



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

ŘÍDICÍ MODUL POHONU DVEŘÍ

DOOR CONTROL MODULE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Šrámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Jiří Šrámek

ID: 195446

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí modul pohonu dveří

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout řídicí modul pohonu dveří pro drážní aplikace.

- 1) Analyzujte původní řídicí modul, zjistěte způsob řízení, parametry motoru a snímače.
- 2) Navrhněte elektrické zapojení řídicího modulu s ohledem na parametry motoru, požadovanou komunikaci a připojené snímače.
- 3) Implementujte firmware, který zajistí komunikaci a řízení motoru.
- 4) Zhodnoťte splnění požadavků zadání a shodu s vybranými drážními normami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- 1) ČSN-EN 61508 Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností
- 2) ČSN-EN 16005 Motoricky ovládané dveře - Bezpečnost při používání - Požadavky a zkušební metody
- 3) ČSN-EN 50121 Drážní zařízení

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 18.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 a konstrukcí řídicího modulu synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM), vyvíjeného jako spolehlivou část elektroniky nástupištní stěny. Kompletní elektronika (spolehlivá, bezpečná i informační část) bude výrobkem firmy STARMON. Práce se zabývá formulací požadavků a omezení plynoucích z norem. Popisuje identifikaci parametrů samotného motoru, analýzu metody řízení použité původní elektronikou stejně i rešerši běžně používaných metod, na jejichž základě vybere optimální metody řízení pro tuto aplikaci spolu s počtem uvažovaných regulátorů. Následně pokračuje návrhem zapojení a hardware. Konec práce popisuje struktury komunikačního protokolu, vyvinutý firmware zařízení a ovládací aplikaci pro PC spolu s jejím uživatelským rozhraním.

KLÍČOVÁ SLOVA

Motorické dveře, nástupiště, PMSM, motor, identifikace PMSM, návrh hardware, řízení, embedded systém, PSD regulátor, firmware, ovládací aplikace

ABSTRACT

The thesis deals with development of the control module of a permanent magnet synchronous motor (PMSP) which is being developed as a reliable part of the platform door system. The whole electronics (including reliable, safe and information parts) will be a product of STARMON company. The paper fully describes the determination of requirements and limitations coming from the national standards involved. Furthermore, it describes the process used for the identification of PMSM parameters, the method used for controlling the PMSM by the original electronics and other generally known methods, while choosing the most optimal one for this application, including the process of designing appropriate controllers. After that, it deals with designing appropriate schematic and realization of hardware. The end of the thesis describes the structure of communication protocol, developed firmware as well as the developed PC application and its user interface.

KEYWORDS

Motor operated door, platform, PMSM, motor, PMSM identification, hardware design, control, embedded system, PSD controller, firmware, control application

ŠRÁMEK, Jiří. *Řídicí modul pohonu dveří*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 86 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Petr Fiedler, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jiří Šrámek
VUT ID autora: 195446
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Řídicí modul pohonu dveří

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu střediska elektroniky firmy STARMON, Ing. Jiřímu Holingerovi, Ing. Vladimíru Štorkovi a kolegům ze střediska elektroniky za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, vedoucímu práce doc. Petru Fiedlerovi, Ph.D. za vedení práce a Ing. Ondřeji Baštánovi za cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod	13
1 Modul dveří	14
1.1 Mechanika modulu	14
1.2 Informační část	15
1.3 Bezpečná část	15
1.4 Spolehlivá část	15
1.4.1 Napájení spolehlivé části	16
1.4.2 Komunikace spolehlivé části	17
2 Požadavky z norem	18
2.1 ČSN-EN 16005 / ČSN-EN 14752	18
2.2 EMC zkouška emise (rušivé vyzařování)	19
2.3 EMC zkouška odolnosti	20
2.3.1 Zkouška odolnosti proti působení elektrostatického výboje (ČSN EN 50121-4 ed.4)	20
2.3.2 Zkouška odolnosti proti působení vysokofrekvenčního elektro- magnetického pole (ČSN EN 50121-4 ed.4)	20
2.3.3 Zkouška odolnosti proti působení vysokofrekvenčního elektro- magnetického pole z digitálních komunikačních zařízení (ČSN EN 50121-4 ed.4)	21
2.3.4 Zkouška odolnosti proti působení skupin impulzů (ČSN EN 50121-4 ed.4)	21
2.3.5 Zkouška odolnosti proti působení rázové napěťové vlny (ČSN EN 50121-4 ed.4)	22
2.3.6 Zkouška odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli (ČSN EN 50121-4 ed.4)	22
2.3.7 Zkouška vlivu nízké teploty	23
2.3.8 Zkouška vlivu zvýšené teploty	23
3 Řešení pohonné jednotky dveří	24
3.1 Konstrukce motoru	24
3.2 Řízení PMSM	25
3.2.1 Výkonový hardware	25
3.2.2 Generování sinusového průběhu metodou SPWM	26
3.2.3 Řízení metodou FOC s SVPWM	27

