Mmot = 0;
end
if Mmot > 100
    Mmot = 100;
end

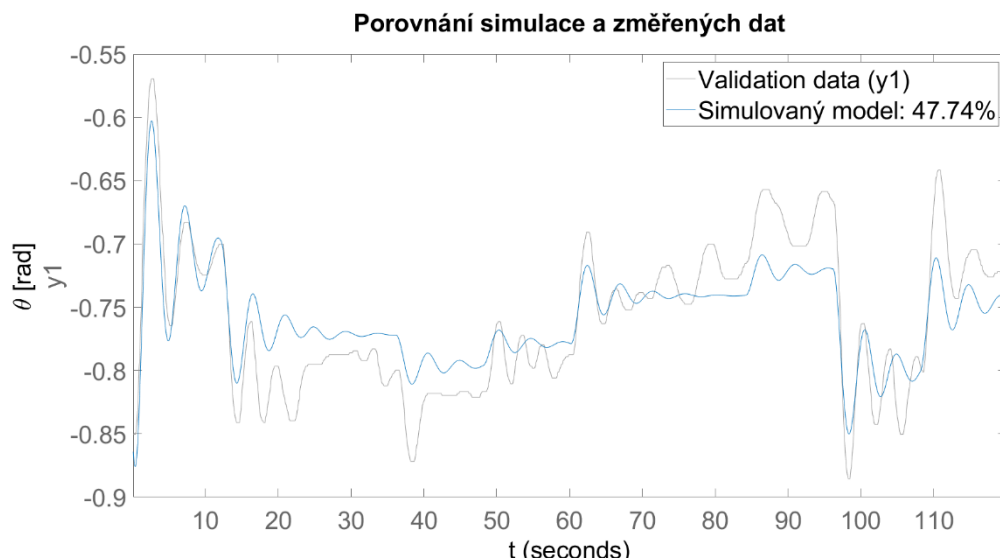
% Výpočet vektoru derivací stavů
dx = [x(2); ((Mmot-C*g*cos(x(1))-B*x(2))/(J))];
end
```

Zavoláním funkce tedy dostaneme vypočtené hodnoty výstupů y a derivace stavů x na základě vstupních hodnot u , aktuálních hodnot stavů x a parametrů. Model je ve tvaru stavových rovnic jako v předchozí části této práce. Identifikace byla provedena pro všechny parametry kromě funkce pro výpočet momentu motoru z hodnoty střídavy, tedy k_m a offset. Délka l a hmotnost m jsou v jednom parametru C . Z modelu se pomocí funkce `idnlgrey` vytvoří model ve formě „Šedá skříňka“ (`gbmodel`):

```
% Počet výstupů, vstupů, stavů (řád systému)
Order = [1 1 2];
% Inicializace parametrů, rozměr vektoru = počet proměnných
Parameters = [0.0011;0.485*L;0.05;0.05;0.03];
% Inicializace stavů
InitialStates = [-0.9;0];

gbmodel = idnlgrey('oneDofHeliModel',Order,Parameters,InitialStates,0);
```

Prvním argumentem je název funkce, která představuje matematický model systému, následují proměnné (vektory), které odpovídají právě definici této funkce. Parametr `Order` zahrnuje počet vstupů a výstupů soustavy a její řád, dále proměnné `Parameters`, která obsahuje výchozí hodnoty jednotlivých hledaných parametrů. V proměnné `InitialStates` je nastavena výchozí hodnota stavů. Posledním parametrem je vzorkovací frekvence v případě použití diskrétního modelu, pokud je zde nulová hodnota, model je brán jako spojitý.



Obrázek 18 - Porovnání simulace a fyzické soustavy

Identifikace se provede pomocí funkce `nlgreyest`, kde prvním vstupním argumentem jsou data změřené na fyzické soustavě a druhým argumentem identifikovaný model. Následuje volitelný argument pro nastavení identifikace. Zvolený algoritmus byl `lsqnonlin`, který dával ve výsledku největší shodu měřeného a simulovaného průběhu. Porovnání těchto průběhů je na Obr. 18, dosaženým výsledkem je shoda přibližně 48 %. Vyšší hodnoty bylo dosaženo při měření odezvy na fyzické soustavě při menším rozptylu vstupního signálu, tedy menších výchylkách ramene, ale pak se lišily parametry podle volby pracovního bodu (konstanty přičtené k pseudonáhodnému signálu).

Celý skript pro identifikaci včetně naměřených hodnot je dostupný v příloze, kde se nachází konkrétnější nastavení průběhu identifikace. Identifikované parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

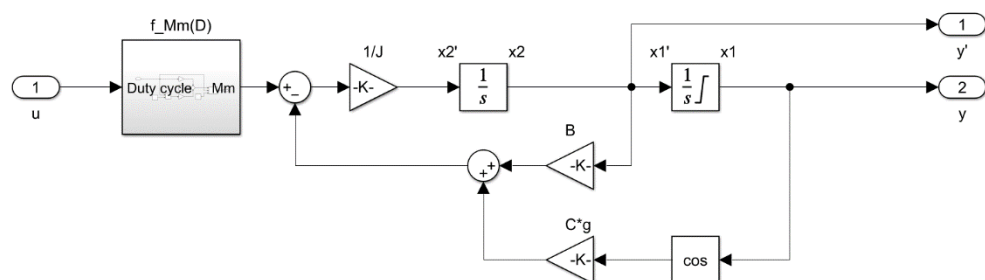
Tabulka 3 - identifikované parametry

k_m	0,0011 Nm/V
C	0,0073 kgm
B	0,0099 Nms/rad
J	0,0240 kgm ²
offset	0,0300 Nm

2.4.3 Simulace soustavy

Simulace byla provedena pomocí programu Simulink. Program Simulink je grafické prostředí programu MATLAB, které je určeno pro modelování, simulování a analýzu dynamických systémů.

