

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Jan Zielina



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 ROTAČNÍ KMITAVÉ SOUSTAVY NA RAMENI

ROTARY BEAM SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Zielina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jan Zielina

ID: 230214

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Přípravek rotační kmitavé soustavy na rameni

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

Ing. Miroslav Jírgl, Ph.D.

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

Práce pojednává o problematice řízení a regulace, seznamuje čtenáře s vývojovým prostředím CubeMX od firmy STMicroelectronics, dále práce popisuje softwarovou konfiguraci vývojové desky, algoritmus vektorového řízení pomocí Clarkové a Parkovi matematické transformace proudů v třífázovém systému, fyzický návrh kmitavé soustavy v prostředí solidworks, matematický model a simulaci v Matlab/Simulink a návrh řízení pro regulaci kmitů soustavy.

Klíčová slova

STM32, Nucleo, BLDC, FOC, Vektorové řízení, Solidworks, Simulink, regulace, simulace

Abstract

The thesis discusses the issues of control and regulation, introduces the reader to the CubeMX development environment from STMicroelectronics, describes the software configuration of the development board, the vector control algorithm using Clark and Park mathematical transformation of currents in a three-phase system, the physical design of the oscillating system in the solidworks environment, the mathematical model and simulation in Matlab/Simulink and the design of the control for oscillation control of the system.

Keywords

STM32, Nucleo, BLDC, FOC, Vector control, Solidworks, Simulink, regulation, simulation

Bibliografická citace

ZIELINA, Jan. *Přípravek rotační kmitavé soustavy na rameni*[online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160038>. 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:	<i>Jan Zielina</i>
VUT ID studenta:	<i>230214</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Přípravek rotační kmitavé soustavy na rameni</i>

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 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Lukáš Pohlovi, Ph.D. za užitečné rady, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích, metodickou a odbornou pomoc zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 22. května 2024

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD.....	11
1. STM32 CUBEMX.....	12
1.1 ČASOVAČE.....	12
1.1.1 Režim čítače	13
1.1.2 Čítač opakování	13
1.2 KOMUNIKACE	14
1.2.1 UART/USART.....	14
1.2.2 LPUART.....	14
1.3 ANALOGOVĚ-DIGITÁLNÍ PŘEVODNÍKY	15
1.3.1 Single-ended a diferenční vstup	15
1.3.2 ADC-Prerušeni.....	15
2. DESKA NUCLEO-G474RE	16
3. VÝKONOVÁ DESKA X-NUCLEO-IHM07M1	17
3.1 HARDWAROVÉ NASTAVENÍ.....	17
4. BLDC MOTOR	19
4.1 GBM6212H – 150T.....	19
4.2 VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ	20
4.2.1 Přímá Clarkové transformace	21
4.2.2 Přímá Parkova transformace	22
4.2.3 Inverzní Parkova transformace.....	22
4.2.4 Inverzní Clarkové transformace.....	23
5. MODELOVÁNÍ.....	24
5.1 FYZICKÝ MODEL	24
5.2 SOLIDWORKS	24
5.3 MECHANICKÝ MODEL	28
5.4 MATEMATICKÝ MODEL.....	28
6. SIMULINK	32
6.1 NASTAVENÍ PERIFERÍ	32
6.2 POLOHA MOTORU	34
6.3 POLOHA RAMENE.....	36
6.4 SIMULACE.....	38
6.5 REGULACE.....	39
6.5.1 Proudová regulace	39
6.5.2 Regulace polohy motoru.....	40
6.5.3 Regulace polohy koncového bodu ramene	41
7. ZÁVĚR.....	44
LITERATURA	45

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK..... 47

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozhraní nástroje CubeMX	12
1.2	Režimy čítače [6].....	13
2.1	Deska NUCLEO – G474RE[3]	16
3.1	Výkonová deska X-NUCLEO-IHM07M1[5].....	17
4.1	Rozdíl v uspořádání mezi vnějším a vnitřním typem rotoru [13]	19
4.2	BLDC motor GBM6212H – 150T [10]	20
4.3	Clarkové a Parkova transformace [7] upraveno autorem	21
4.4	Přímá Clarkové transforma [7]	21
4.5	Přímá Parkova transformace [7]	22
4.6	Inverzní Parkova transformace [7]	22
4.7	Inverzní Clarkové transformace[7].....	23
5.1	Přípravek rotační kmitavé soustavy od firmy QUANSER [8].....	24
5.2	Model přípravku	25
5.3	Podstava přípravku	26
5.4	Horní kostka s ramenem	26
5.5	Spojka rohová.....	27
5.6	Příruba _motor.....	27
5.7	Příruba _Horní _kostka.....	28
5.8	Mechanický model rotační kmitavé soustavy[8]	28
5.9	Popis rotační kmitavé soustavy[8] upraveno autorem	29
6.1	Generování události – konkrétní nastavení.....	33
6.2	Generování a povolení PWM	33
6.3	Schéma zapojení pro měření proudu	34
6.4	Blokové schéma senzoru polohy AS5048A [11].....	34
6.5	PWM signál [11] upraveno autorem.....	35
6.6	Schéma zapojení pro zjištění polohy motoru.....	36
6.7	ABI signály [12] upraveno autorem	37
6.8	Blokové schéma snímače AS5147[12].....	37
6.9	Schéma zapojení simulovaného modelu.....	38
6.10	Porovnání simulace s fyzickou soustavou	38
6.11	Blokové schéma zjednodušené kaskádní regulace [15].....	39
6.12	Proudová regulace – odezva na jednotkový skok	40
6.13	Zjednodušené zapojení pro kompenzaci poruchy.....	41
6.14	Poloha motoru a ramene – neřízený průběh	42
6.15	Poloha motoru a ramene – řízený průběh.....	43

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání USART/LPUART [6]	14
3.1	Hardwarové nastavení výkonové desky[5].....	18
4.1	Specifikace motoru GBM612H - 150T[14].....	20
6.1	Přiřazení pinů k perferiím.....	32
6.2	Parametry PI regulátoru pro d složku	40
6.3	Parametry PI regulátoru pro q složku	40
6.4	Parametry PID regulátoru	41
6.5	Parametry PID regulátoru	42

ÚVOD

Bakalářská práce rotační kmitavé soustavy na rameni spadá především do oblasti řízení a regulace. Práce se zabývá problematikou kmitů hliníkového ramene, které jsou generovány skrze pružiny.

V první kapitole bakalářské práce je představena teorie k dané problematice. Seznamuje čtenáře se softwarovým nástrojem CubeMX, kterým lze jednoduše nakonfigurovat časovače, analogově-digitální převodníky, vstupní a výstupní periferie mikrokontroleru.

Ve druhé a třetí kapitole je popsána vývojová deska nesoucí označení Nucleo board G474RE, výkonová deska X-Nucleo IHM07M1 od firmy STMicroelectronics a její hardwarová konfigurace

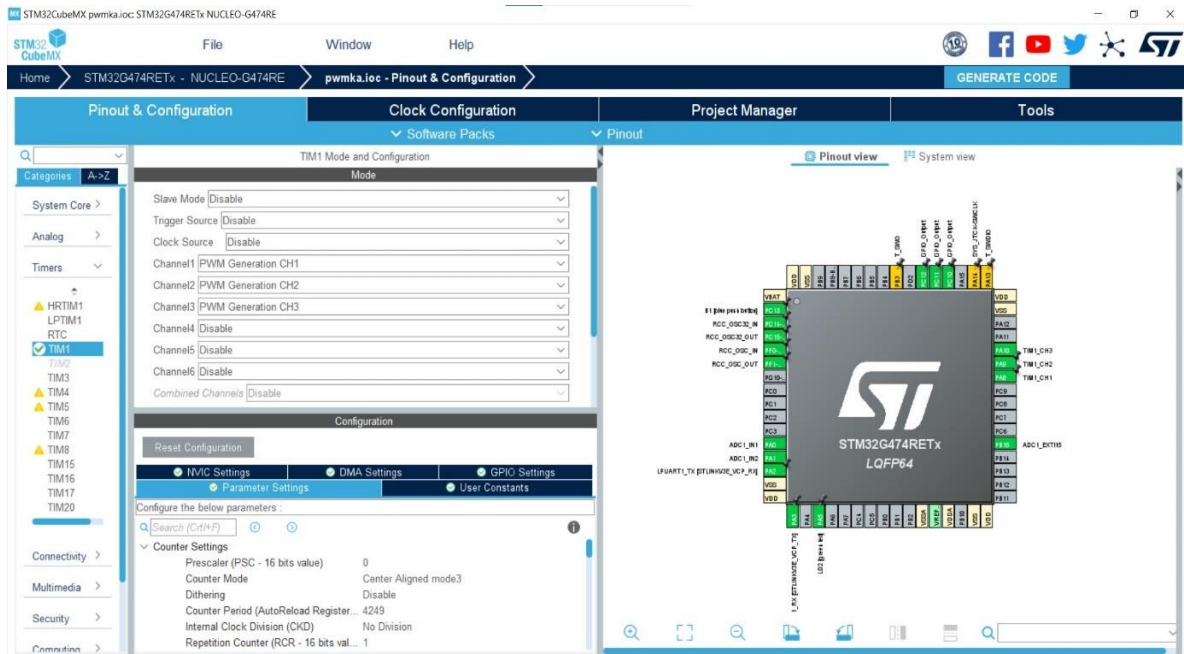
Ve čtvrté kapitole je popsán použitý typ motoru BLDC, kterým je celá soustava řízena, specifikovaný konkrétní typ motoru GBM6212H-150T a popsány matematické transformace jejichž autory jsou pan Robert H. Park a paní Edith Clarke.

V páté kapitole je popsán návrh fyzické soustavy v programu solidworks, mechanický model a obecný matematický model soustavy použitý v této práci.

Šestá kapitola se věnuje prostředí Matlab SIMULINK, konfiguraci periferií a implementaci řídicího algoritmu. Jsou zde teoreticky vysvětleny dva snímače polohy a jejich praktické využití v programu. Dále schéma zapojení simulace, výsledky, kterých se dosáhlo a porovnání s fyzickou soustavou. Na závěr je zde popsán návrh proudových regulátorů pro řízení motoru, polohového regulátoru motoru, regulátoru poruchy neboli kmitů ramene a dosažené výsledky graficky zobrazené a popsané s parametry zesílení regulátorů.

1. STM32 CUBEMX

STM32CubeMX je grafický nástroj, který umožňuje velmi snadnou konfiguraci mikrokontrolérů a mikroprocesorů STM32 a generování příslušného inicializačního kódu C pro jádro Arm® Cortex®-M nebo částečného stromu zařízení Linux® pro jádro Arm® Cortex®-A, a to krok za krokem. [1]



Obrázek 1.1 Rozhraní nástroje CubeMX

1.1 Časovače

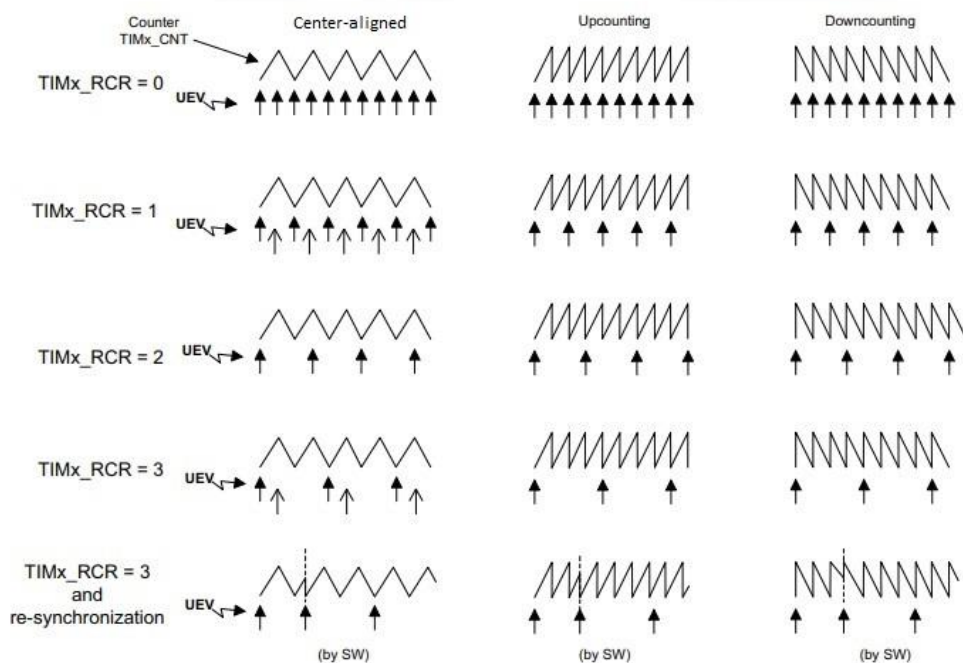
Obecné časovače a pokročilé řídicí časovače jsou klíčovými součástmi v mikrokontrolerech. Obecné časovače jsou vybaveny 16 nebo 32 - bitovým automaticky se obnovujícím čítačem, který je řízen programovatelným předděličem. Mohou být využity pro měření délky pulzů vstupních signálů nebo generování výstupních signálů jako PWM. Díky předděličům lze upravovat délky pulzů a periodu průběhu časovače. Pokročilé řídicí časovače, jako TIM1/TIM8/TIM20, mají podobnou strukturu, ale nabízejí rozšířené funkce jako komplementární PWM. Obecné a pokročilé časovače jsou nezávislé a mohou být synchronizovány pro koordinované operace. [6]