4	Analýza původního modulu a identifikace	35
4.1	Analýza původní elektroniky	35
4.1.1	Identifikované parametry	35
4.1.2	Použitý princip řízení	36
4.1.3	Snímání otáček	39
4.2	Zjištění parametrů motoru	40
4.2.1	Zjištění R_s	40
4.2.2	Zjištění p_p	41
4.2.3	Zjištění L_d a L_q	41
4.2.4	Zjištění ψ_{pm}	44
4.2.5	Výpočet J	45
4.2.6	Shrnutí výsledků identifikace PMSM	45
5	Návrh a simulace regulátorů	46
5.1	Návrh proudových regulátorů	46
5.2	Návrh otáčkového regulátoru	48
5.3	Výpočet a simulace regulátorů	49
6	Návrh hardware	53
6.1	Napájecí obvody	53
6.2	Výkonové budiče motoru	55
6.3	Zpětná vazba od motoru	56
6.4	Řídicí logika	58
6.5	Komunikační linky RS-485	59
6.6	Vstupně/výstupní porty	60
6.7	Údržbářské rozhraní	61
6.7.1	Přední panel	62
6.7.2	Komunikace přes USB-C	63
6.8	Hlídání izolačního stavu	64
6.9	Návrh desky plošných spojů	65
7	Firmware a software	67
7.1	Komunikační protokol	67
7.1.1	Paket povelu OCcpu \rightarrow NASD_SC (P0_RS485)	67
7.1.2	Paket odpovědi NASD_SC \rightarrow OCcpu (C0_RS485)	70
7.2	Firmware hlavního MCU	72
7.2.1	Řízení pohonu a jeho moduly	73
7.2.2	Stavový automat a logika dveří	75
7.2.3	Komunikace a diagnostika	76
7.3	Firmware MCU předního panelu	77

7.4	Aplikace pro PC	77
7.4.1	Grafické rozhraní	77
7.4.2	Architektura aplikace	79
	Závěr	81
	Literatura	83
	A Obsah elektronické přílohy	86

Seznam obrázků

1.1	Nákres modulu dveří	14
1.2	System napájení modulu dveří	16
1.3	Komunikační architektura spolehlivé vrstvy	17
2.1	Průběh dovolené síly působící na překážku (volně převzato z normy) .	19
3.1	Běžná konstrukce PMSM [2]	24
3.2	Typické zapojení 3fázového můstku pro řízení 3fázového motoru – modifikováno z [4]	26
3.3	Rozpad sinusového signálu na PWM dvou tranzistorů jedné fáze . . .	27
3.4	Blokové schéma řízení pomocí SVPWM [10]	28
3.5	Princip Clarkovy transformace – volně převzato z [14]	29
3.6	Princip Parkovy transformace, volně převzato z [14]	30
3.7	Vektorový prostor SVPWM [10]	31
3.8	Rozklad libovolného vektoru na působení vektory SVPWM [10] . . .	31
3.9	Časový průběh působení vektory SVPWM na výstupy (vektor mezi V_4 a V_6) [10]	32
3.10	Kompletní hexagon SVPWM spolu s průběhy výstupů [10]	32
3.11	Možnosti měření proudu motorem [17]	33
3.12	Průběh proudu při použití jednoho snímacího rezistoru [17]	34
4.1	Původní elektronika pro řízení pohonu dveří	35
4.2	Principiální zapojení obvodu pro analýzu buzení	37
4.3	Průběhy buzení vinutí původní elektronikou	38
4.4	Detail buzení původní elektronikou	38
4.5	Průběh napětí na výstupech enkodéru při změně natočení	39
4.6	Princip změny reluktance při natočení rotoru [11]	41
4.7	Principiální schéma pro měření indukčností v D a Q ose [11]	42
4.8	Odezva proudu na jednotkový skok napětí (měření v D ose)	43
4.9	Odezva proudu na jednotkový skok napětí (měření v Q ose)	44
5.1	Schéma regulační smyčky proudu	47
5.2	Schéma regulační smyčky otáček	48
5.3	Zapojení regulačního schématu v programu Matlab/Simulink	49
5.4	Odezva na jednotkový skok úhlové rychlosti	51
5.5	Průběhy proudů při jednotkovém skoku úhlové rychlosti	52
6.1	Blokový diagram HW	53
6.2	Zapojení vstupních filtrů napájení	54
6.3	Zapojení zdrojové části	54
6.4	Filtrační kondenzátory (průchodkové a běžné)	55
6.5	Schéma bloku výkonového buzení motoru	56

6.6	Vstupní obvody pro připojení enkodéru	57
6.7	Schéma zapojení měřicích obvodů proudu	57
6.8	Blokové schéma HRTIM [19]	58
6.9	Zapojení hlavního mikrokontroléru	59
6.10	Modulek RS-485 s izolací 4kV	60
6.11	Zapojení komunikačních modulů linek RS-485	60
6.12	Analogové vstupy desky	61
6.13	Galvanické oddělení výstupů	61
6.14	Zapojení pomocného MCU (přední panel)	62
6.15	Zapojení komunikačního rozhraní USB-C	63
6.16	Zapojení izolovaného zdroje 48V	64
6.17	Zapojení hlídače izolačního stavu	64
6.18	Render DPS – horní strana	65
6.19	Render DPS - spodní strana	66
7.1	Komunikace OCcpu - NASD_SC	67
7.2	Hlavní MCU - blokové schéma programu	73
7.3	Zjednodušený nákres stavového automatu dveří	75
7.4	PC aplikace - záložka 'Info a ovládání'	78
7.5	PC aplikace - záložka 'Nastavení'	79
7.6	PC aplikace - architektura	80

Seznam tabulek

2.1	Přehled aplikovaných typových zkoušek EMC emise	20
4.1	Znamé parametry původní elektroniky	36
4.2	Přehled identifikovaných parametrů motoru	45
5.1	Výsledné koeficienty regulátorů	50
6.1	Výběr boot módů MCU – volně převzato z [19]	63
7.1	Paket P0_GENERAL	68
7.2	Paket P0_SET_STATE	68
7.3	Paket P0_SET_PARAMS	69
7.4	Paket P0_SET_LEDS	69
7.5	Paket C0_GENERAL	71
7.6	Paket C0_GET_PARAMS	71

Úvod

Cílem práce je navrhnout řídicí modul pohonu dveří, které budou sloužit jako nástupištní stěna. Celý modul dveří se skládá z mnoha částí, ať už mechanických, nebo elektrických. V rámci této práce bude navržena a implementována spolehlivá (nikoliv bezpečná) část zmíněného zařízení, jejíž hlavní funkcí je řízení samotného pohonu dveří s ohledem na splnění norem platných v elektrotechnickém návrhu obecně, v oblasti železnice a v oblasti motoricky ovládaných dveří. Elektronika bude nahrazovat původní uvažovanou verzi s nevyhovujícím rozhraním a chováním. Po představení celého systému bude provedena rešerše platných norem, majících vliv na následnou specifikaci požadavků a jejich specifikace. Zejména se jedná o normy elektromagnetické kompatibility, funkční bezpečnosti a specializované normy používané v prostředí železnice případně motoricky ovládaných dveří na železnici.