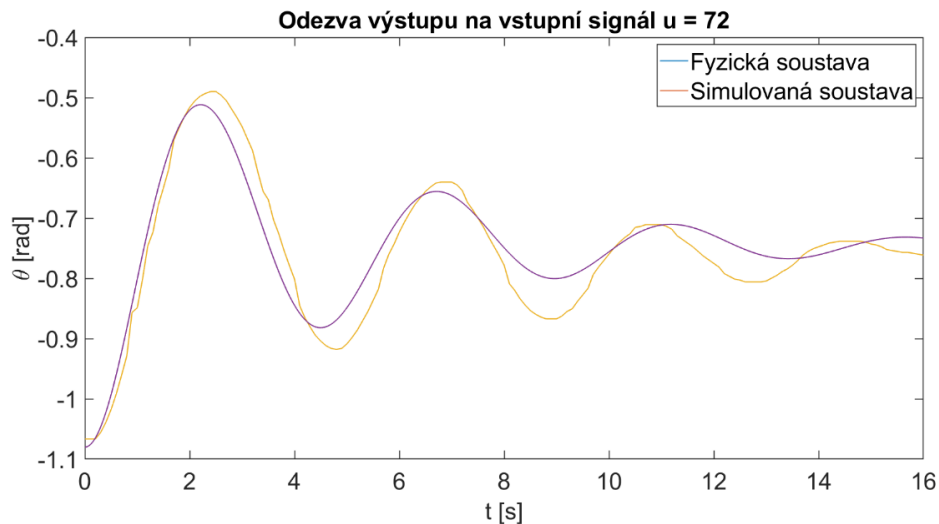
Model 1DOF helikoptéry je vytvořen z pohybové rovnice (výraz č. 6) a je na Obr. 19.



Obrázek 19 - Model 1DOF helikoptéry vytvořený v programu Simulink

Model se skládá ze 2 integrátorů (1. a 2. derivace úhlu v pohybové rovnici), vstupní hodnotou je střída, která je pomocí funkce přepočítána na točivý moment působící na rameno. Výstupními hodnotami jsou poloha a úhlová rychlost. Konstanty použité v modelu odpovídají značením konstantám v pohybové rovnici a jsou nastaveny na hodnoty, které byly zjištěny při identifikaci viz. tab. 3.

Pomocí odezvy na jednotkový skok bylo provedeno porovnání fyzické a simulované soustavy viz Obr. 20. Vstupní hodnota byla nastavena na 72.



Obrázek 20 - Porovnání odezvy na jednotkový skok o hodnotě 72

2.5 Návrh regulátorů řízení polohy

2.5.1 Regulace pomocí PID regulátoru

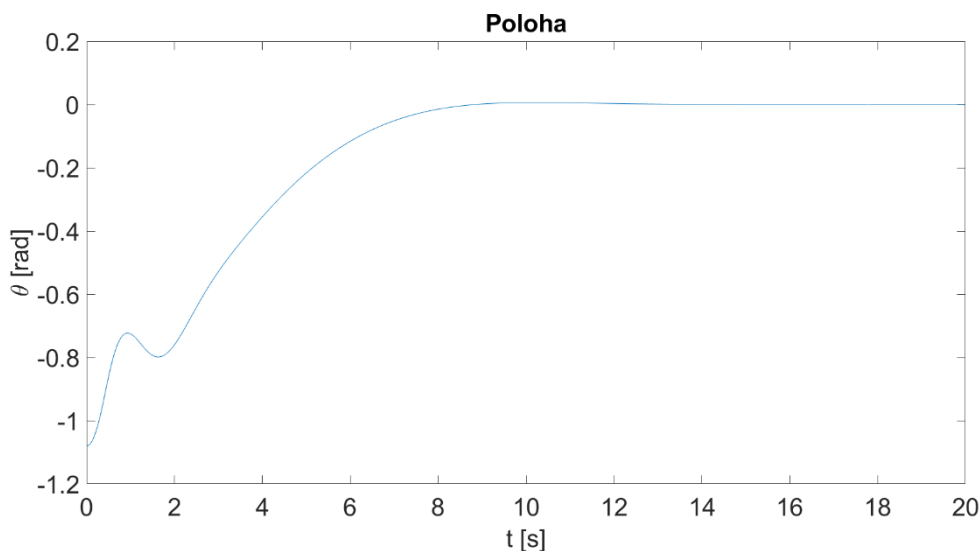
Tvar PID regulátoru, který je použitý pro regulaci úhlu je uveden v teoretickém úvodu (vzorec č. 18, resp. 19 při použití na hardwaru STM). Jedna z návrhových metod, která zde byla použita byla metoda pokus-omyl (experimentální nastavení), dále byly vyzkoušeny návrhové metody pomocí nástroje sisotool v programu Matlab na linearizované soustavě v bodě $x_1 = 0$, avšak výsledek nebyl úspěšný, protože linearizace nebyla provedena v okolí rovnovážného bodu. Lineární náhrada tedy nepopisovala tento systém správně. Dále byl proveden návrh pomocí funkce PID tune v bloku PID regulátoru v programu Simulink. Další možností by bylo provést identifikaci typu „Černá skříňka“ a vytvoření tak lineárního modelu. Během měření chování v okolí pracovního bodu docházelo vlivem nelinearity systému k přetočení ramene do saturace. Vzorkovací frekvence obou regulátorů byla dána frekvencí časovače TIM1, kterým je smyčka s regulátorem volána (přerušení od časovače).