1.1.1 Režim čítače

Režim čítače („Counter mode“) má 3 hlavné možné nastavení a to „Upcounting mode“ kedy časovač počítá od 0 do hodnoty automatického opätovného načtení „auto-reload value“, tuto hodnotu obsahuje registr `TIMx_ARR`, poté se resetuje a generuje událost (UEV) přetečení čítače. Další možné nastavení je „Downcounting mode“, který funguje stejně jako Upcounting mode, ale naopak tzn. počítá od hodnoty registru `TIMx_ARR` do 0, poté se resetuje a generuje událost podtečení čítače. Poslední možností je „Center-aligned mode“, který nejprve počítá od 0 po hodnotu registru `TIMx_ARR`, kdy generuje událost přetečení čítače a následně počítá od hodnoty registru `TIMx_ARR` po 0 kdy generuje událost podtečení čítače. Obrázek 1.2 graficky znázorňuje průběh signálu čítače. Obecně je nastavení v Center-aligned módu nejlepší pro malý šum signálu a lepší generování PWM [6]

1.1.2 Čítač opakování

Generování události je také závislé na čítači opakování „Repetition counter“ (RCR), když dosáhne hodnoty nula. To je užitečné pro generování signálů PWM. V režimu „Center aligned mode“ pro liché hodnoty RCR dojde k události buď při přetečení, nebo podtečení v závislosti na tom, kdy byla zapsána hodnota do registru `TIMx_RCR` a kdy byl spuštěn čítač. Pokud byla hodnota RCR zapsána před spuštěním čítače, událost se generuje při podtečení. Pokud byla hodnota RCR zapsána po spuštění čítače, dojde k události při přetečení.[6]



Obrázek 1.2 Režimy čítače [6]

1.2 Komunikace

1.2.1 UART/USART

USART („Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) je rozhraní, které nabízí flexibilní způsob provádění Full-duplex výměny dat s externím zařízením vyžadujícím standardní asynchronní sériový datový formát NRZ („Non Return to Zero“). Velmi širokému rozsahu baudových rychlostí lze dosáhnout pomocí frakčního generátoru baudové rychlosti. USART podporuje synchronní jednosměrnou komunikaci a Half-duplex komunikaci po jediném vodiči. Komunikace mezi více procesory je také podporována. Vysokorychlostní datová komunikace je možná pomocí DMA (z angl. „Direct Memory Access“ - přímý přístup k paměti) pro konfiguraci více bufferů. [6]

1.2.2 LPUART

Pro komunikaci mezi hardwarovou a softwarovou částí byl již v programu CubeMX továrně nakonfigurován LPUART kvůli podpoře virtuálního sériového portu (COM portu). LPUART (z angl. Low Power Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) neboli nízkoenergetický univerzální asynchronní přijímač/vysílač je typ modulu UART, který je optimalizovaný pro nízkou spotřebu energie. Stejně jako UART podporuje synchronní jednosměrnou komunikaci Half-duplex komunikaci po jediném vodiči, modemové operace (CTS/RTS) a komunikaci mezi více procesory. [6]

Tabulka 1.1 Porovnání USART/LPUART [6]

USART/LPUART režimy	USART	UART	LPUART
Hardwarové řízení toku pro modem	ANO	ANO	ANO
Nepřetržitá komunikace pomocí DMA	ANO	ANO	ANO
Multiprocessorová komunikace	ANO	ANO	ANO
Synchronní režim (Master/Slave)	ANO	-	-
Režim Smartcard	ANO	-	-
Jednodrátová half-duplex komunikace	ANO	ANO	ANO
Blok IrDA SIR ENDEC	ANO	ANO	-
Režim LIN	ANO	ANO	-
Doména se dvěma hodinami a probuzení z režimu nízké spotřeby	ANO	ANO	ANO
Přerušování časového limitu přijímače	ANO	ANO	-
Modbus komunikace	ANO	ANO	-
Automatická detekce baudové rychlosti	ANO	ANO	-
Povolení driveru	ANO	ANO	ANO
Tx/Rx FIFO	ANO	ANO	ANO

1.3 Analogově-digitální převodníky

Každý ADC se skládá z 12-bitového postupného aproximativního analogově-digitálního převodníku. Každý ADC má až 19 multiplexovaných kanálů. A/D převod různých kanálů lze provádět v jednom, kontinuálním, skenovacím nebo diskretním režimu. Výsledek ADC je uložen v 16-bitovém datovém registru. ADC jsou mapovány na sběrnici AHB, což umožňuje rychlé zpracování dat. Funkce analogového watchdogu umožňují aplikaci detekovat, zda vstupní napětí překročí uživatelem definované horní nebo dolní mez. Vestavěný hardwarový oversampler umožňuje zlepšit analogový výkon a zároveň ulehčuje výpočetní zátěž CPU. Efektivní nízkoenergetický režim je implementován pro velmi nízkou spotřebu energie při nízké frekvenci. [6]

1.3.1 Single-ended a diferenční vstup

Vstupy analogově-digitálních převodníků mohou být nakonfigurovány jako „Single-ended“ nebo „Differential“. Vstupy v módu single-ended mají analogovou hodnotu napětí k převodu, jako rozdíl mezi externím napětím a záporným referenčním napětím. Vstupy v módu differential mají analogovou hodnotu napětí k převodu, jako rozdíl mezi externí hodnotou vstupního pozitivního napětí a vstupního negativního napětí.

V differential módu je citlivost dva krát menší než v módu single-ended [6]

1.3.2 ADC-Přerušeni

Pro řízení BLDC motoru, který je použit v této bakalářské práci potřebujeme znát proudy v každé fázi motoru. Pro zjištění proudů jsme schopni využít měření proudu pomocí přerušeni analogově-digitálního převodníku. To může být generováno:

- Na konci jakékoliv konverze pro regulární skupiny
- Na konci sekvence konverzí pro regulární skupiny
- Na konci jakékoliv konverze pro injected skupiny
- Na konci sekvence konverzí pro injected skupiny
- Při výskytu detekce analogovým watchdogem
- Při konci vzorkovací fáze
- Při přetečení dat
- Při přetečení injected kontext fronty [6]

V této práci bylo užito generování přerušeni na konci sekvence konverzí pro injected skupiny. Konkrétní nastavení AD převodníku je popsáno v kapitole 6.1 Nastavení periférií

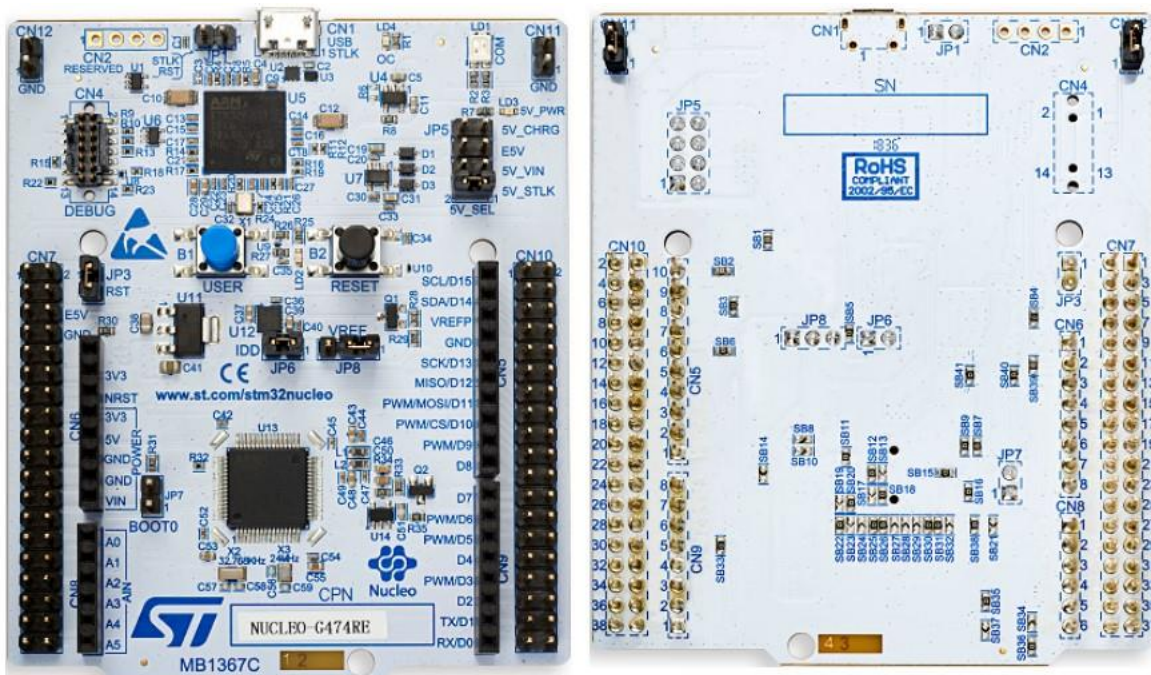
2. DESKA NUCLEO-G474RE

Deska NUCLEO-G474RE spadá do řady NUCLEO-G4xx od firmy STMicroelectronics. Mikrokontroler pracuje s 32-bitovým jádrem ARM – CORTEX-M4, které obsahuje jednotku s plovoucí řadovou čárkou (FPU) a je taktován až na 170 MHz.

Deska obsahuje vestavené paměti jako jsou 512 kB Flash paměť s podporou ECC, 96kB paměť SRAM, Externí paměťové rozhraní pro statické paměti FSMC podporující paměti SRAM, PSRAM, NOR a NAND.

Dále se zde nachází pět 12-bitových AD převodníků, sedm 12-bitových DA převodníků, sedmnáct časovačů z toho tři PWM časovače pro řízení motoru. Mikrokontroler nabízí integrovaný ladící programátor/debugger, kterým lze snadněji a bez přídavného hardwaru debugovat. Nucleo – G474RE komunikuje skrze tato rozhraní:

- 3xFDCAN
- 4xI2C
- 4xSPIs
- 5xUSART/UARTs
- 1xLPUART
- 1xSAI (Serial Audio Interface) [2][3]

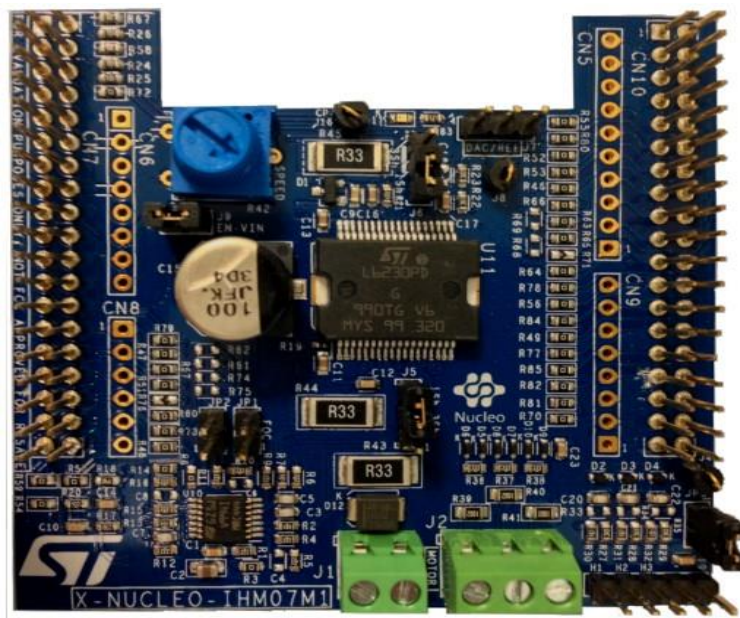


Obrázek 2.1 Deska NUCLEO – G474RE[3]

3. VÝKONOVÁ DESKA X-NUCLEO-IHM07M1

Jako rozšíření k mikrokontroleru NUCLEO-G474RE byla použita rozšiřující výkonová deska X-NUCLEO-IHM07M1, která je založená na čipu L6230 pro STM32 Nucleo. K desce je možnost připojit tří fázový bezkartáčový motor s permanentními magnety (BLDC) Hlavní funkce výkonové desky:

- Jmenovitý rozsah provozního napětí: 8–48 V DC
- Maximální výstupní proud: 2,8 A
- Tepelné měření a ochrana proti přehřátí
- Konfigurovatelné propojky pro snímání proudu motoru
- Konektor pro připojení Hallova snímače motoru a enkodéru [4]



Obrázek 3.1 Výkonová deska X-NUCLEO-IHM07M1[5]

3.1 Hardwarové nastavení

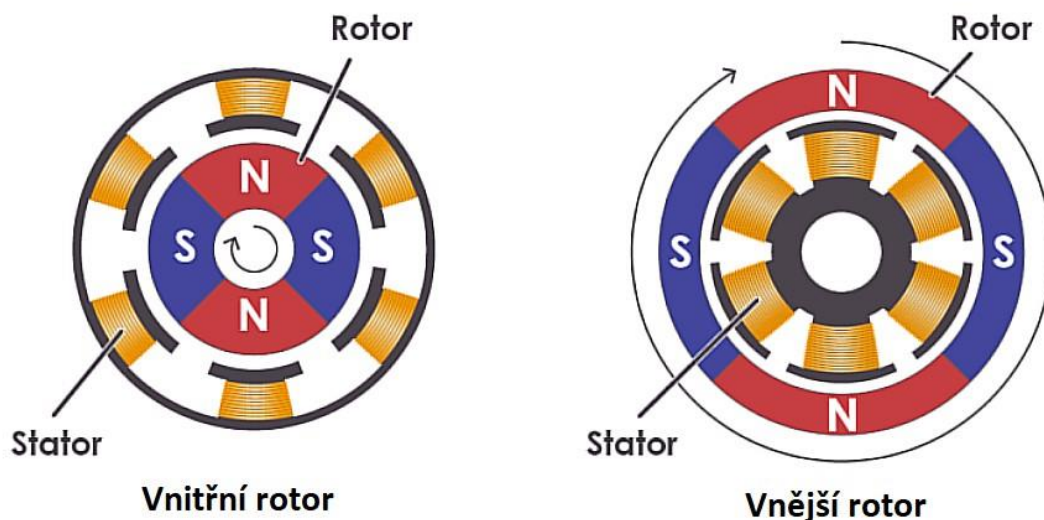
Deskou lze ovládat motory pomocí šesti krokové komutace nebo pomocí vektorového řízení FOC („Field Orientated Control“). V této práci bylo využito vektorového řízení, a proto bylo třeba správně nakonfigurovat jumper konektory. Hardwarová konfigurace pro vektorové řízení je zobrazena v tabulce 3.1[5]