Následně se práce věnuje pohonné jednotce dveří. Popisuje konstrukci synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM) a rozebere možné způsoby řízení s ohledem na požadavky dané zadáním firmy. Zmiňují se standardní metody jako Sine-PWM (SPWM), Space Vector PWM (SVPWM) a nadstavba Field Oriented Control (FOC) spolu s používanými matematickými aparáty.

Poté v praktické části následuje analýza původní řídicí jednotky spolu se zjištěním původně používané řídicí metody. Jsou identifikovány elektrické parametry motoru, které je potřeba zohlednit při návrhu hardware řídicího modulu a spočteny ostatní konstanty, potřebné při v následující kapitole při návrhu regulátorů a simulaci. Je zvolena vhodná metoda pro výpočet regulátorů, ty jsou odvozeny a jejich odezvy následně zhodnoceny v simulačním prostředí.

Dále je popsán návrh samotného hardware s ohledem na požadavky z předchozích kapitol, včetně norem, elektrických parametrů PMSM a očekávaného způsobu řízení. Detailně jsou popsány jednotlivé bloky schématu a konečně výsledná realizace desky plošných spojů.

Softwarovému vybavení je věnována poslední kapitola. Na základě požadavků firmy je navržen odpovídající komunikační protokol kompatibilní s firemním řešením. Detailně jsou popsány obsahy jednotlivých paketů a jejich použití. Při znalosti protokolu práce pokračuje architekturou firmware, stavovým automatem implementující logiku dveří a nakonec i návrhem PC aplikace umožňující parametrizaci a ovládání modulu.

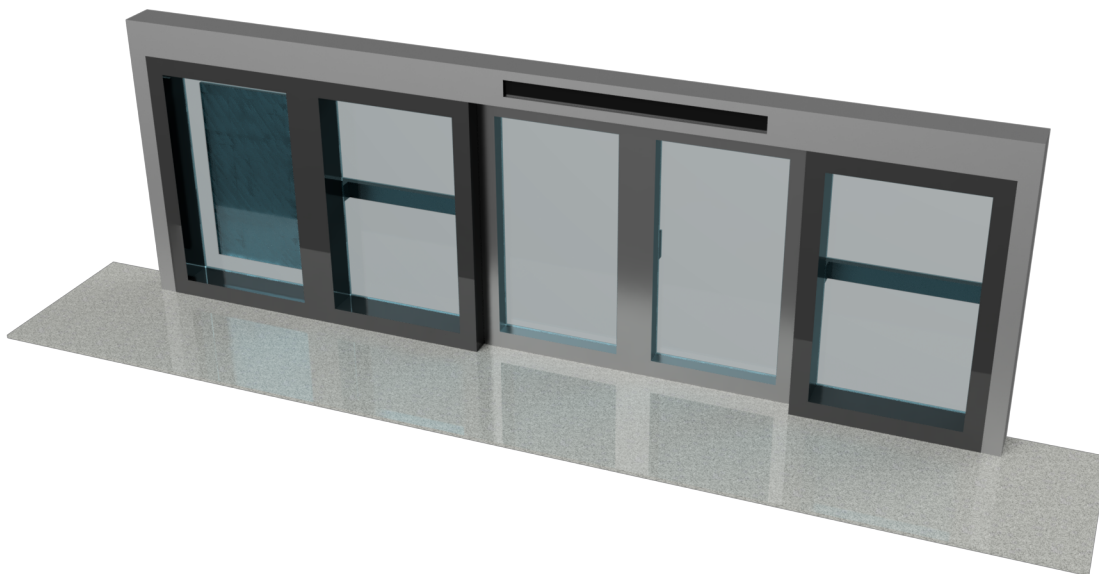
1 Modul dveří

Modul dveří je po hardwarové stránce vyvíjen spolupracující společností. Koncept celého řešení je plně modulární, kdy jeden modul dveří obsluhuje jedny dveře vagonu. Celé zařízení bude umístěno na hraně nástupiště ukotvením do podlahy. Mezi jednotlivými moduly se propojí napájecí vstupy a komunikační linky. Elektronika se skládá z několika hlavních částí:

1. Informační část
2. Bezpečná část
3. Spolehlivá část

1.1 Mechanika modulu

Základem jednoho modulu jsou dvoukřídlové dveře o vysoké hmotnosti ($m = 2 \times 90$ kg), způsobené požadavkem na použitá skla a posléze rámy. Tuto skutečnost bude nutné dále zohlednit ve způsobu řízení. Dále bude ve dveřích instalován také osvětlovací systém, ve formě LED pásku. Vždy jedna ze stran vedle posuvných dveří slouží jako místo pro informační panel s displejem (viz model na obrázku 1.1).



Obr. 1.1: Nákres modulu dveří

Pro potřeby této práce zajímavou částí je nadpraží. Kromě malého LED displeje totiž obsahuje mechaniku pojezdu dveří, realizovanou řemenem pohánějící zavěšení na ližinách, elektromagnetický zámek, zabezpečující fixování dveřních křídel v zavřené poloze a v neposlední řadě také motor pro pohon celé mechaniky. Zde bude

také umístěna veškerá elektronika, a to jak bezpečné a informační, tak i spolehlivé části.