2.5.2 Experimentální nastavení PID regulátoru

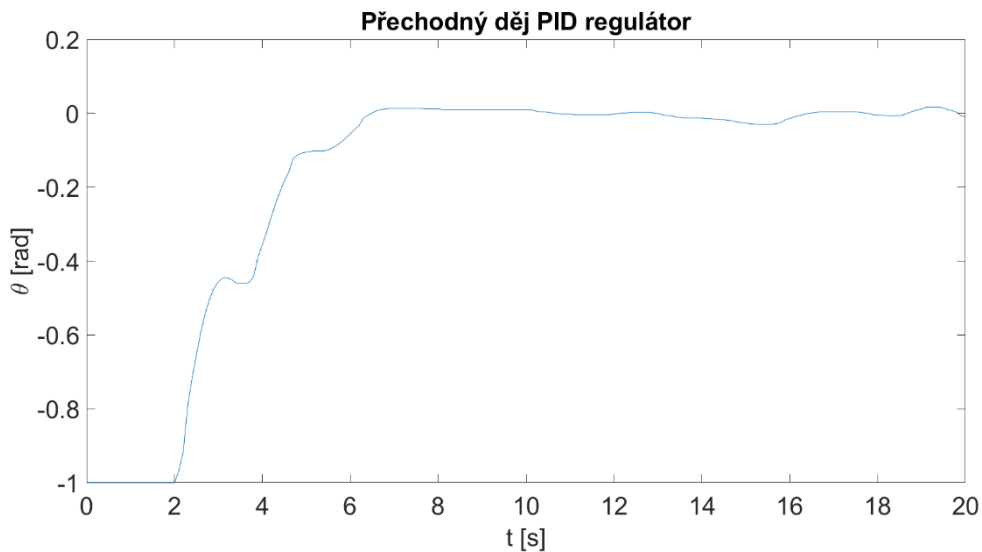
Nastavení regulátoru metodou pokus-omyl bylo provedeno následujícím způsobem. Nejdříve byly nastaveny složky I a D na nulovou hodnotu. Bylo zvětšováno zesílení tak, aby nedocházelo ke kmitání a zároveň byla regulační odchylka co nejmenší. Dále bylo zvětšováno zesílení integrační složky tak, aby docházelo v relativně rychle k odstranění regulační odchylky. Vlivem integrační složky docházelo k překmitu či dokonce k rozkmitání soustavy. Přidáváním hodnoty zesílení derivační složky byl zmenšován překmit do doby, kdy se zdál být regulační pochod optimální. Pokud byla nastavena příliš velká hodnota zesílení derivační složky, způsobila zpomalení přechodného děje což vedlo ve výsledku ke kmitání. Parametry určené touto metodou jsou v tab. 3. Výsledky simulace a regulace na reálné soustavě jsou na Obr. 21, resp. 22.

Tabulka 3 - parametry PID regulátoru

K_P	60
K_I	30
K_D	50
N	5



Obrázek 21 - Simulace odezvy PID regulátoru



Obrázek 22 - Odezva PID regulátoru na fyzické soustavě

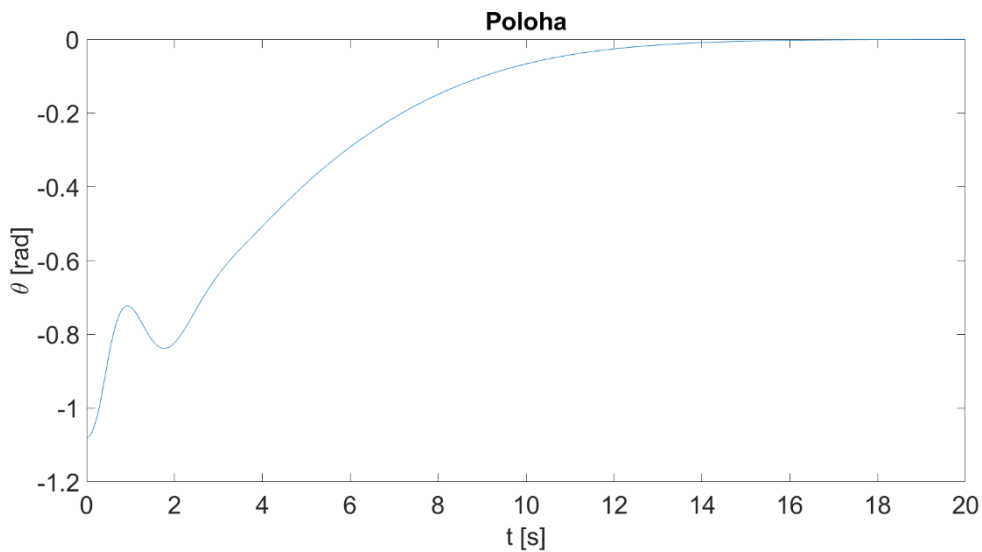
2.5.3 Nastavení PID regulátoru pomocí programu Matlab

V tomto případě byl použit nástroj v programu Simulink, konkrétně „PID tune“ v bloku PID regulátoru. Nastavování parametrů se provádí pomocí grafického rozhraní. Jsou zde dva parametry, kterými lze ovlivnit výsledný přenos regulátoru. Prvním je nastavení rychlosti odezvy regulační smyčky. Druhým je volba, zda má být regulátor spíše robustní, za cenu delší doby regulačního pochodu nebo spíše rychlejší s horší odolností proti změně parametrů soustavy, případně s překmitem.

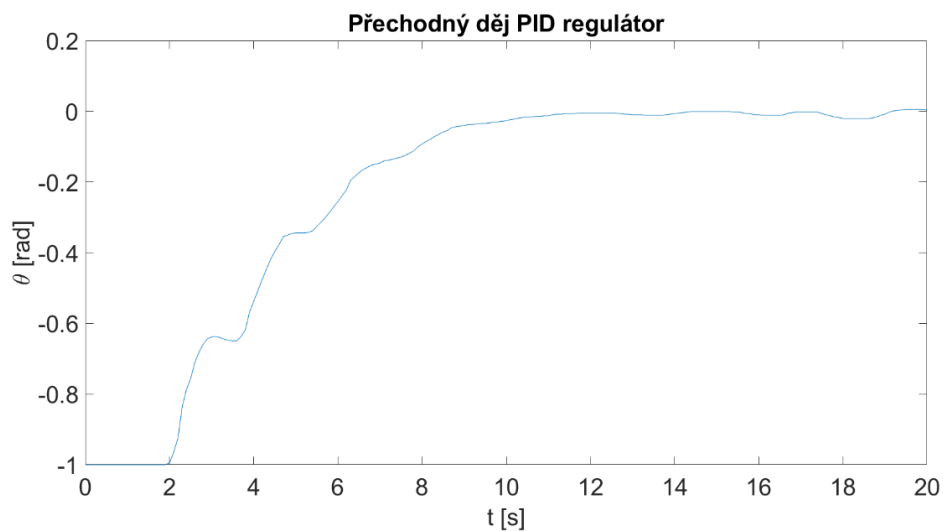
Tabulka 4 - parametry PID regulátoru

K_P	62
K_I	21
K_D	45
N	5

Jelikož tento nástroj počítá s lineárním modelem, bylo nutné nastavit přechodný děj pomalejší a zvolit spíše robustní návrh. Při návrhu na rychlý přechodný děj docházelo k rozkmitání soustavy nejspíše vlivem velkého akčního zásahu a také tím, že návrh regulátoru počítá i s možností záporného akčního zásahu, který v tomto případě není možný. Výsledek simulace i verifikace na reálné soustavě je na Obr. 23, resp. 24.