Tabulka 3.1 Hardwarové nastavení výkonové desky[5]

Jumper	Popis konfigurace	Zapojení
JP1	BIAS v obvodu pro měření proudu	ZAVŘENO
JP2	GAIN v obvodu pro měření proudu	ZAVŘENO
JP3	Povolení Hall/Encoder detekce	OTEVŘENO
J5	FOC/šesti kroková komutace	1-2 ZAVŘENO
J6	FOC/šesti kroková komutace	1-2 ZAVŘENO
J7	Debug konektor pro DAC	OTEVŘENO
J9	Napájení nucleo desky G474RE skrze výkonovou desku IHM07M1	OTEVŘENO

4. BLDC MOTOR

BLDC motor (z angl. BrushLess Direct Current) je bezkartáčový stejnosměrný motor. Tento typ motoru představuje pokrok oproti klasickému stejnosměrnému motoru, kde se pro řízení využívalo komutátoru a grafitových kartáčků. Komutátor (rotující část) zajišťoval napájení vinutí cívek stejnosměrným proudem. Jak již z názvu napovídá u BLDC motoru se odstranil komutátor s kartáčky, tím se odstranil problém jiskření či obrušování kartáčků. Náhradou komutátoru u BLDC motorů je třífázový měnič a Hallův senzor. Třífázový měnič mění stejnosměrný proud na střídavý, takže se motor principiálně chová jako střídavý, ale svojí konstrukcí se podobá stejnosměrnému motoru. Motor může mít rotor vnějšího typu nebo vnitřního. Vnější typ rotoru má rotující část motoru na vnější straně a statickou uvnitř zatímco vnitřní typ rotoru přesně naopak, rotor je uvnitř a okolo něj je stator.[9]



Obrázek 4.1 Rozdíl v uspořádání mezi vnějším a vnitřním typem rotoru [13]

4.1 GBM6212H – 150T

V této bakalářské práci byl použit motor od iPower Gimbal BL motor 6212H – 150T od firmy iFlight (obrázek 4.2). Motor je určen pro použití v gimbálových zařízeních, zejména pro stabilizaci kamer ve vzduchu. Motor dosahuje nízkých otáček, váha je 218g a obsahuje 11 pólových dvojic („pole pairs“). [10] V tabulce 4.1 jsou uvedeny dohledatelné parametry k motoru.



Obrázek 4.2 BLDC motor GBM6212H – 150T [10]

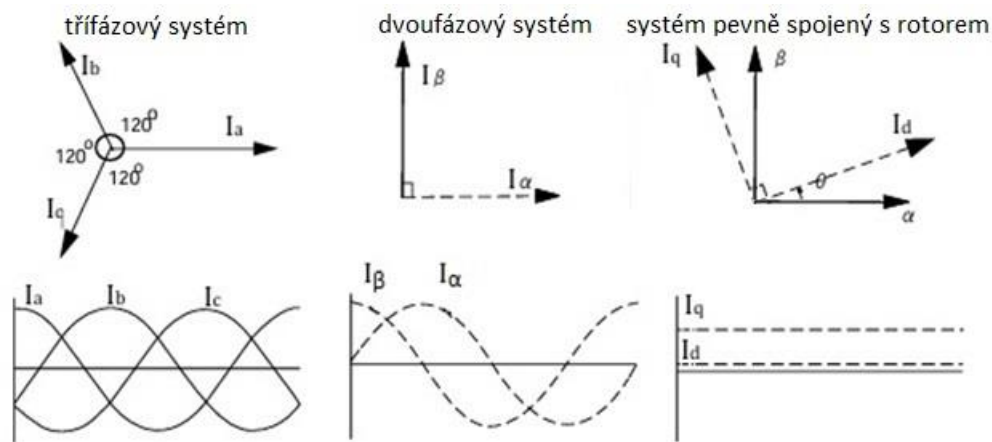
Tabulka 4.1 Specifikace motoru GBM612H - 150T[14]

Max. proud (A)	11	Proud bez zátěže (A)	0.09
Rozměr motoru (mm)	68*28.8	Max. výkon (W)	239
Rozměr statoru (mm)	61.5*12	Konfigurace	24N22P
Odpor cívek (Ω)	15.2	Váha motoru (g)	248.5

4.2 Vektorové řízení

Řízení motoru s permanentním magnetem využívá PI regulátoru pro regulaci proudu přímé složky d a příčné složky q . U třífázových motorů mají proudy harmonický průběh. Kvůli tomu se musí harmonické proudy převést pomocí transformací Clarkové a Parka na proudy d a q .

Vektorové řízení využívá informaci natočení rotoru a okamžité hodnoty proudu. Pomocí přímé Clarkové transformace lze převést měřené proudy (a , b , c) ve třífázovém systému se vzájemným posuvem fází o 120° do dvoufázové soustavy s proudy I_α , I_β se vzájemným posuvem fází o 90° . Následně Parkovou transformací s informací o poloze rotoru lze převést tyto proudy na požadovaný přímý proud I_d a proud na něj kolmý I_q . Proud I_d a I_q lze pak regulovat lineárními regulátory typu PI. Pro zpětné řízení rotoru regulovanými proudy je třeba tyto proudy převést zpět na harmonický děj do třífázového souřadného systému. To se provádí obdobným způsobem pomocí inverzní Clarkové a Parkovi transformace.[7]

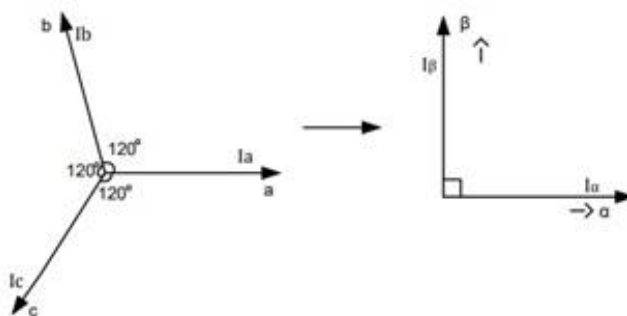


Obrázek 4.3 Clarkové a Parkova transformace [7] upraveno autorem

4.2.1 Přímá Clarkové transformace

Tato transformace převádí veličiny z třífázového souřadného systému na veličiny ve dvoufázovém ortogonálním souřadném systému. Pro stejné amplitudy vstupních a výstupních proudů je Clarkové matice vynásobena konstantou $\frac{2}{3}$. Přímá Clarkové transformace je vyjádřena následovně. [7]

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = T_{\alpha,\beta} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

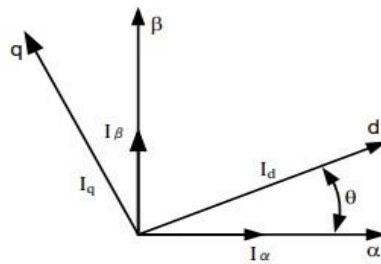


Obrázek 4.4 Přímá Clarkové transformace [7]

4.2.2 Přímá Parkova transformace

Tato transformace převádí vektory ve vyváženém dvoufázovém ortogonálním stacionárním systému na ortogonální rotující referenční systém. Přímá Parkova transformace je vyjádřena následovně. [7]

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = T_{d,q}(\theta) \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

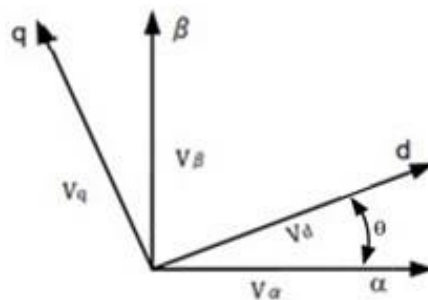


Obrázek 4.5 Přímá Parkova transformace [7]

4.2.3 Inverzní Parkova transformace

Tato transformace převádí veličiny v rotující referenční soustavě na vektory ve vyváženém dvoufázovém ortogonálním stacionárním systému. Inverzní Parkova transformace je vyjádřena následovně. [7]

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T_{d,q}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

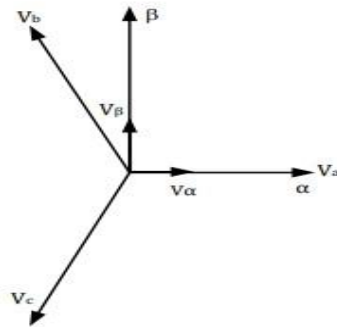


Obrázek 4.6 Inverzní Parkova transformace [7]

4.2.4 Inverzní Clarkové transformace

Tato transformace převádí vektory z vyváženého dvoufázového ortogonálního stacionárního systému na veličiny ve třífázovém souřadném systému. Inverzní Clarkové transformace je vyjádřena následovně. [7]

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = T_{\alpha,\beta}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$



Obrázek 4.7 Inverzní Clarkové transformace[7]

5. MODELOVÁNÍ

5.1 Fyzický model

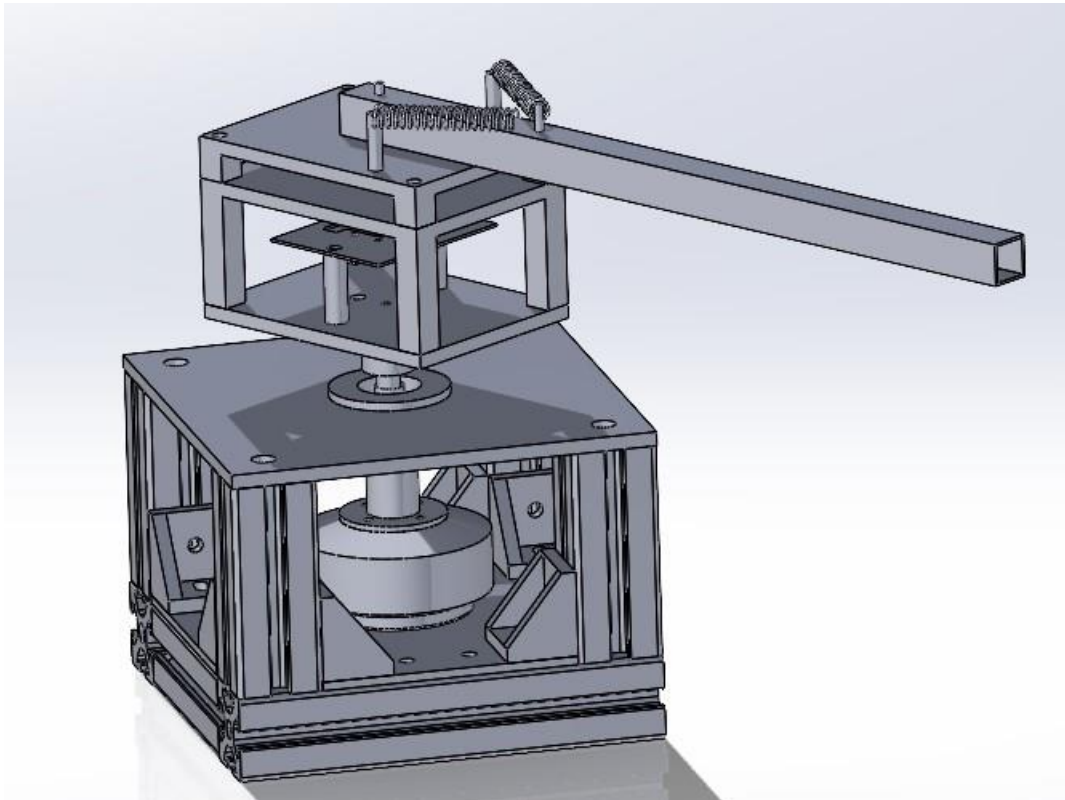
Inspirační soustavy byl již existující výrobek od firmy QUANSER (obr. 5.1). Sestava, která byla navrhována se velmi podobá existujícímu výrobku, avšak snahou této práce je vytvořit přípravek z volně dostupných a cenově nenáročných dílů. Sestava se skládá ze tří hlavních dílů, respektive z podstavy, horní kostky a ramene. Podstava soustavy se skládá z ALU profilů, kvůli zatížení přípravku, aby nedošlo k jeho převrácení, či nějaké nežádoucí nestabilitě vlivem ramene. Horní kostka je vytisknutá na 3D tiskárně a slouží pro přenos pohybu motoru na rameno a také uchycení Hallova snímače. Rameno je hliníková hranatá trubka s délkou 30 cm, která by neměla být náchylná na prohýbání, plastová trubka či jiná trubka z flexibilního materiálu by nemusela být ideální pro tuto úlohu.