1.2 Informační část

Informační část je tvořena zobrazovacími panely, počítači a snímači pro počítání cestujících. Počítače jsou z důvodu spolehlivosti v provedení s pasivním chlazením a instalací na DIN lištu. Mezi jednotlivými moduly dveří probíhá komunikace v rámci informační části po dedikované síti Ethernet, kdy každý modul obsahuje switch. Díky tomu je možné jednoduché propojení zobrazovacích počítačů a jejich vzájemná komunikace.

V prostoru bezprostředně nade dveřmi bude umístěn zobrazovací panel typu LED pro informování o času následujícího odjezdu. Větší obrazovka typu IPS, umístěná v prostoru mezi dveřmi tak, aby s ohledem na stojící soupravu vycházela do prostoru spráhel a nebránila výhledu cestujících, bude sloužit pro reklamní účely. Dále budou nad průchodem instalována čidla systému APC, realizující počítání cestujících pro provozně-ekonomické účely. Z hlediska této práce není tato část považována za relevantní a dále nebude podrobně rozebírána.

1.3 Bezpečná část

V rámci bezpečné části zde bude vyvinuta specializovaná jednotka distribuovaného systému s vnitřní architekturou „2 ze 2“, vykonávající bezpečné funkce. Bude proto mít na starosti, mimo jiné, ovládání elektromagnetického zámku pro zajištění dveří v zavřené poloze a tím eliminaci možného nebezpečí, způsobeného vstupem osob do kolejíště v případě nebezpečné poruchy spolehlivé části. Vývoj této části není předmětem práce.

1.4 Spolehlivá část

Jedná se o hlavní část, která je cílem této práce. Jednotka spolehlivé části zajišťuje algoritmy pro regulaci a parametrizaci pohonu, ovládání světel a obsahuje dvě komunikační linky typu RS-485 a související komunikační logiku. Pro účely prvotního ladění, nastavení a následných zásahů udržujících pracovníků bude k dispozici také rozhraní ve formě virtuální sériové linky s USB-C a pro jednodušší úpravy parametrů a indikaci také malý displej s tlačítky.

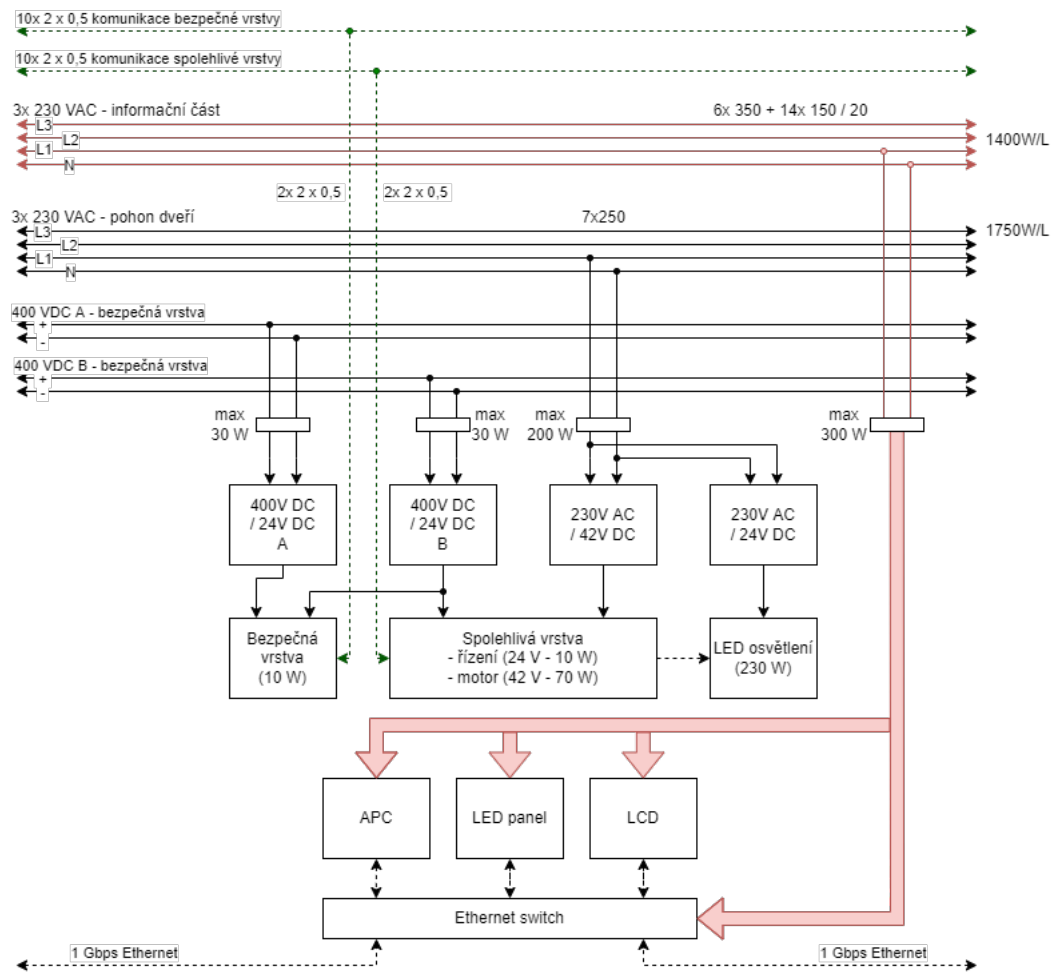
Na návrh jsou kladeny vyšší nároky, je nutné použít odolnější hardware a robustnější software pro zajištění spolehlivosti v kritické infrastruktuře.