Obrázek 23 - Simulace odezvy PID regulátoru



Obrázek 24 - Odezva regulátoru na fyzické soustavě

2.5.4 Návrh řízení v klouzavém režimu

Návrh řízení v klouzavém režimu vychází ze stavového popisu. Stavový popis systému musí být ve standardním tvaru.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (27)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k_m \cdot u - \text{offset} - m \cdot g \cdot l \cdot \cos(x_1) - B \cdot x_2}{J} \quad (28)$$

$$y = x_1 \quad (29)$$

Převedením do standartního tvaru získáme tento tvar stavového popisu:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (30)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k_m}{J} \left(u + \frac{-offset - C \cdot g \cdot \cos(x_1) - B \cdot x_2}{k_m} \right) \quad (31)$$

$$y = x_1 \quad (32)$$

Budeme uvažovat, že neznáme přesně některé parametry, konkrétně parametry C a B. Odchylku parametru C od skutečné hodnoty označíme jako δ_C a odchylku od parametru B jako δ_B . Nyní je potřeba určit maximální hodnotu těchto neznámých parametrů, byla zvolena maximální odchylka o 50 % od identifikovaných parametrů.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (33)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k_m}{J} \left(u + \frac{-offset - (C + \delta_C) \cdot g \cdot \cos(x_1) - (B + \delta_B) \cdot x_2}{k_m} \right) \quad (34)$$

$$y = x_1 \quad (35)$$

$$\delta_C \in < 0; 0,5C > \quad (36)$$

$$\delta_B \in < 0; 0,5B > \quad (37)$$

Stav x_2 je možné ovlivňovat přímo pomocí vstupu u , zaměříme se tedy na stav x_1 , kde budeme hledat řízení přes stav x_2 . Výsledné řízení musí být stabilizující, je tedy vhodné hledat řízení pomocí Ljapunovovy metody ověření stability. Byla zvolena Ljapunovova funkce ve tvaru (musí být pozitivně definitní):

$$V(x_1) = \frac{1}{2} x_1^2 \quad (38)$$

Nyní je možné určit funkci $W(x_1)$ následujícím způsobem:

$$W(x_1) = \dot{V}(x_1) \cdot x_1 = x_1 \cdot \dot{x}_1 = x_1 \cdot x_2 \quad (39)$$

Pro splnění podmínky stability musí tato funkce být negativně definitní. To je zaručeno splněním podmínky:

$$x_2 = -\lambda \cdot x_1 \quad (40)$$

Dosazením do $W(x_1)$ určíme možný interval koeficientu lambda:

$$W(x_1) = x_1 \cdot (-\lambda \cdot x_1) = -\lambda \cdot x_1^2 \quad (41)$$

$$\lambda > 0 \quad (42)$$