Obrázek 5.1 Přípravek rotační kmitavé soustavy od firmy QUANSER [8]

5.2 Solidworks

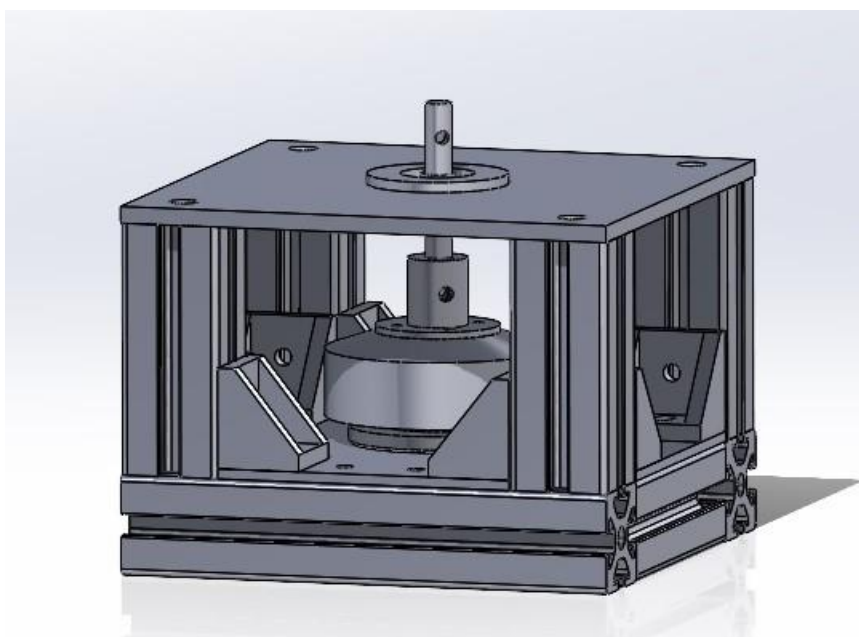
Pro návrh soustavy bylo využito softwarového rozhraní SOLIDWORKS, kvůli snadnému použití a zkušenostem. Hlavní myšlenkou pro návrh přípravku bylo, aby se soustava dala do budoucna kdykoliv upravit či vylepšit. To znamená, že všechny součásti jsou navrženy tak, aby se daly jednoduše montovat a demontovat.



Obrázek 5.2 Model přípravku

5.2.1.1 Podstava přípravku

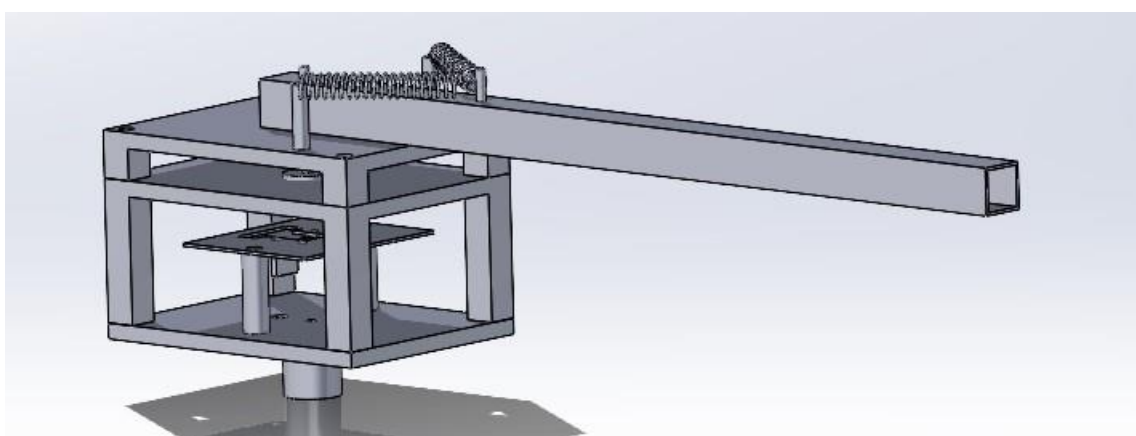
Podstava je konstruována převážně z ALU profilů, důvodem je, aby byla soustava zatížená a nedocházelo k nestabilitě vlivem váhy ramene. Čtyři ALU profily tvořící základ podstavy jsou ve tvaru čtverce o rozměrech 150x150mm, na rozích jsou umístěné další čtyři ALU profily sloužící jako nohy podstavy. Na spodní části podstavy je položená deska s otvory pro upevnění motoru, dále pak na nohách je položená druhá deska s vtačeným ložiskem ve středu a upevněná šrouby o velikosti M8x20. Podstava drží pohromadě díky plastovým rohovým spojkám.



Obrázek 5.3 Podstava přípravku

5.2.1.2 Horní kostka

Horní kostka je celá vyhotovená na 3D tiskárně. Nejedná se o součást, která by měla mít větší nároky na pevnost či stabilitu, naopak je lepší, aby byla kostka co nejlehčí. Nohy kostky jsou duté a jsou do nich vloženy závitové vložky, tím pádem lze nohy sešroubovat dohromady. Ke kostce je přidělaná příruba pro držení hřídele, tím se zajistila pevnost kostky a vyloučilo prokluzování kostky na hřídeli. Kostka má mezipatro, kde se nachází pouze ložisko a nadále již jen strop, kde je ve středu třetí ložisko a dva šrouby pro uchycení pružin. Ložiska slouží k menšímu namáhání materiálu, vlivem točení a váhy ramene by se bez ložisek tvořila mezera mezi hřídelí a plastovou částí a tím by vznikala vůle, která je do budoucna nežádoucí.



Obrázek 5.4 Horní kostka s ramenem

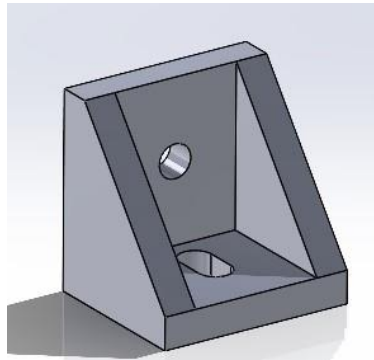
5.2.1.3 Rameno

Jedná se o hranatou hliníkovou trubku s rozměrem 15x15x300mm. Na jednom konci je vyvrtaná díra o průměru 3 mm a zhruba ve čtvrtině se nachází provizorní šroub pro zachycení pružin, které generují kmity ramene. Rameno je připevněno k hřídeli na jejímž konci se nachází plochý magnet pro polohový senzor.

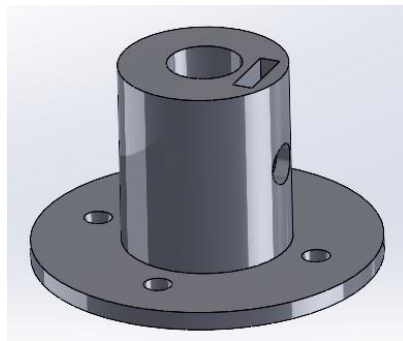
5.2.1.4 Ostatní součástky

Mimo hlavní části modelu byly navrženy součásti modelu, které sloužili převážně jako spojovací materiál. Těmito součásti jsou:

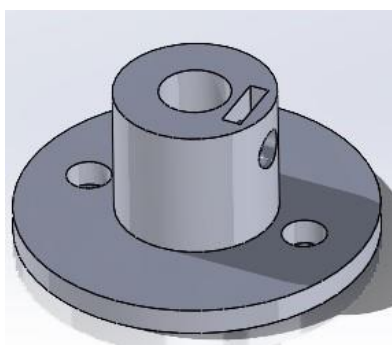
- Spojka rohová – pro spojení ALU profilů
- Příruba_motor – pro spojení hřídele s motorem
- Příruba_Horní_kostka – pro spojení hřídele s horní kostkou soustavy



Obrázek 5.5 Spojka rohová



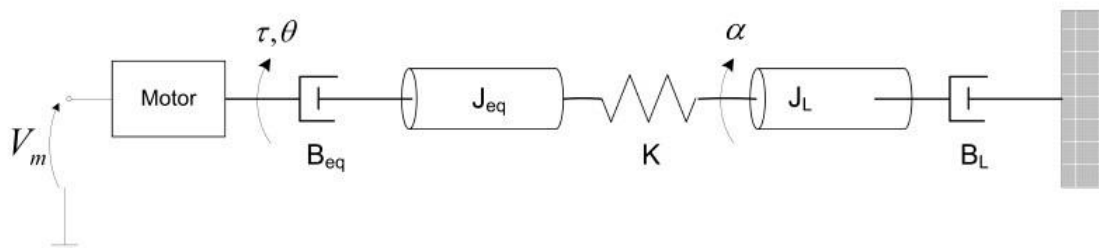
Obrázek 5.6 Příruba_motor



Obrázek 5.7 Příruba_Horní_kostka

5.3 Mechanický model

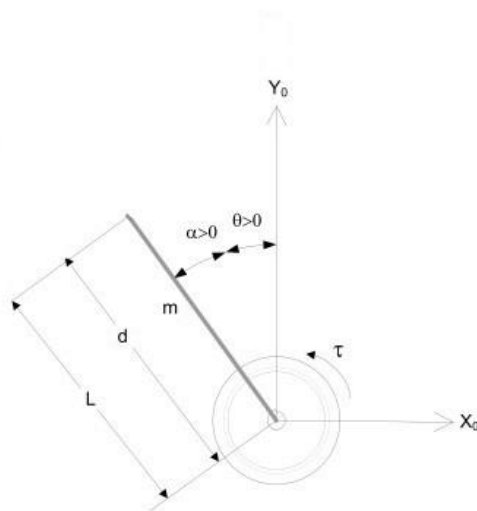
Model je reprezentován zjednodušeným blokovým diagramem (obrázek 5.8). Vstupní veličinou je napětí motoru V_m . To generuje kroutící moment, který otáčí soustavou přípravku. Součinitel viskózního tření motoru je označen B_{eq} . Tření působící na článek je reprezentováno koeficientem viskózního tlumení B_L . Nakonec je pružný kloub modelován jako lineární pružina s tuhostí K . [8]



Obrázek 5.8 Mechanický model rotační kmitavé soustavy[8]

5.4 Matematický model

Pro nalezení matematického modelu přípravku byla využita Lagrangeova metoda. Tento postup je často využíván při řešení složitějších systémů, jako například robotických manipulátorů s více pohyblivými částmi. Popis soustavy je ukázán na obrázku 5.9



Obrázek 5.9 Popis rotační kmitavé soustavy[8] upraveno autorem

Langrangeova metoda je popsána takto:

$$L = T - V, \quad (5.1)$$

kde T je celková kinetická energie

V je celková potenční energie. [8]

Obecně celková kinetická energie je definována jako:

$$T = \frac{1}{2} m \cdot v^2, \quad (5.2)$$

kde m je hmotnost přípravku

v je rychlost.

Tento vztah je upraven na rovnici, která obecně vyjadřuje kinetickou energii rotačních těles:

$$T = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2, \quad (5.3)$$

kde J je moment setrvačnosti

ω je úhlová rychlost.

Dále je vztah 5.3 upraven na rovnici vyjadřující kinetickou energii soustavy s ramenem.

Rotační pohyby jsou zde dva, a to rotace motoru a rotace ramene, zároveň se bere v potaz i setrvačnost motoru J_{eq} a setrvačnost ramene J_l .

$$T = \frac{1}{2} J_{eq} \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_l (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2, \quad (5.4)$$

Obecně celková potenciální energie je popsána následovně:

$$V = m \cdot g \cdot \Delta h, \quad (5.5)$$

kde m je hmotnost tělesa

g je gravitační zrychlení

h je změna výšky tělesa nad referenčním bodem.

Potenciální energie přípravku je definovaná takto:

$$V = \frac{1}{2} K \cdot \alpha^2, \quad (5.6)$$

kde K je tuhost pružiny

α je úhel natočení ramene.

Dosazením rovnic 5.4 a 5.6 do Langrangeovi rovnice získáme tento vztah:

$$L = \frac{1}{2} J_{eq} \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_l (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 - \frac{1}{2} K \cdot \alpha^2, \quad (5.7)$$

Zobecněné síly Q podle Euler-Langrange pro rotační přípravek dají rovnice:

$$Q_1 = \tau - B_{eq} \cdot \dot{\theta} = \frac{\partial^2 \cdot L}{\partial L \cdot \partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta}, \quad (5.8)$$

kde τ je točivý moment

B_{eq} je tření motoru

θ je úhel natočení motoru,

$$Q_2 = -B_l \cdot \dot{\alpha} = \frac{\partial^2 \cdot L}{\partial L \cdot \partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha}, \quad (5.9)$$

kde B_l

je tření ramene

α je úhel natočení ramene.

Dosazením Lagrangeovi rovnice (5.7) do vztahu 5.8 a 5.9 a následnou úpravou vznikne rovnice 5.10 a 5.11

$$\tau = (J_{eq} + J_l)\ddot{\theta} + J_l\ddot{\alpha} + B_{eq}\dot{\theta}, \quad (5.10)$$

$$0 = J_l\ddot{\theta} + J_l\ddot{\alpha} + B_l\dot{\theta} + K\alpha, \quad (5.11)$$

Rozdílem rovnic 5.10 a 5.11 a vyjádřením $\ddot{\theta}$ vznikne první pohybová rovnice:

$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\theta} + \frac{K}{J_{eq}}\alpha + \frac{\tau}{J_{eq}}, \quad (5.12)$$

Dosazením první pohybové rovnice 5.12 do výrazu 5.11 vznikne druhá pohybová rovnice

$$\ddot{\alpha} = \frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\theta} - K\left(\frac{J_{eq} + J_l}{J_{eq}J_l}\right)\alpha - \frac{\tau}{J_{eq}}, \quad (5.13)$$

[8]

6. SIMULINK

6.1 Nastavení periférií

Nastavení periférií se provádí v programu STM32CubeMX a zde je popsána konfigurace mikrokontroleru, která je důležitá pro správně fungování. Každá nastavená periférie se promítne do karty „Project manager – Advanced Settings“, kde je nastavena výchozí hodnota pro danou periférii HAL a Visibility je zaškrtnuto. Pro práci se simulinkem je nutné nastavit periférii na LL a vypnout Visibility, tím se povolí generování funkcí bez klíčového slova „static“ a rozšíří se viditelnost těchto funkcí mimo CubeMX. V tabulce 6.1 jsou uvedeny přehledně piny, které mají nějakou roli v práci.