1.4.1 Napájení spolehlivé části

Pro splnění výše zmíněných cílů je zařízení rozděleno do třech sub-částí, dle použitého napájení:

1. Logická část
2. Motorová část
3. Výstupová část

Systém napájení je ilustrován obrázkem 1.2.



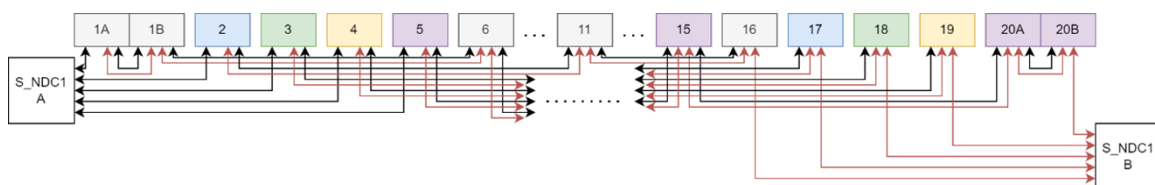
Obr. 1.2: Systém napájení modulu dveří

Logická část spolehlivé vrstvy využije napájení vrstvy bezpečné, za podmínky využití nadproudových ochran. Motorová část je napájena z vlastního 42 V zdroje, který je připojen na síťové napětí. Stejným způsobem se z důvodu separátního jištění a velikosti odebíraného proudu řeší i výstupová část. Rozdílem je pouze použití zdroje 24 V. Tyto výstupy jsou dimenzovány pro spínání LED pásků osvětlovacího

a indikačního systému, stejně jako připraveny pro případné budoucí rozšíření platformy.

1.4.2 Komunikace spolehlivé části

Výše byla zmíněna přítomnost dvou sériových linek v každém modulu spolehlivé části. Cílem tohoto řešení je navýšení maximálního dosahu komunikační linky typu RS-485 zřetěžením jednotlivých modulů za sebou pomocí opakování zpráv. Tím dojde k obnovení úrovně signálu a zvýší se tak spolehlivost komunikace a odolnost vůči rušení. Z důvodu spolehlivosti celého systému při poruše komunikace budou takto propojeny vždy každé páté dveře. Díky tomuto opatření by při poruše jednoho modulu nedošlo k vyřazení z funkce celého řetězce dveří, ale pouze jedné pětiny (jedny dveře u každého vagonu). I to by však bylo nepřijatelné. Proto je umožněno posílání povelu do řetězců modulů z obou stran, za pomoci dvou koncentrátorů dat (NDC). Na každé straně nástupiště je umístěno jedno NDC (NDC1_A a NDC1_B), které disponuje 5 linkami RS-485 a dvěma porty pro SFP šuplíky. Linky RS-485 jsou vedeny do modulů dveří, zatímco pomocí optické kruhové sítě vytvořené přes SFP moduly jsou koncentrátory spojeny s nadřazeným systémem SIRIUS. Díky těmto opatřením nedojde při poruše jednoho modulu k odstavení žádného dalšího, ale zbytek systému pracuje bez narušení dále. Graficky toto zapojení vysvětluje diagram na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Komunikační architektura spolehlivé vrstvy

2 Požadavky z norem

Tato kapitola a podkapitoly čerpají z norem ČSN uvedených níže. Na základě požadavků zadávající firmy a doporučené literatury vznikl seznam doporučených norem:

1. ČSN-EN 61508 (Funkční bezpečnost el. systémů souvisejících s bezpečností)
2. ČSN-EN 16005 (Motoricky ovládané dveře)
3. ČSN-EN 50121 (Dražní zařízení)
4. ČSN-EN 50128 (Software pro drážní zabezpečovací zařízení)

V rámci rešerše bylo však zjištěno, že norma ČSN-EN 61508 se nevztahuje přímo na modul vyvíjený v rámci této práce (spolehlivou část), nýbrž zejména na bezpečnou část celého zařízení, případně celkové mechanické šasi modulu dveří. V následujících podkapitolách budou podrobně popsány příspěvky jednotlivých norem. Naopak byla dodána norma ČSN-EN 61000, popisující požadavky pro EMC (elektromagnetickou kompatibilitu).

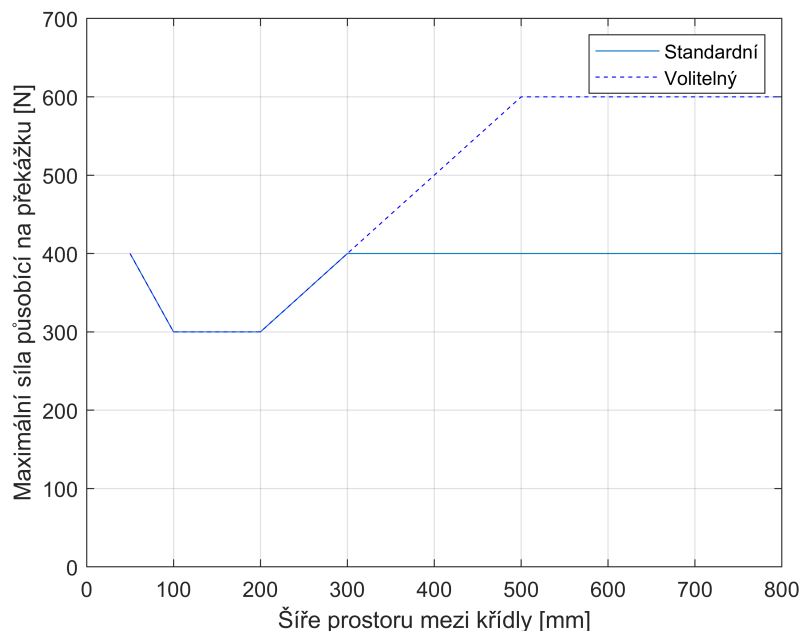
2.1 ČSN-EN 16005 / ČSN-EN 14752

Norma ČSN-EN 16005 stanovuje požadavky obecně na všechny typy motoricky ovládaných dveří, ať už jde o turniketové, posuvné nebo kývavé. Nevztahuje se však na nástupištní dveře. Na základě požadavků zákazníka byla proto využita norma ČSN-EN 14752, která popisuje požadavky na tzv. boční vstupní systémy kolejových vozidel (neboli dveře). Tyto požadavky tak budou promítnuty také na nástupištní dveře.