Tento výraz bude negativně definitní, pokud bude lambda větší než nula. Z tohoto vztahu určíme přepínací rozhraní, následně vypočteme derivaci a dosadíme:

$$z = x_2 + \lambda \cdot x_1 = 0 \quad (43)$$

$$\dot{z} = \dot{x}_2 + \lambda \cdot \dot{x}_1 = \frac{k_m}{J} \left(u + \frac{-offset - (C + \delta_C) \cdot g \cdot \cos(x_1) - (B + \delta_B) \cdot x_2}{k_m} \right) + \lambda \cdot x_2 \quad (44)$$

Nyní se zvolí řízení u ve tvaru součtu ekvivalentního řízení, které se volí tak, aby došlo k eliminaci známých členů:

$$u = e_{eq} + \frac{J}{k_m} v \quad (45)$$

$$e_{eq} = \frac{1}{k_m} (offset + C \cdot g \cdot \cos(x_1) + B \cdot x_2) - \lambda \cdot x_2 \frac{J}{k_m} \quad (46)$$

Dosazením rovnice č. 45 do rovnice č. 44 dostaneme tento výraz:

$$\dot{z} = v - \frac{\delta_C}{J} g \cdot \cos(x_1) - \frac{\delta_B}{J} x_2 = v + \Delta \quad (47)$$

Určíme horní mez neznámé delta dosazením horních mezí neznámých parametrů:

$$\Delta \leq \rho + k|v| \text{ kde } k \in \langle 0; 1 \rangle \quad (48)$$

$$\Delta \leq \left| \frac{\delta_C}{J} g \right| |\cos(x_1)| + \left| \frac{\delta_B}{J} \right| |x_2| = \frac{0.5C}{J} g \cdot \cos(x_1) + \frac{0.5B}{J} \cdot |x_2| = \rho \quad (49)$$

$$k = 0 \quad (50)$$

Výsledné řízení v určíme z tohoto vztahu:

$$\beta = \rho + b \text{ kde } b > 0 \quad (51)$$

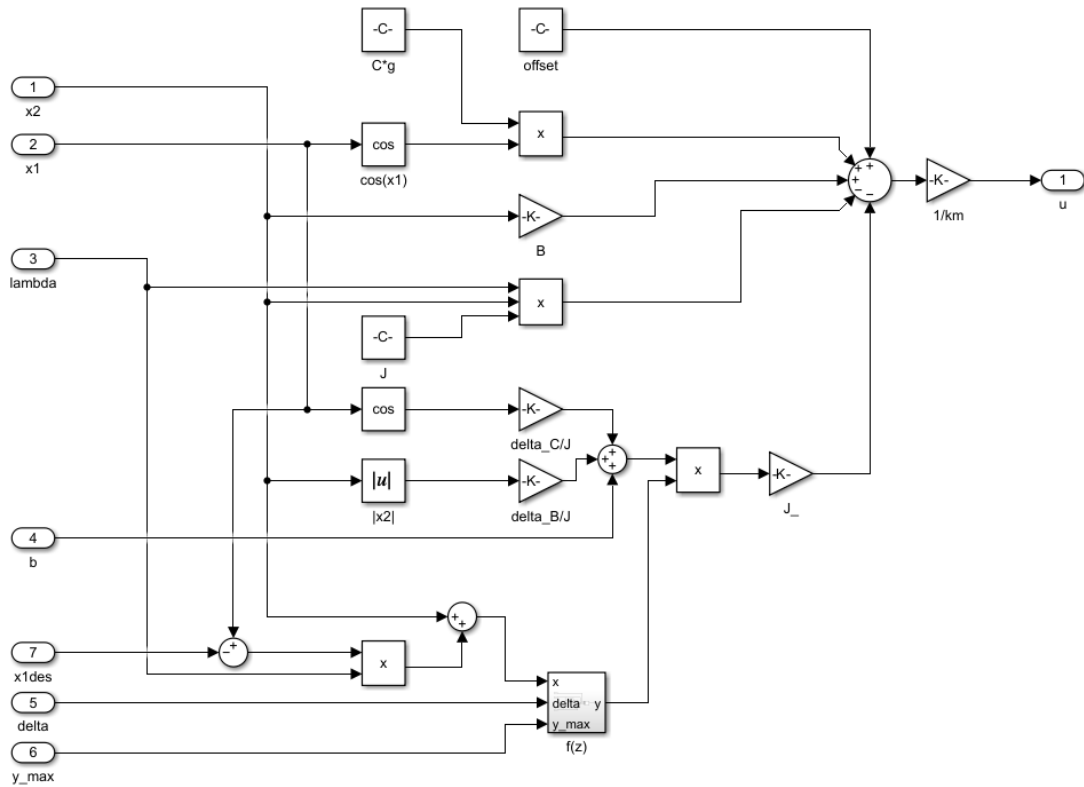
$$v = -\frac{\beta}{1-k} f(z) = -\left(\frac{0.5C}{J} g \cdot \cos(x_1) + \frac{0.5B}{J} \cdot |x_2| + b \right) f(x_2 + \lambda \cdot x_1) \quad (52)$$

Na vstup soustavy přivedeme hodnotu u s dosazením konkrétních hodnot, které byly identifikovány viz. tab. 3 [2] [6]:

$$u = \frac{1}{k_m} \left(offset + C \cdot g \cdot \cos(x_1) + B \cdot x_2 - \lambda \cdot x_2 \cdot J - J \left(\frac{0.5C}{J} g \cdot \cos(x_1) + \frac{0.5B}{J} \cdot |x_2| + b \right) f(x_2 + \lambda \cdot x_1) \right) \quad (53)$$

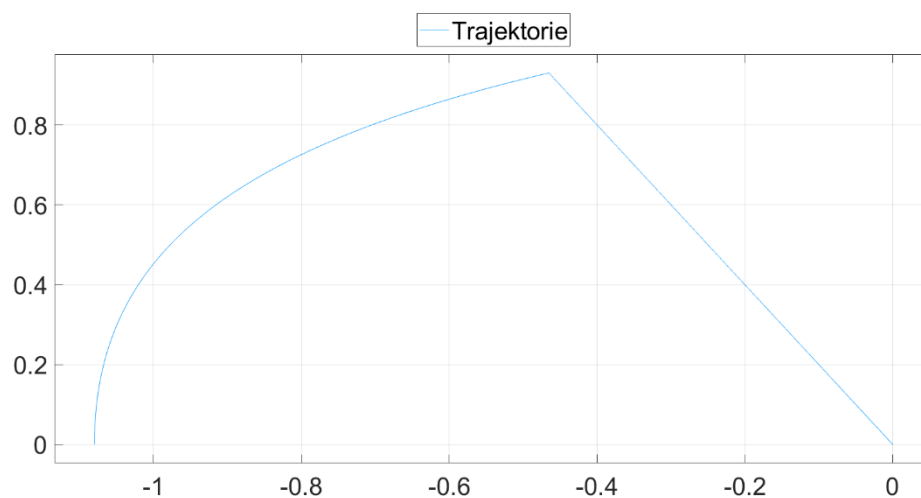
2.5.5 Implementace řízení v klouzavém režimu

Hodnoty parametrů b a λ byly voleny experimentálně za provozu. Funkcí $f(z)$ bývá většinou funkce signum. Přepínání tedy probíhá teoreticky za nekonečně krátkou dobu. Průběh regulace na nulovou pozici je možné vidět na následujících grafech, jedná se o simulaci v programu Simulink. Implementace regulátoru je na Obr. 25. Na Obr. 27 je vidět trajektorie systému, kde jsou na jednotlivých osách zobrazeny hodnoty stavů (vodorovná osa stav x_1 a svislá x_2).