Tabulka 6.1 Přiřazení pinů k perifériím

Pin	Název	Popis
PA8	TIM1_CH1	Generování PWM kanál 1
PA9	TIM1_CH2	Generování PWM kanál 2
PA10	TIM1_CH3	Generování PWM kanál 3
PC10	GPIO_Out	Povolení PWM kanál 1
PC11	GPIO_Out	Povolení PWM kanál 2
PC12	GPIO_Out	Povolení PWM kanál 3
PC6	TIM8_CH1	Enkodér signál A
PC7	TIM8_CH2	Enkodér signál B
PB6	TIM8_ETR	Enkodér signál I
PC0	ADC1_IN6	Měření proudu na fázi C
PC1	ADC1_IN7	Měření proudu na fázi B
PA0	ADC1_IN1	Měření proudu na fázi A
PA6	GPIO_Out	Globální povolení PWM
PB2	TIM5_CH1	PWM výstup pro měření polohy motoru

Roztočení motoru je prováděno generováním PWM signálu pomocí časovače TIM1. Nastavení časovače TIM1:

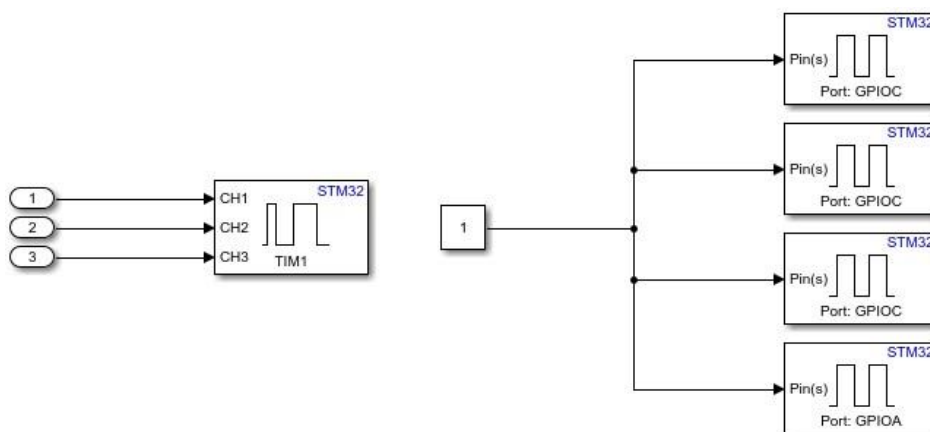
- Counter mode – Center aligned mode 3
- Counter period – 8500
- Repetition counter (RCR) – 1
- Trigger event selection TRGO – Update event

Časovač s tímhle nastavením generuje trojúhelníkový průběh pro, který je generován event pro měření proudu podle Counter mode a RCR, které je nastaveno na hodnotu 1 a podle obrázku 6.1 lze vidět, že event je generován vždy, kdy dojde ke změně směru čítání. Counter period ovlivňuje frekvenci generovaného PWM signálu, hodnota 8500 udává frekvenci přibližně 20kHz.



Obrázek 6.1 Generování události – konkrétní nastavení

Trigger event selection TRGO souvisí s měřením proudu a nastavením AD převodníku. V neposlední řadě musí být povoleno generování PWM signálu, to se provede nastavením příslušných pinů jako GPIO_Output a v simulinku se zapíše jednička do příslušného pinu, jak je na obrázku 6.2



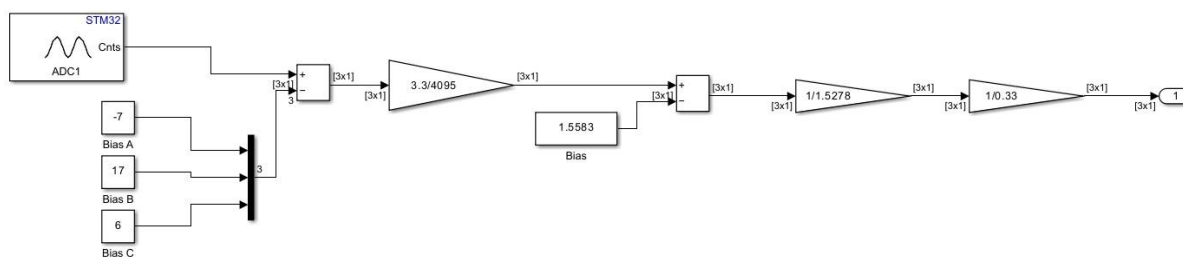
Obrázek 6.2 Generování a povolení PWM

Další periferií je AD převodník, který slouží pro měření proudu. Tento převodník generuje přerušení po změření proudu každé fáze motoru. Nastavení parametrů AD převodníku je následující:

- IN 1,6,7 Single-ended
- End of conversion selection – End of sequence of conversion
- Enable injected conversions – Enable
- External trigger source – Timer 1 Trigger out event
- External trigger conversion edge – Trigger detection on the rising edge
- Rank 1 – Channel 1
- Rank 2 – Channel 7
- Rank 3 – Channel 6

V záložce NVIC settings je potřeba zaškrtnout „ADC1 and ADC2 global interrupt“, zbytek nastavení je ponecháno výchozí. Výchozí je ponecháno i nastavení komunikace tzn. LPUART1.

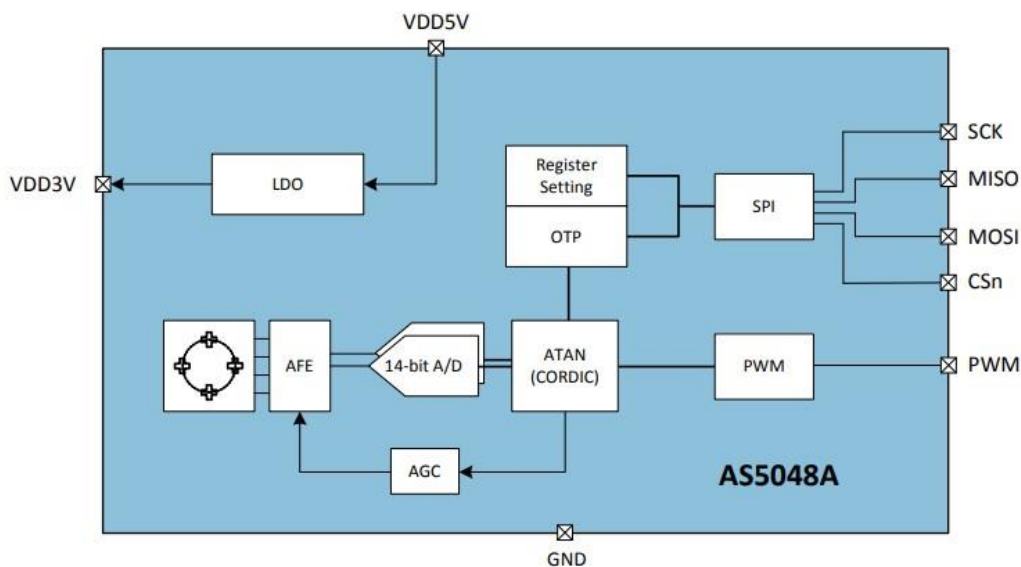
Schéma zapojení v simulinku pro měření proudu je na obrázku 6.3. Blok ADC1 dává tři signály s informací aktuálního proudu v každé fázi motoru, tyto signály jsou posunuty tak, aby při nulovém napětí byly měřené proudy taky nulové, následně se proudy převedou na napětí a přičte se k němu bias, který by měl být teoreticky $3.3/2$ V, ale skutečná hodnota je 1,5583 V. Tento bias se přičítá kvůli tomu, aby se zajistilo, že proud -1 A se rovná 0V a proud 1V se rovná 3,3V. K získání správné hodnoty proudu, musíme zjistit napětí, které je na rezistoru pro snímání proudu. Toto napětí se následně podle Ohmova zákona podělí odporem rezistoru, který snímá proud.



Obrázek 6.3 Schéma zapojení pro měření proudu

6.2 Poloha motoru

Aby byl přesně a spolehlivě řízen motor a jeho poloha, je potřeba aktivně zjišťovat polohu, ve které se motor nachází. K tomu slouží čip nesoucí označení AS5048A, který je integrovaný v motoru. Tento čip je snímač polohy sloužící pro rychlé měření absolutní polohy s SPI a PWM výstupem, druhá verze AS5048B komunikuje skrze PWM a I²C rozhraní.[11]



Obrázek 6.4 Blokové schéma senzoru polohy AS5048A [11]

Pro zjištění polohy motoru bylo využito PWM výstupu. Tento výstup poskytuje data, které se seskupují do rámce o velikosti 4119 PWM časových ticků, jak je vidět na obrázku 6.5. Tento rámec obsahuje:

- 12 PWM ticků pro inicializaci
- 4 PWM ticky pro detekci chyb
- 4095 PWM ticků pro data
- 8 PWM ticků pro exit část

Údaje o poloze jsou obsaženy v rámci pro data s 12-bitový rozlišením. Jeden PWM časovač si tedy můžeme představit jako 0.088 stupňů natočení motoru a doba periody je typicky 444ns.

Pro přesné zjištění polohy je potřeba získat v programu pouze datový rámec. To se provede tak, že se matematicky odečtou přebytečné rámce a nechá se pouze datový rámec se, kterým je možné nadále pracovat. [11]

Nejprve je potřeba zjistit periodu rámce, ta se zjistí podělením celkovým počtem ticků v periodě a clocku desky NUCLEO G474RE, který je nastaven na výchozí hodnotu 170 MHz.

$$T = \frac{tick_rámec}{CLK}, \quad (6.1)$$

Dále je potřeba znát střidu, ta se zjistí podělením počtem ticků v jednom pulzu s clockem.

$$Duty = \frac{tick_pulse}{CLK}, \quad (6.2)$$

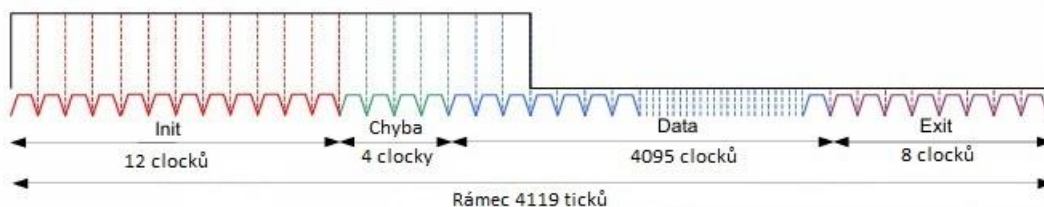
Nadále je třeba znát dobu jednoho ticku, kterých je celkově 4119.

$$Tick = \frac{T}{tick_rámec}, \quad (6.3)$$

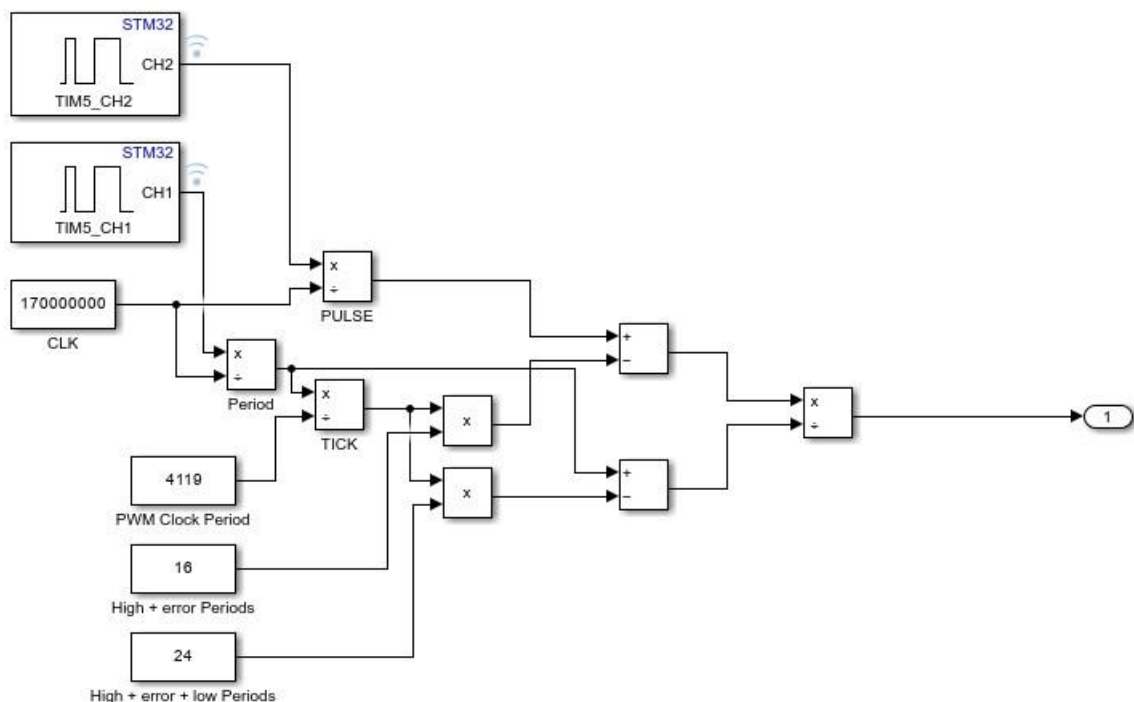
Nyní výpočtem 6.3 lze získat data jedné elektrické otáčky a tím přesnou polohu motoru.

$$X = \frac{[Duty - Tick(INIT + ERROR)]}{[T - Tick(INIT + ERROR + EXIT)]}. \quad (6.3)$$

Kde INIT = 12, ERROR = 4 a EXIT = 8.