Norma udává požadavky pro zajištění bezpečného nástupu a výstupu z kolejového vozidla, a to i pro osoby s omezenou pohyblivostí. Mimo to stanovuje zřejmé bezpečnostní požadavky, jako například požadavek na zablokování dveří v zavřeném stavu při jízdě kolejového vozidla. Z tohoto důvodu vyplývá také nutnost plnění normy pro software pro železniční zabezpečovací systémy ČSN-EN 50128 bezpečnou částí. Dále stanovuje také mechanické požadavky na dveře, respektive na velikost průchodu a velikost mezery mezi nástupištěm a platformou vozu. Tyto požadavky však nejsou pro návrh elektroniky, zejména spolehlivé části relevantní a již byly zpracovány konstruktéry mechaniky.

Norma také udává požadavky na audiovizuální indikaci otevírání a zavírání dveří. Při automatickém otevírání nebo zavírání stanovuje požadavek na akustický signál znějící od začátku sekvence po dobu minimálně 5 s, a to buďto trvalým nebo přerušovaným tónem o kmitočtech 2200 a 1760 Hz s tolerancí 50 Hz a střídou maximálně 2 pulzy za sekundu. Vizuální výstraha je aktivována alespoň 2 s před začátkem zavírání dveří; při otevírání musí svítit po celou dobu otevírací sekvence. Požadavek na akustickou výstrahu řeší přímo dveře soupravy. Nejdůležitějším parametrem

pro bez sensorové dveře je maximální přípustná působící síla na překážku. Tyto síly udává také norma, a to v závislosti na stupni otevření, respektive zbývajícím volném prostoru. Průběh této síly (viz obrázek 2.1) musí být regulován řídicí elektronikou.



Obr. 2.1: Průběh dovolené síly působící na překážku (volně převzato z normy)

Průběhy jsou povolené dva různé – standardní a volitelný. Úroveň síly specifikuje provozovatel. Po detekci překážky může pak tato síla působit maximálně po dobu 1 s, pak musí dojít buďto k plnému nebo částečnému otevření (mezera mezi hranami alespoň 10 cm) nebo musí být uvolněny pro volný ruční pohyb.

2.2 EMC zkouška emise (rušivé vyzařování)

Základní normou je ČSN EN 50121-4 ed.4, která v článku 5 stanovuje v příslušných tabulkách meze a úrovně nebo se odkazuje na základní normu ČSN EN IEC 61000-6-4 ed.3. Tyto normy popisují požadavky na zařízení, které musí splňovat s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Cílem je minimalizovat pravděpodobnost a úrovně rušivého vyzařování, které by mohlo způsobovat ovlivnění okolních přístrojů, případně být až zdraví nebezpečné.

Zkouška spočívá v měření rušivého vyzařování dle norem a odpovídajících tabulek uvedených v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Přehled aplikovaných typových zkoušek EMC emise

Název zkoušky EMC emise	Článek	Dokument (norma)
Emise – Vstup/výstup krytem (30-230MHz, 230-1000MHz)	9, Tab3, bod3.1	ČSN EN 61000-6-4 ed.3
Emise – Vstup/výstup krytem (1GHz – 3GHz,3GHz – 6GHz)	9, Tab3, bod3.4	ČSN EN 61000-6-4 ed.3
Emise – Vstup/výstup DC napájením (0,15-0,5MHz, 0,5-30MHz)	5, Tab1, bod1.1	ČSN EN 50121-4 ed.4
Emise – galvanický síťový port (0,15-0,5MHz, 0,5-30MHz)	7, Tab5, bod5.1	ČSN EN 61000-6-4 ed.3

Zkušební kritérium: Maximální dovolené emise dle ČSN EN 50121-4 ed.4 a ČSN EN 61000-6-4 ed.3.

2.3 EMC zkouška odolnosti

Jedná se o zkoušky odolnosti, sloužící k ověření funkce zařízení v různě extrémních prostředích. Norma ČSN EN 50121-4 ed.4 stanovuje meze, úrovně v jednotlivých tabulkách, případně se odkazuje na základní normy.

2.3.1 Zkouška odolnosti proti působení elektrostatického výboje (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Požadavky zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 2 / řádek 2.4
(kontaktní výboj +/-6kV, vzduchový výboj +/-8kV)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-2 ed.2

Zkouší se na panelech: šasi dveřního modulu

Funkční kritérium: A

2.3.2 Zkouška odolnosti proti působení vysokofrekvenčního elektromagnetického pole (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 2 / řádek 2.1

Kmitočet 80 – 800MHz

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-3 ed.3

Funkční kritérium: A

2.3.3 Zkouška odolnosti proti působení vysokofrekvenčního elektromagnetického pole z digitálních komunikačních zařízení (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 2 / řádek 2.2

kmitočty 800 – 1000MHz, 1400 – 2000MHz, 2000 – 2700MHz, 5100 – 6000MHz

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-3 ed.3

Funkční kritérium: A

2.3.4 Zkouška odolnosti proti působení skupin impulzů (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Vstup/výstup DC napájení 400V