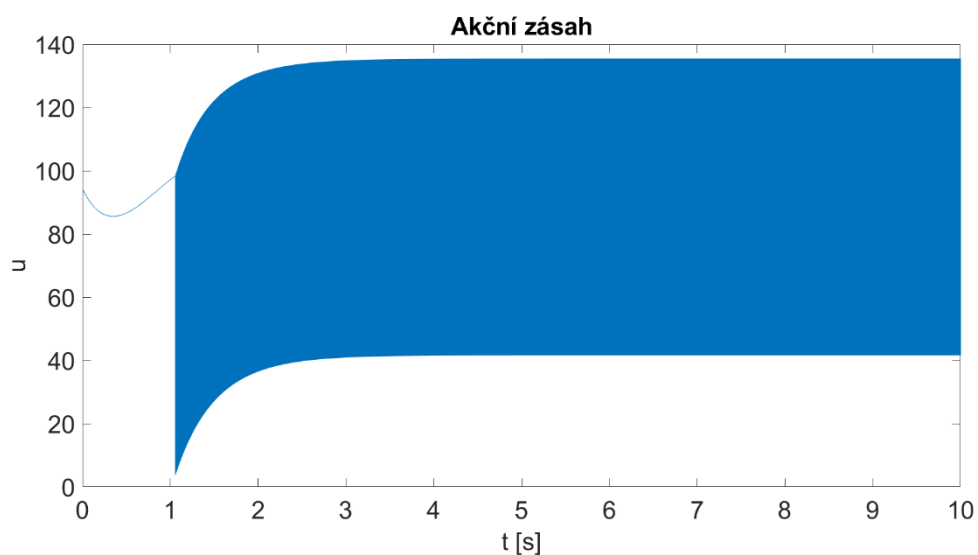


Obrázek 25 - Simulink model řízení v klouzavém režimu

Z trajektorie systému je vidět, že nejdříve systém směřuje k přepínacímu rozhraní. Dosažením přepínacího rozhraní dochází k přepínání akčního zásahu pomocí funkce signum a systém následně „klouže“ až do stavu $x_1 = 0$ a $x_2 = 0$. Přepínání je také možno vidět na průběhu akčního zásahu.

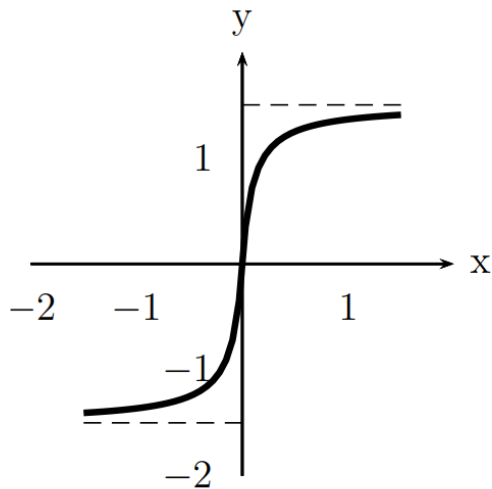


Obrázek 26 - Trajektorie systému při použití relé



Obrázek 27 - Akční zásah při použití funkce signum

Při použití na fyzické soustavě bylo zjištěno, že není možné použít funkci signum, rychlé přepínání způsobovalo rozkmitání soustavy. Tento jev je způsoben převážně tím, že v modelu nebyla popsána dynamika motoru, jeho odezva na vstup není okamžitá a trvá tedy nějakou dobu. Řešením je nahrazení funkce signum vhodnou aproximací, např. nasycení nebo Ambrosinova aproximace, kdy nahradíme nespojitě přepínání spojitou funkcí.

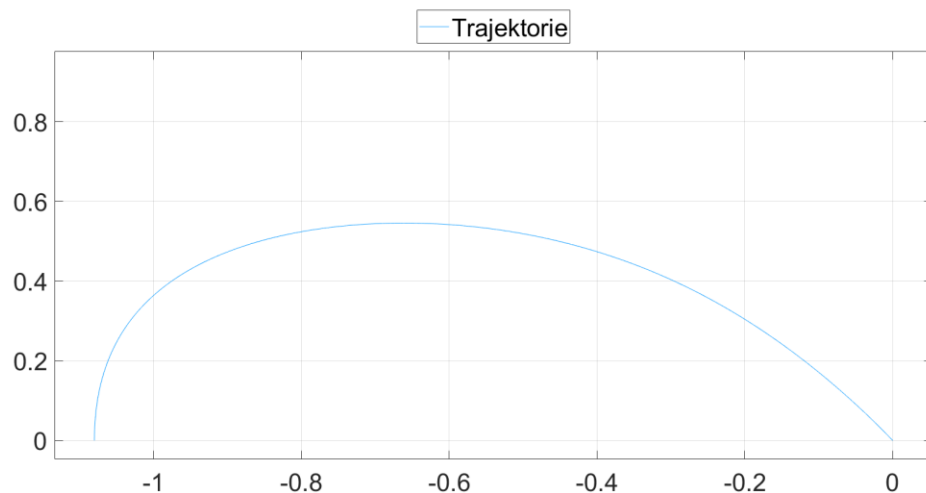


Obrázek 28 - Ambrosinova aproximace [2]

V rámci této práce bylo využito právě náhrady Ambrosinovou aproximací, její funkční předpis je:

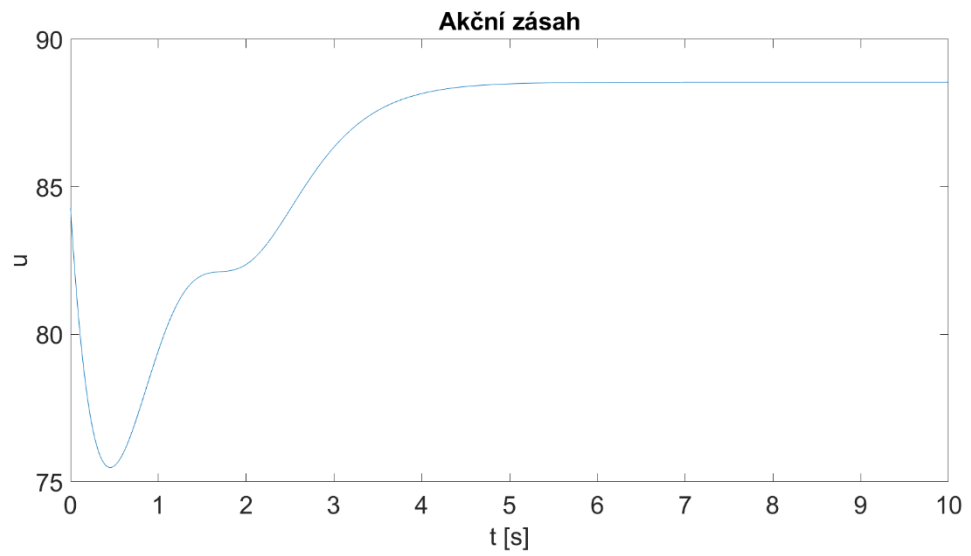
$$f(x) = y_{max} \frac{x}{|x|+\delta} \quad (54)$$

Průběh trajektorie systému je možné vidět na Obr. 29. Nastavením delta na hodnotu blízkou nule se přibližuje chování k funkci signum.