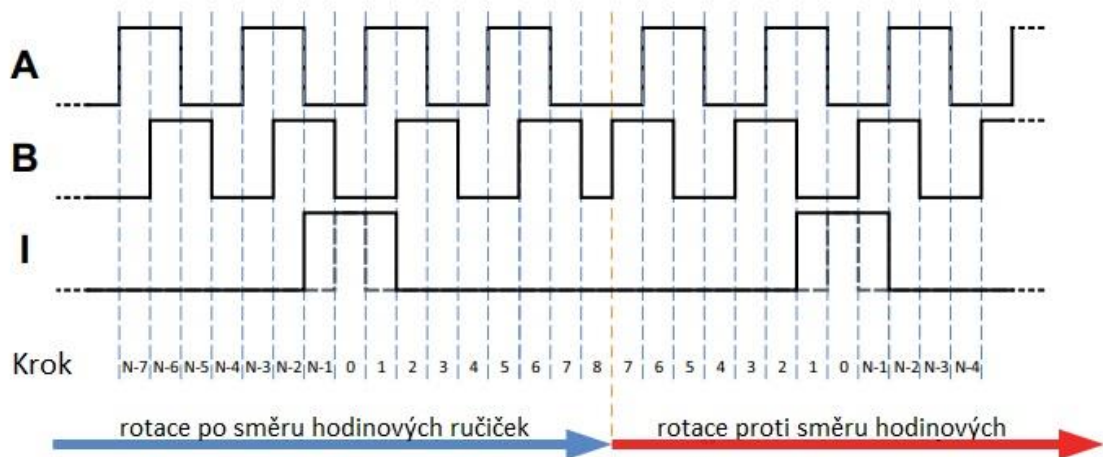
Obrázek 6.5 PWM signál [11] upraveno autorem



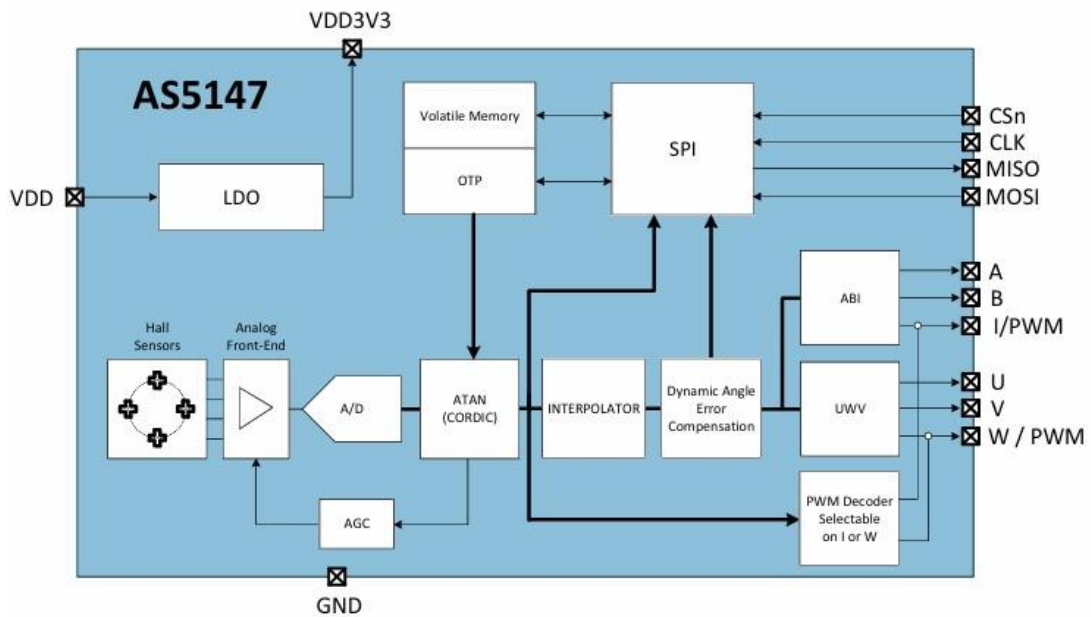
Obrázek 6.6 Schéma zapojení pro zjištění polohy motoru

6.3 Poloha ramene

Klíčovou úlohou v této bakalářské práci je stabilizace kmitů ramene. K tomu, aby šlo stabilizovat či regulovat kmity ramene je potřeba znát polohu koncového bodu ramene. Provedení je obdobné jako u zjišťování polohy motoru, pomocí čipu AS5147 (obrázek 6.8), který díky integrované Hallově sondě zjistí absolutní polohu ramene, přesněji úhel natočení magnetu, který je pevně spojen přes hřídel k rameni a umístěn zhruba 2-3 mm nad čipem. Údaje o poloze magnetu čip může dát opět více způsoby. Jako u zjišťování polohy motoru bylo využito PWM výstupu, tak zde se využije magnetického enkodéru. Magnetický enkodér má tři výstupní signály a těmi jsou signál A, signál B a signál I. A a B jsou dva signály, které jsou fázově posunuty o 90° , díky tomu lze určit směr otáčení. Pokud se rameno točí po směru hodinových ručiček signál A je ten, co vede a signál B je ten, co následuje, pokud se rameno točí proti směru hodinových ručiček tak signál A následuje signál B, který vede. Zbývající signál I udává informaci o dokončení jedné celé otáčky tzn. magnet se otočil kompletně o 360° . Výchozí hodnota rozlišení je nastavena na nejvyšší hodnotu 11 bitů což odpovídá 2048 krokům nebo 512 pulsům na jednu mechanickou otáčku. Obrázek 6.7 zobrazuje průběh signálů při rotaci po směru i proti směru hodinových ručiček [12]



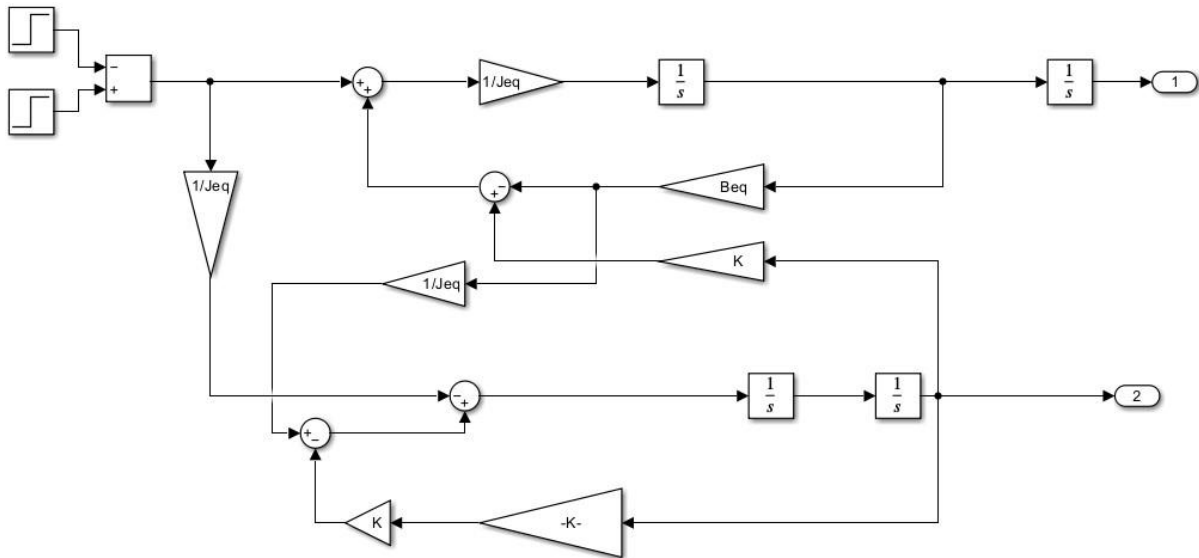
Obrázek 6.7 ABI signály [12] upraveno autorem



Obrázek 6.8 Blokové schéma snímače AS5147[12]

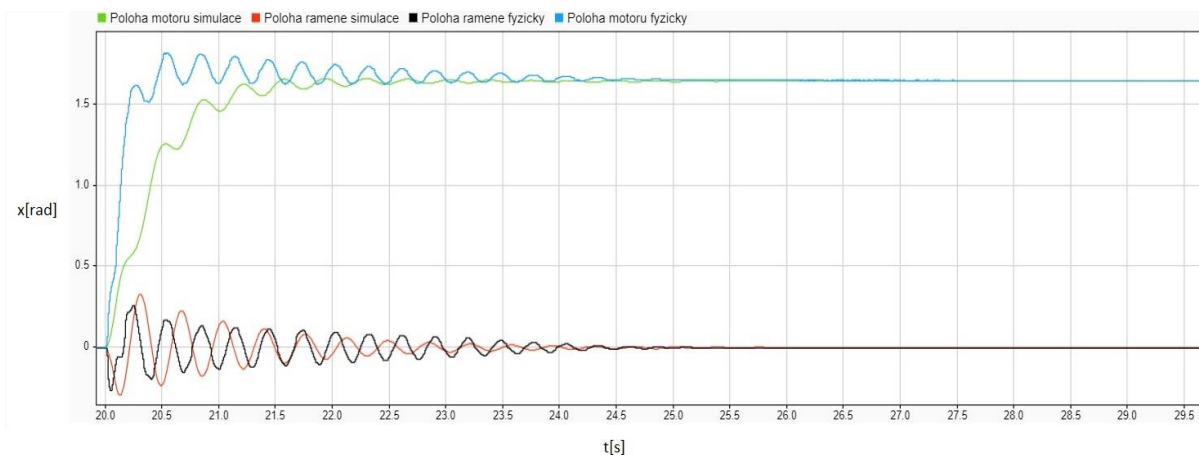
6.4 Simulace

Simulace byla provedena v prostředí Matlab/Simulink. Do Simulinku byl implementován matematický model neboli první a druhá pohybová rovnice 5.12 a 5.13. Schéma zapojení modelu je na obrázku 6.9. Vstupní hodnotou soustavy je impuls s hodnotou τ a dobou trvání 0.1 sekundy.



Obrázek 6.9 Schéma zapojení simulovaného modelu

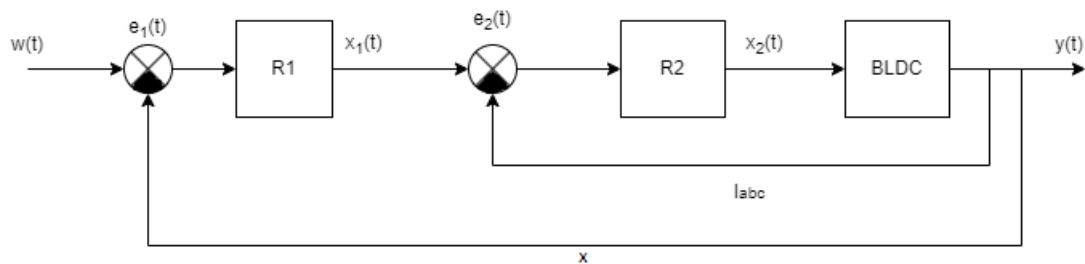
Konstanty dosazené do modelu jsou pouze orientační a přibližné, moment motoru, tření a setrvačnost nebylo možné vyčíst z datasheetu, protože datasheet nebyl k dispozici, byly známy pouze hodnoty z neověřených zdrojů. Průběhy polohy ramene a motoru simulované a fyzické soustavy jsou zobrazeny na obrázku 6.10



Obrázek 6.10 Porovnání simulace s fyzickou soustavou

6.5 Regulace

S informací o poloze motoru a koncového bodu ramene lze nyní navrhnout regulátory pro správné řízení motoru a stabilizaci kmitů ramene. V úloze bylo využito zjednodušené kaskádní regulace. Kaskádní regulaci lze uplatnit tam, kde můžeme regulovaný proces rozdělit na dvě části, jeden s rychlejší dynamikou a druhý s pomalejší. Takový proces lze regulovat i jedním regulátorem, ovšem kaskádní regulace má tu výhodu, že dokáže rychleji a kvalitněji potlačit vliv poruchy na jeden či druhý proces. Kaskádní regulace tvoří dvě smyčky, jak je vidět na ilustračním obrázku 6.11. V tomto případě vnitřní smyčka vrací ve zpětné vazbě proud a vnější smyčka vrací údaj o poloze motoru.[15]



Obrázek 6.11 Blokové schéma zjednodušené kaskádní regulace [15]