Zkouška se provádí na svorkách +400V DC, -400V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.2

(+/- 2kV vrcholová hodnota, 5/50ns, 5kHz, přímé injektování)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-4 ed.3

Funkční kritérium: A

Vstup/výstup DC napájení 24V DC

Zkouška se provádí na svorkách +24V DC, -24V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.2

(+/- 2kV vrcholová hodnota, 5/50ns, 5kHz, přímé injektování)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-4 ed.3

Funkční kritérium: A

Komunikační rozhraní RS-485

Zkouška se provádí na kabelu RS-485

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 3 / řádek 3.2

(+/- 2kV vrcholová hodnota, 5/50ns, 5kHz, kapacitní vazba)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-4 ed.3

Funkční kritérium: A

2.3.5 Zkouška odolnosti proti působení rázové napěťové vlny (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Vstup/výstup DC napájení 400V

Zkouška se provádí na svorkách +400V DC, -400V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.3

(+/- 2kV vrcholová hodnota, nesymetricky, 1,2/50us),

(+/- 1kV vrcholová hodnota, symetricky, 1,2/50us)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-5 ed.3

Funkční kritérium: A

Vstup/výstup DC napájení 24V DC

Zkouška se provádí na svorkách +24V DC, -24V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.3

(+/- 2kV vrcholová hodnota, nesymetricky, 1,2/50us),

(+/- 1kV vrcholová hodnota, symetricky, 1,2/50us)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-5 ed.3

Funkční kritérium: A

Komunikační vedení RS-485

Zkouška se provádí na kabelu RS-485

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 3 / řádek 3.3

(+/- 2kV vrcholová hodnota, nesymetricky, 1,2/50us)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-5 ed.3

Funkční kritérium: A

2.3.6 Zkouška odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli (ČSN EN 50121-4 ed.4)

Vstup/výstup DC napájení 400V DC

Zkouška se provádí na svorkách +400V DC, -400V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.1.

(0.15-80Mhz, 10Vef nemodulovaná hodnota, 80% AM modulace 1kHz, Rzdroje=150 Ohm)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-6 ed.4

Funkční kritérium: A

Vstup/výstup DC napájení 24V DC

Zkouška se provádí na svorkách +24V DC, -24V DC.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 4 / řádek 4.1.

(0.15-80Mhz, 10Vef nemodulovaná hodnota, 80% AM modulace 1kHz, Rzdroje=150 Ohm)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-6 ed.4

Funkční kritérium: A

Komunikační vedení RS-485

Zkouška se provádí na kabelu RS-485.

Specifikace zkoušky: ČSN EN 50121-4 ed.4, tabulka 3 / řádek 3.1.

(0.15-80Mhz, 10Vef nemodulovaná hodnota, 80% AM modulace 1kHz, Rzdroje=150 Ohm)

Zkušební metoda: ČSN EN 61000-4-6 ed.4

Funkční kritérium: A

2.3.7 Zkouška vlivu nízké teploty

Provádí se zkouška podle ČSN EN 60068-2-1 + Ae při teplotě $-45\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. Doba expozice 16 hodin. Při zkoušce se prověřuje funkčnost. Zkouší se bloky B, C, E, G.

Funkční kritérium: A

2.3.8 Zkouška vlivu zvýšené teploty

Provádí se zkouška podle ČSN EN 60068-2-2 + Be při teplotě $+70\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Doba expozice 16 hodin. Při zkoušce se prověřuje funkčnost. Zkouší se bloky B, C, E, G.

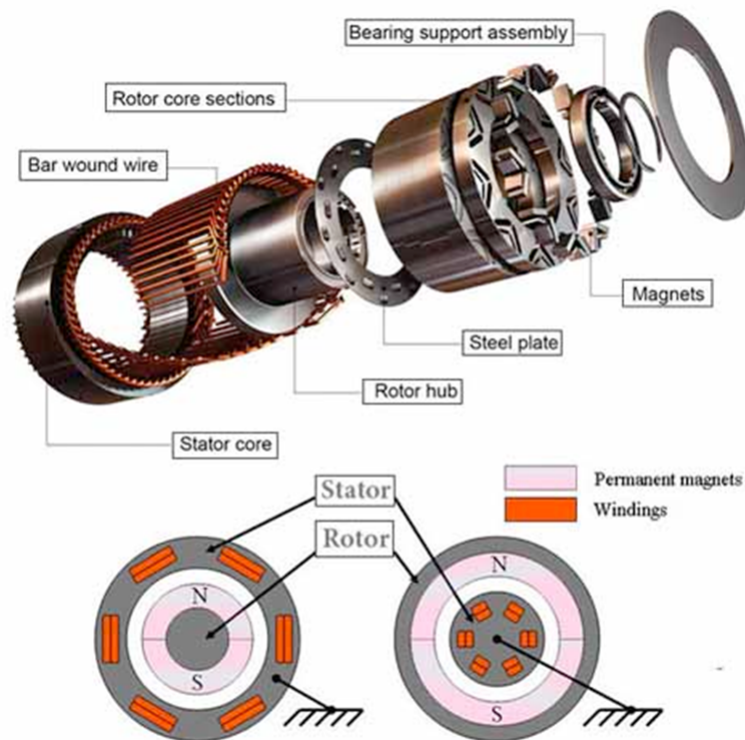
Funkční kritérium: A

3 Řešení pohonné jednotky dveří

V této kapitole je nejprve rozebrán samotný typ motoru a jeho konstrukce. Následně se věnuje teorii ohledně možných způsobů jeho řízení spolu s výhodami a nevýhodami plynoucích z těchto metod.