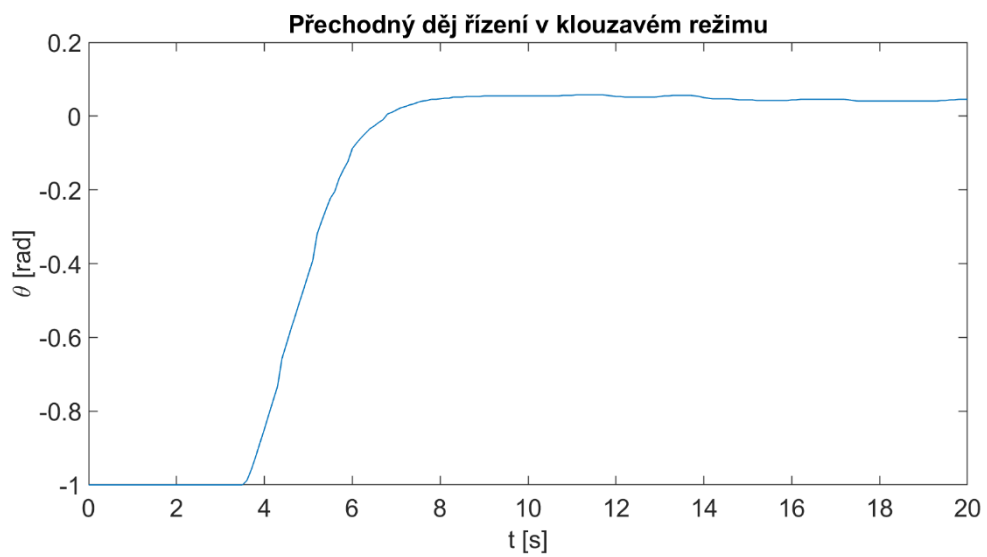


Obrázek 29 - Trajektorie systému při použití Ambrosinovy aproximace

Parametry delta a y_{max} byly opět nastaveny experimentálně tak, aby nedocházelo ke kmitání a zároveň bylo sledování přepínacího rozhraní přesné (zůstává zde malá odchylka od nulové polohy). Průběh akčního zásahu po nahrazení funkce signum je na Obr. 30. Změna požadované polohy je možné změnou polohy přepínací přímky (od hodnotu x_1 v argumentu funkce f odečteme hodnotu požadované polohy).



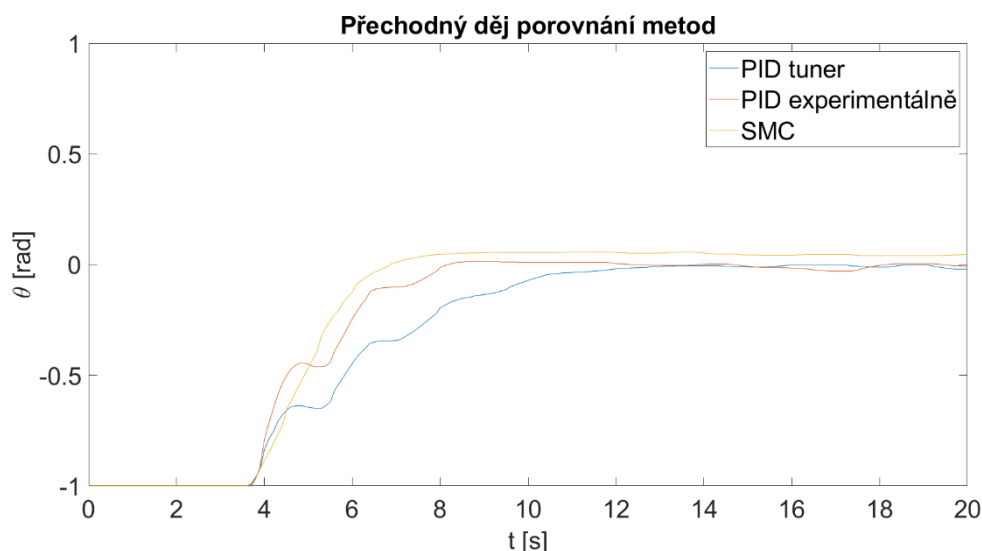
Obrázek 30 - Akční zásah při použití Ambrosinovy aproximace



Obrázek 31 - Odezva fyzické soustavy při řízení v klouzavém režimu

2.5.6 Porovnání regulátorů

V této části je možné vidět porovnání jednotlivých metod regulace natočení ramene na Obr. 32.



Obrázek 32 - Porovnání jednotlivých regulátorů

Nejllepší výsledek, co se týče rychlosti regulačního děje a zároveň tvarem regulačního pochodu vyšel pomocí řízení v klouzavém režimu. Nevýhodou tohoto řízení je stálá regulační odchylka vlivem aproximace relé spojitou funkcí.

U obou PID regulátorů docházelo k podobnému jevu při stavu, kdy byla soustava daleko od pracovního bodu, konkrétně k rychlému zrychlení a následně zpomalení do záporných úhlových rychlostí (viz. Obr. 32 zákmity kolem polohy -0,5 rad). To je nejspíše způsobeno tím, že zde nepůsobí příliš velká síla od tíhového zrychlení, na rozdíl od pracovního bodu, kde je tato síla největší (cos v pohybové rovnici). Tohoto jevu nedocházelo u klouzavého režimu, zde je tato nelinearita zahrnuta v samotném regulátoru. Oba PID regulátory dosáhly nulové ustálené regulační odchylky. Experimentálně nastavený regulátor má oproti druhému PID regulátoru rychlejší přechodný děj, ale projevovalo se zde větší kmitání okolo požadované hodnoty.