6.5.1 Proudová regulace

Pro správné fungování motoru, který je řízen vektorově je potřeba navrhnout dva proudové regulátory, jeden pro přímou složku q a druhý pro příčnou složku d . Regulátory jsou oba typu PI. Žádaná hodnota d složky je nula pro co největší točivý moment. Žádaná hodnota složky q je akční zásah z regulátoru polohy motoru. Kvůli tomu, že část proudu z q složky přeteče do d složky a část proudu z d složky do q složky, nelze na vstup d složky dát konstantu s nulovou hodnotou. Návrh regulátoru byl proveden experimentální metodou. Do složky q byla nastavena konstantní nulová hodnota a do složky d byl puštěn generátor jednotkových pulsů, pak se postupně zvyšovalo zesílení proporcionální složky, dokud nebyla regulační odchylka co nejmenší. Kvůli zašuměnému průběhu měřené d složky byla proporcionální složka nastavena na mnohem nižší hodnotu a zbytek kompenzovala složka integrační. Parametry zjištěné při d složce byly zapsány i do regulátoru pro složku q . Při pozdějším nastavování regulátoru polohy bylo zjištěno, že hodnoty zesílení na regulátoru pro složku q jsou příliš vysoké a způsobují nestabilitu systému, proto byl parametr integrační složky u regulátoru pro složku q snížen. Hodnoty zesílení jsou uvedeny v tabulce 6.2 a 6.3

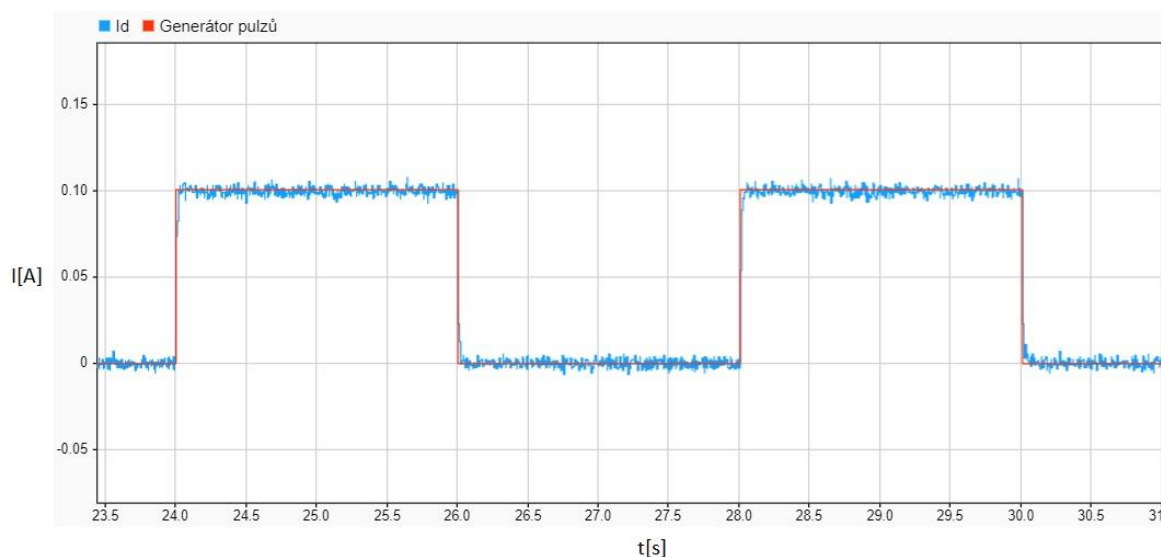
Tabulka 6.2 Parametry PI regulátoru pro d složku

Typ zesílení	Hodnota zesílení
Kp	20
Ki	400

Tabulka 6.3 Parametry PI regulátoru pro q složku

Typ zesílení	Hodnota zesílení
Kp	20
Ki	30

Na obrázku 6.13 je znázorněna odezva na jednotkový skok proudu I_d při ladění proudových regulátorů. Měřený proud téměř kopíruje žádanou hodnotu.



Obrázek 6.12 Proudová regulace – odezva na jednotkový skok

6.5.2 Regulace polohy motoru

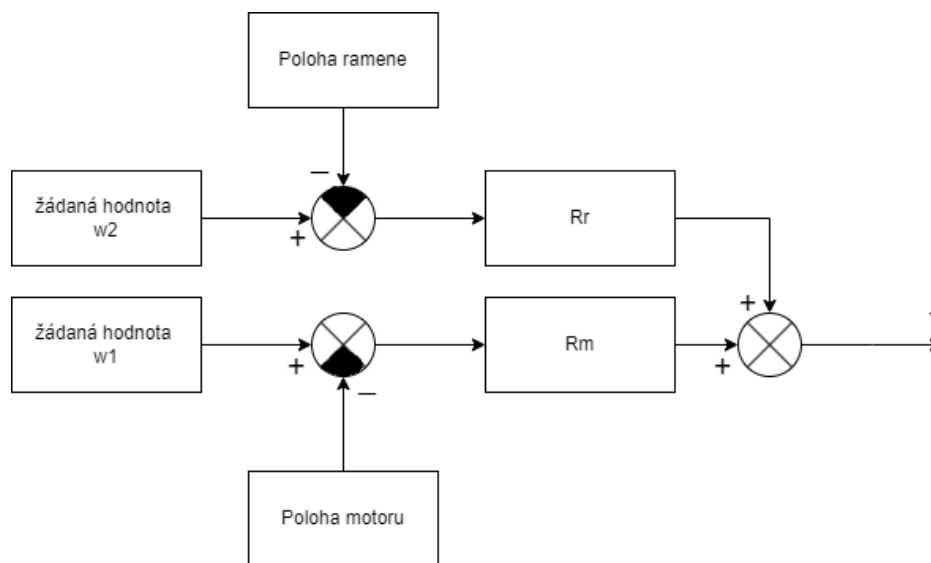
Regulace polohy motoru je vyhotovena pomocí PID regulátoru. PID neboli Proporcionálně Derivačně Integrační regulátor. Regulátor byl stejně jako u proudového regulátoru navržen experimentálně, opět byla první nastavena hodnota proporcionální složky, tak aby nedošlo k rozkmitání soustavy a regulační odchylka byla co nejmenší, následně pro rychlejší odezvu a získání nulové regulační odchylky bylo zvyšováno zesílení na integrační složce, nakonec pro zlepšení přechodného děje byla přidána i derivační složka, která je velmi malá, vyšší hodnoty zesílení způsobovaly prodloužení doby ustálení

Tabulka 6.4 Parametry PID regulátoru

Typ zesílení	Hodnota zesílení
Kp	6
Ki	2
Kd	0.001
N	1

6.5.3 Regulace polohy koncového bodu ramene

Na kmity ramene se dalo pohlížet jako na vnější poruchu systému s možností vyregulování této poruchy, nebo se mohla poloha koncového bodu ramene a motoru sečíst, respektive odečíst a pohlížet na polohu motoru a ramene jako na jeden systém. Prvně bylo zkušeno přičítání polohy ramene k poloze motoru, tento způsob vykazoval známky zlepšení kmitů ramene, ale hodnoty byly příliš malé na to, aby se dalo říct, že se jedná o stabilizaci kmitů. Poté byla vyzkoušena možnost pohlížet na kmity jako na poruchu systému. Opět byl použit PID regulátor, žádaná hodnota byla nula. Regulátor byl navržen stejně jako v předchozích případech experimentální metodou. Hodnoty zesílení jsou v tabulce 6.5

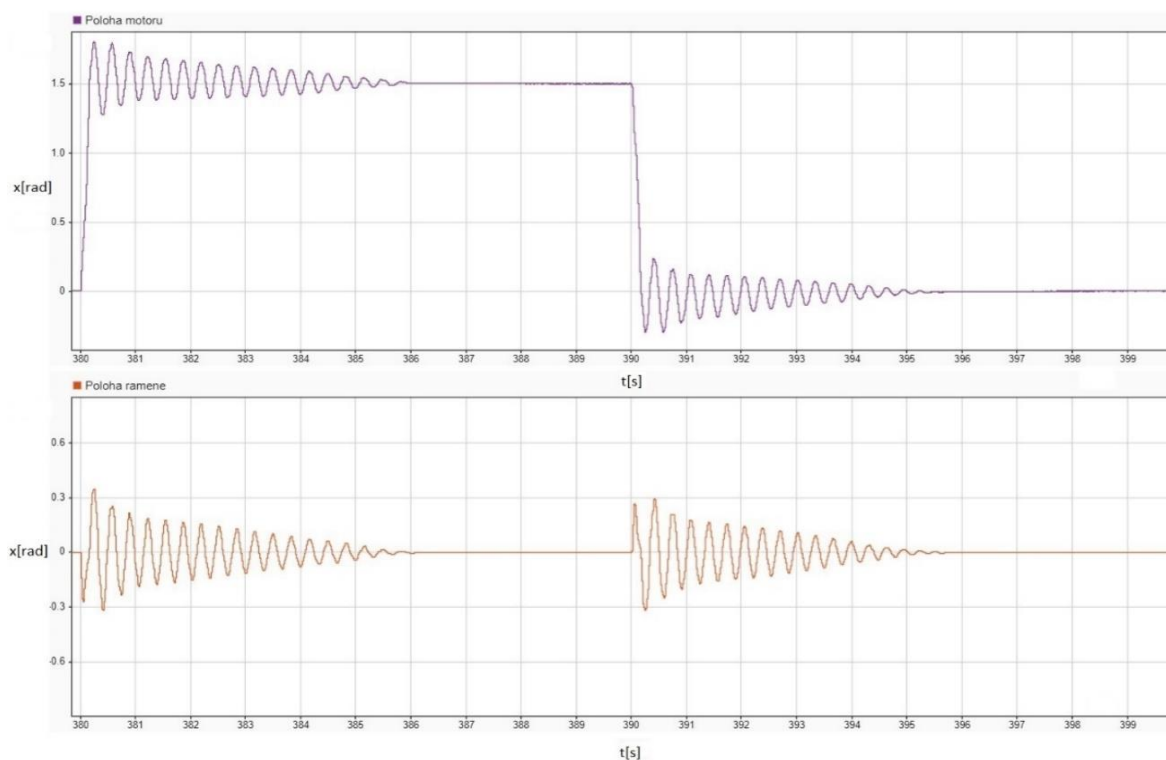


Obrázek 6.13 Zjednodušené zapojení pro kompenzaci poruchy

Tabulka 6.5 Parametry PID regulátoru

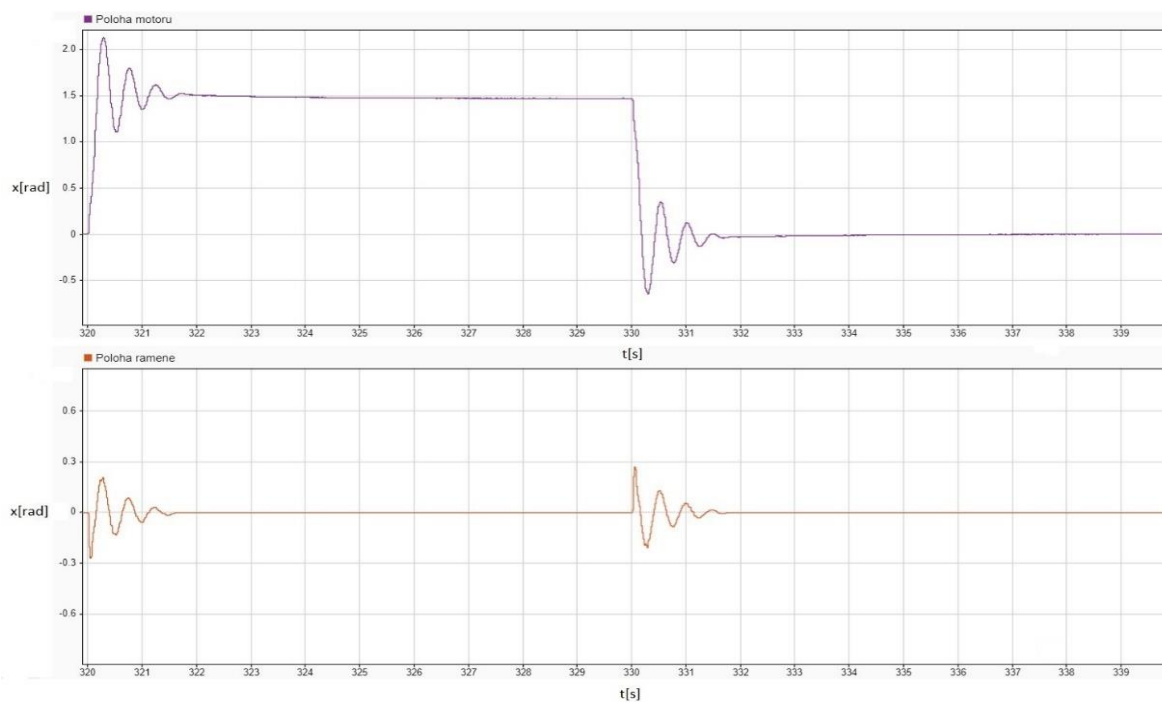
Typ zesílení	Hodnota zesílení
K_p	13
K_i	20
K_d	0.01
N	1

Na obrázku 6.14 je zobrazen průběh polohy motoru a polohy koncového bodu ramene při neřízeném stavu. Z grafu lze vyčíst, že se motor stabilizuje na žádané poloze po poměrně dlouhé době ustálení a s velkým počtem překmitů, stejný průběh je dle očekávání i pro polohu koncového bodu ramene.



Obrázek 6.14 Poloha motoru a ramene – neřízený průběh

Chování soustavy při zapnutém řízení je ukázáno na obrázku 6.15, kde je vidět zlepšení pro ustálení polohy motoru i polohy koncového bodu ramene. Doba ustálení obou poloh se ze zhruba šesti sekund snížila na přibližně dvě sekundy. Nadále jde vidět, že se překmit motoru při jeho změně polohy zvětšil asi o půl radiánu, což je způsobeno právě snahou motoru regulovat poruchu v podobě kmitů ramene.