Všechny regulátory byly schopny reagovat na poruchu, to i v případě regulace s požadovanou hodnotou jinou než nula.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a sestavit přípravek 1DOF helikoptéry, vytvořit matematický model a pomocí identifikace zjistit parametry fyzického přípravku.

V rámci práce byl proveden návrh přípravku v programu Fusion 360. Následně byl přípravek pomocí 3D tisku a běžně dostupných dílů sestaven a oživen s konkrétním hardwarem. Nezbytnou částí bylo seznámení se s možnostmi řízení použitého BLDC motoru, který tvoří pohon vrtule. Jelikož motor neobsahoval Hallovy snímače pro snímání aktuální polohy rotoru, bylo nutné implementovat tento snímač mechanicky mimo samotnou konstrukci motoru. Jelikož se jednalo o univerzální snímač, který disponoval několika možnými výstupy, bylo nutné se seznámit s postupem pro jeho konfiguraci. Konkrétně pro použití s BLDC motorem nastavit správný počet pól párů a referenční pozici magnetu pro správnou orientaci vůči rotoru. Po oživení snímače polohy byl vytvořen Simulink model pro obsluhu hardwaru a implementován algoritmus pro řízení BLDC motoru. Dalším krokem byla vytvořena regulační smyčka pro udržování konstantního proudu motorem z důvodu řízení momentu tohoto motoru, následně bylo zjištěno, že to není nutné z důvodu lineární závislosti mezi otáčkami a síly, kterou vytváří vrtule. Na fyzickém přípravku byla následně provedena identifikace pomocí programu Matlab. Následně byly zjištěné parametry ověřeny pomocí simulace. Chování simulovaného modelu poměrně odpovídalo skutečné soustavě, ale ukázalo se, že jsou některé fyzikální jevy zanedbané. V poslední části byl proveden návrh PID regulátorů na dané soustavě v simulátoru. Ukázalo se, že návrh regulátoru na linearizovaném modelu pomocí standartních metod není vhodný. Jednou z úspěšných metod byla metoda pokus-omyl a také návrh v prostředí Simulink. Následně bylo vytvořeno řízení v klouzavém režimu, které se řadí mezi metody robustního řízení a bylo ověřeno, že funguje i přes nepřesnosti v identifikaci soustavy.

Výsledkem této práce je tedy vytvořený přípravek 1DOF helikoptéry, který umožňuje zkoumat dynamiku nelineárních systémů, možnosti identifikace parametrů a následně návrh vhodného řízení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PATEL, Ravi, Dipankar DEB, Himani MODI a Sunny SHAH. Adaptive backstepping control scheme with integral action for quanser 2-dof helicopter. *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. IEEE, 2017, 571-577. ISBN 978-1-5090-6367-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICACCI.2017.8125901
- [2] ŠOLC, F., P. VÁCLAVEK a P. VAVŘÍN. Řízení a regulace II. *VUT* [online]. 2011, **2011**(127), 230 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=21519&skupina=dokument_priloha
- [3] NOWAK, Robert D. Nonlinear system identification. *Circuits, Systems, and Signal Processing* [online]. 2002, **21**(1), 109-122 [cit. 2023-05-15]. ISSN 0278-081X. Dostupné z: doi:10.1007/BF01211655
- [4] PID controller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [5] BLAHA, P. a P VAVŘÍN. Řízení a regulace I - Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní. *Elektronické skriptum VUT* [online]. 2019, **2019**(1), 215 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=185138&skupina=dokument_priloha
- [6] SLOTINE, J.-J. E. a Weiping LI. *Applied nonlinear control*. 1. vydání. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1991. ISBN 978-0-13-040890-7.
- [7] MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1979, 426 s. L26-C2-IV-31f/55381.
- [8] Brushless Vs Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other. In: *Monolithic Power Systems* [online]. Monolithic Power Systems: Monolithic Power Systems, 2022 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>
- [9] Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory. In: *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií* [online]. Freescale Polovodiče, s.r.o.: Freescale Polovodiče, s.r.o., 2011 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_09_1111.PDF

- [10] JIANWEN SHAO, D. NOLAN a T. HOPKINS. A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives. *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335)*. IEEE, 2002, **2002**(1), 33-37. ISBN 0-7803-7404-5. Dostupné z: doi:10.1109/APEC.2002.989224
- [11] PADMARAJA YEDAMALE. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. In: *Microchip* [online]. Microchip Technology Inc.: Microchip Technology Inc., 2003 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [12] 3 DOF Helicopter. In: *Quanser* [online]. Canada: Quanser, . [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/3-dof-helicopter/>
- [13] AS5147P. In: *AMS* [online]. ams OSRAM Group: ams OSRAM Group, 2016 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5147P_DS000328_2-00.pdf
- [1
4] Incremental encoder. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder

PŘÍLOHY

Příloha A – model v programu Matlab Simulink

Příloha B – skript pro identifikaci soustavy v programu Matlab

Příloha C – model pro řízení 1DOF helikoptéry v programu Matlab Simulink

Přílohy jsou ve formě samostatných souborů .zip na přiloženém médiu.

Příloha D – tabulka měření momentu od motoru

D [%]	m [g]	Δm [kg]	F [N]	M [Nm]
0	420	0.000	0.000	0.000
5	420	0.000	0.000	0.000
10	420	0.000	0.000	0.000
15	420	0.000	0.000	0.000
20	420	0.000	0.000	0.000
25	420	0.000	0.000	0.000
30	418	0.002	0.020	0.005
35	416	0.004	0.039	0.009
40	414	0.006	0.059	0.014
45	412	0.008	0.078	0.019
50	410	0.010	0.098	0.024
55	407	0.013	0.128	0.031
60	405	0.015	0.147	0.035
65	402	0.018	0.177	0.042
70	399	0.021	0.206	0.049
75	397	0.023	0.226	0.054
80	395	0.025	0.245	0.059
85	393	0.027	0.265	0.064
90	390	0.030	0.294	0.071
95	389	0.031	0.304	0.073
100	386	0.034	0.334	0.080

Příloha E – fotodokumentace přípravku



Příloha F – rozhraní ovládání přípravku