Obrázek 6.15 Poloha motoru a ramene – řízený průběh

7. ZÁVĚR

První část práce se zabývala teoretickým rozborem, představilo se grafické rozhraní STMCubeMX pro konfiguraci STM mikrokontrolerů a jednotlivé nastavení periférií. Dále se práce věnovala výkonové desce X-Nucleo IHM07M1, konfiguraci jumper konektorů, vývojové desce Nucleo board G474RE, obecnému popisu BLDC motoru a vysvětlení vektorového řízení.

První z cílů práce bylo vytvoření matematického modelu pro přípravek rotační kmitavé soustavy a implementace modelu do prostředí Simulink ve, kterém proběhla i simulace snímání polohy koncového bodu ramene, simulace byla porovnána s fyzickou soustavou, kde se naměřené průběhy velmi podobaly těm simulovaným.

Nadále bylo potřeba sestavit fyzický přípravek z běžně dostupných dílů. Většina dílů k sestavení byla navržena v programu solidworks a následně jednotlivé díly byly tisknuty na 3D tiskárně dostupnou v knihovně VUT FEKT. S fyzickým přípravkem mohlo započít plnění dalšího bodu ze zadání tím bylo realizování řízení úhlu natočení ramene a stabilizace kmitů, které rameno díky připevněným pružinám vykazovalo. K problému se přistupovalo postupně, to znamená nejprve bylo vyzkoušeno samotné generování PWM signálu a tím točení motoru. Následně se připojil snímač otáček motoru, generování přerušení a měření proudu v každé fázi motoru. S informací o poloze a okamžité hodnoty proudu se mohlo přejít k testování řízení metodou FOC. To vyžadovalo nastavení proudových regulátorů, pro jednotlivé proudové složky d a q . Následně bylo verifikováno nastavení regulátorů roztočením motoru přivedením malé hodnoty proudu jako žádanou hodnotu q složky a nulovou hodnotu proudu jako žádanou hodnotu d složky. Dalším krokem byl návrh regulátoru polohy motoru, nutno podotknout, že regulace polohy motoru se chová jinak s připojenou horní kostkou s ramenem a bez kostky, ta svojí velikostí způsobí překmity a tím je motor náchylnější na nestabilitu. Posledním krokem bylo přivedení informace o poloze ramene a následnou regulací kmitů ramene. Ke kmitům se při návrhu přistupovalo jako ke vnější poruše systému s možností regulace, tento způsob vykazoval lepší výsledky, proto byl do práce aplikován. V regulačním schématu bylo využito kaskádní regulace.

LITERATURA

- [1] STMICROELECTRONICS. Product overview *St.com* [online]. [cit. 2022-12-25].
Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
- [2] STMICROELECTRONICS. *St.com* [online]. [cit. 2022-12-25]. Dostupné z:
<https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-G474RE/>
- [3] STMICROELECTRONICS. User manual [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2505-stm32g4-nucleo64-boards-mb1367-stmicroelectronics.pdf
- [4] STMICROELECTRONICS. Quick start guide. *St.com* [online]. [cit. 2022-12-26].
Dostupné z:
https://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/presentation/product_presentation/1f/c9/aa/41/0b/0e/47/c5/quick_start_guide_x-nucleo-ihm07m1.pdf/files/quick_start_guide_x-nucleo-ihm07m1.pdf/jcr:content/translations/en.quick_start_guide_x-nucleo-ihm07m1.pdf
- [5] STMICROELECTRONICS. User manual. *St.com* [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1943-getting-started-with-the-xnucleoihm07m1-motor-driver-expansion-board-based-on-the-l6230-for-stm32-nucleo-stmicroelectronics.pdf
- [6] Reference manual [online]. [cit. 2022-12-27]. Dostupné z:
https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/group/0/7c/b0/25/29/1b/a2/42/b2/DM00355726/files/DM00355726.pdf/jcr:content/translations/en.DM00355726.pdf
- [7] Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation: User Guide. *Www.microsemi.com* [online]. [cit. 2022-12-29].
Dostupné z: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide
- [8] QUANSER INC. *Rotary Flexible Joint Workbook*. [Online]. 2011. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/rotary-flexible-joint/>. [cit. 2024-05-04].

- [9] NIDEC CORPORATION. *1-3-2. Brushless DC Motor*. [Online]. Nidec. Dostupné z: <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00005/>. [cit. 2024-05-04].
- [10] AERIALPIXELS. Online. Aerialpixels. Dostupné z: <https://aerialpixels.com/shop/motors/brushless-gimbal-motors/iflight-rc-ipower-brushless-gimbal-motors/ipower-gbm6212h-150t-brushless-gimbal-motor/>. [cit. 2024-05-04].
- [11] AMS OSRAM. *Product document*. Online. 2018. Dostupné z: <https://look.ams-osram.com/m/287d7ad97d1ca22e/original/AS5048-DS000298.pdf>. [cit. 2024-05-04].
- [12] AMS OSRAM. *Product document*. Online. 2021. Dostupné z: <https://look.ams-osram.com/m/510307b77a8c543f/original/AS5147-DS000307.pdf>. [cit. 2024-05-04].
- [13] ABLIC. *What is a BLDC motor*. Online. Ablic. Dostupné z: <https://www.ablic.com/en/semicon/applications/bldc-motor/what-bldc-motor/>. [cit. 2024-05-04].
- [14] TECHNOMOTOR. *GBM6212H-150T gimbal motor*. Online. Dostupné z: https://www.technomotor.com/en/product_detail-36-48-83.html. [cit. 2024-05-09].
- [15] Metody zlepšení PI regulace. Online. *AUTOMA*. 2001, roč. 2001, č. 12, s. 10. Dostupné z: https://jvalter.cz/sites/default/files/soubory/metody_pi.pdf. [cit. 2024-05-15].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ADC	z angl. Analog to Digital Converter, tj. Analogově digitální převodník
BLDC	z anlg. BrushLess Direct Currnet motor, tj. Bezkartáčový stejnosměrný motor
CLK	z angl. Clock, tj. Hodinový signál
CPU	z angl. Central Processing Unit, tj. Centrální procesorová jednotka
CTS	z angl. Clear To Send, tj. Odeslání povoleno
DAC	z angl Digital to Analog Converter, tj. Digitálně analogový převodník
DC	z angl. Direct Current, tj. Stejnosměrný proud
DMA	z angl. Direct Memory Access, tj. Přímý přístup k paměti
ECC	z angl. Error Correction Code, tj. Kód opravující chyby
FDCAN	z angl. Flexible Data rate Controller Area Network, tj. Řídicí síť s flexibilní rychlostí přenosu dat
FOC	z angl. Field Oriented Control, tj. Polem orientované řízení
FPU	z angl. Floating Point Unit, tj. Pohyblivá řadová čárka
FSMC	z angl. Flexible Static Memory Controller, tj. Flexibilní řadič statické paměti
I ² C	z angl. Inter-Integrated Circuit, tj. Inter-integrovaný obvod
INIT	Inicializace
kB	Kilobajt
LPUART	z angl. Low Power Universal Asynchronous Reciever/Transmitter, tj. Nízko napěťový univerzální asynchronní přijímač-vysílač
NRZ	z angl. Non Return to Zero, tj. Bez návratu k nule
PI	Proporcionálně integrační
PID	Proporcionálně integračně derivační
PSRAM	z angl. Pseudo Static Random Access Memory, tj. Pseudostatická paměť
PWM	z angl. Pusle Width Modulation, tj. Pulsně šířková modulace
R1	Regulátor 1
R2	Regulátor 2
RCR	z angl. Repetition Counter, tj. Čítač opakování
RTS	z angl. Requested To Send, tj. Žádost odeslání
SAI	z angl. Serial Audio Interface, tj. Seriové audio rozhraní
SPI	z angl. Serial Peripheral Inreface, tj. Seriové periferní rozhraní

SRAM	z angl. Static Random Access Memory, tj. Statická paměť
TIM	z angl. Timer, tj. Časovač
UART	z angl. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, tj. Univerzální asynchronní přijímač-vysílač

Symbols:

I_α	Statorový proud α souřadnici α - β systému	(A)
I_β	Statorový proud β souřadnici α - β systému	(A)
I_d	Proud přímé složky	(A)
I_q	Proud kvadratické složky	(A)
B_{eq}	Viskózní tření motoru	(-)
V_m	Napětí motoru	(V)
B_l	Viskózní tření ramene	(-)
K_s	Tuhost pružiny	(N/m)
T	celková kinetická energie	(J)
V	celková potenciální energie	(J)
m	hmotnost	(kg)
v	rychlost	(m/s)
J_{eq}	moment setrvačnosti motoru	(kg·m ²)
J_l	moment setrvačnosti ramene	(kg·m ²)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
g	gravitační zrychlení	(m/s ²)
h	výška tělesa nad referenčním bodem	(m)
θ	úhel natočení motoru	(rad)
α	úhel natočení ramene	(rad)
x	poloha	(-)
τ	kroučící moment motoru	Nm

SEZNAM PŘÍLOH

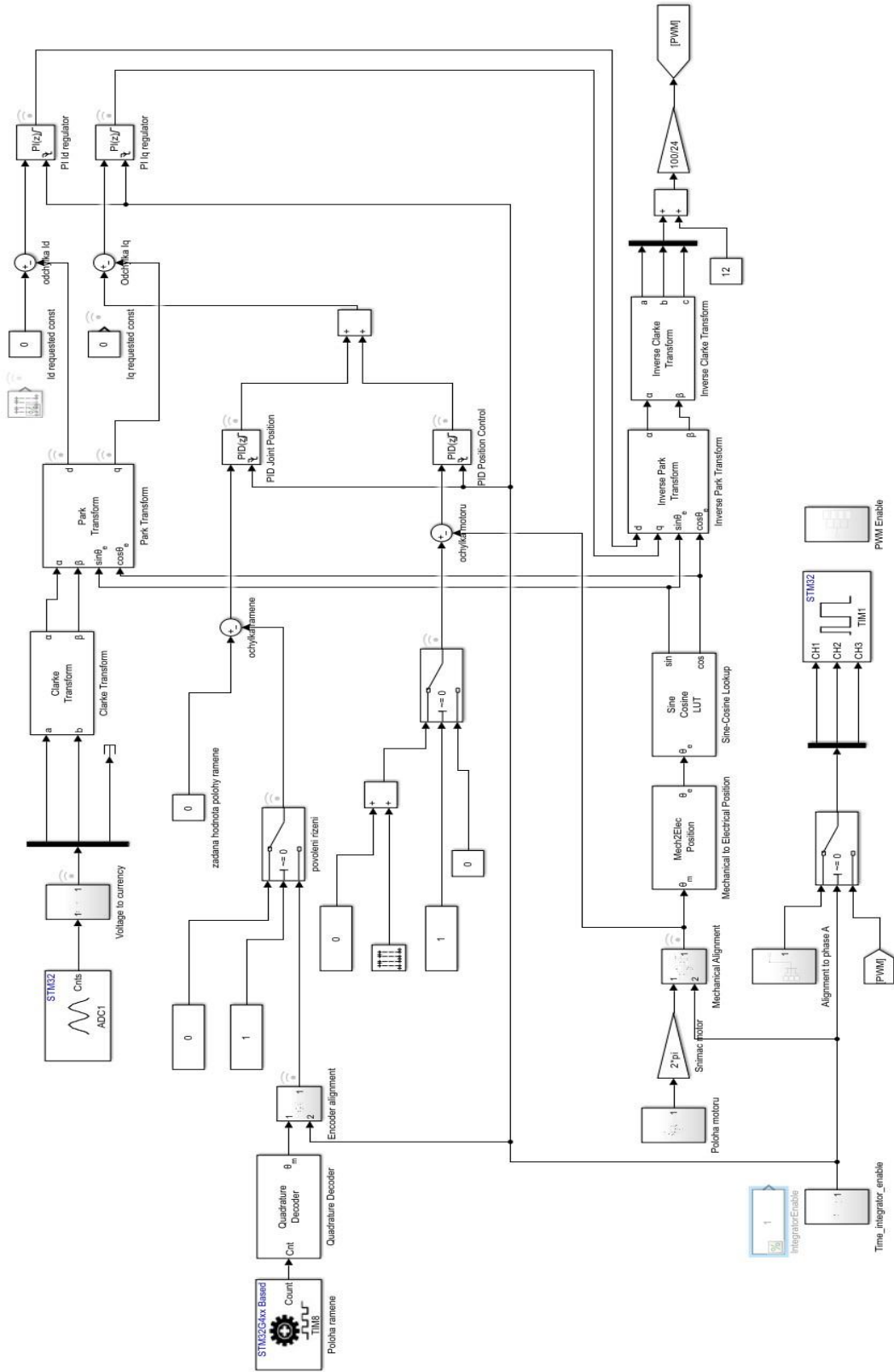
PŘÍLOHA A – SIMULAČNÍ MODEL V PROGRAMU MATLAB/SIMULINK

PŘÍLOHA B – MODEL PRO ŘÍZENÍ KMITŮ RAMENE V PROGRAMU MATLAB/SIMULINK

PŘÍLOHA C – FYZICKÝ MODEL V PROGRAMU SOLIDWORKS

Přílohy A, B a C jsou uloženy na přiloženém paměťovém médiu

PŘÍLOHA D – KOMPLETNÍ ZAPOJENÍ MODELU PRO ŘÍZENÍ KMITŮ V PROGRAMU MATLAB/SIMULINK



PŘÍLOHA E – FOTOGRAFIE FYZICKÉ SOUSTAVY