3.1 Konstrukce motoru

Tato kapitola čerpá z informací dostupných z [1]. Hlavním prvkem zařízení je 3fázový synchronní motor s permanentními magnety (dále PMSM). Tento typ motoru se běžně používá tam, kde postačují motory o nižších výkonech, řádově do desítek wattů. Výhodou je primárně jejich velikost a možnost funkce bez externího buzení. Motory s budičím vinutím slouží naopak v aplikacích náročných na výkon, v řádu kilowattů a výše. Typická konstrukce synchronního motoru s permanentními magnety je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Běžná konstrukce PMSM [2]

Existují dvě základní možné varianty konstrukce – buďto může být permanentními magnety tvořen stator (a rotor je pak vinutý), nebo vytvářejí rotor motoru

(a vinutí obsahuje stator). Druhá zmíněná možnost je preferovaná, jelikož odpadá nutnost vyvedení vinutí z otáčející se části stroje například přes kontaktní kroužky na hřídeli, čímž také odpadá možné problematické místo vzhledem k postupnému opotřebení. Dále v rámci této práce budeme uvažovat již pouze tento typ.

Vinutí je uspořádáno tak, že tvoří tři navzájem prokládané cívky. Aplikováním 3fázového sinusového napětí se vzájemným fázovým posunem o 120° se vytvoří točící se magnetické pole, které při správném řízení uvede do pohybu rotor. Otáčky motoru pak odpovídají frekvenci otáčení magnetického pole, respektive frekvenci sinusového napájení (proto synchronní stroj), viz následující vztah:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (3.1)$$

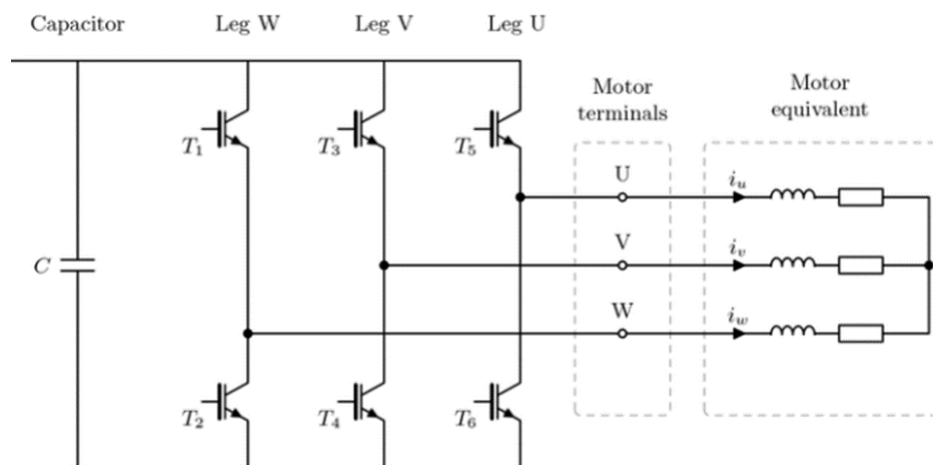
kde n je počet otáček za minutu, f frekvence napájecího napětí v Hz a p je počet pólových dvojic stroje.

3.2 Řízení PMSM

Z požadavků vyplývá potřeba řízení otáček výše zmíněného synchronního motoru. Nejprve je nutné seznámení s konceptem hardware, kterým je možné takový motor řídit a na základě toho lze vybrat vhodné metody.

3.2.1 Výkonový hardware

Z napájecího DC napětí musí vytvořit 3fázové napětí, ideálně sinusového průběhu, vhodné pro napájení tohoto motoru. Pro generování tří fází je možné využít běžné zapojení tranzistorů v můstku, které umožní sepnutí každé fáze motoru jak k napájecímu (T1, T3, T5), tak k zemnímu (T2, T4, T6) potenciálu napájecího zdroje. Toto zapojení je na obrázku 3.2. [3]



Obr. 3.2: Typické zapojení 3fázového můstku pro řízení 3fázového motoru – modifikováno z [4]

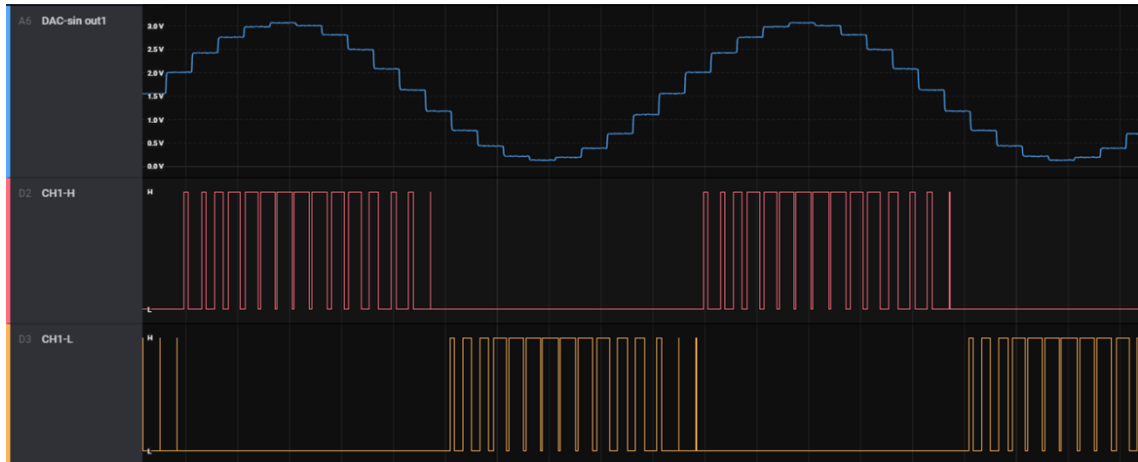
Pro vysokonapěťové aplikace se s výhodou používají speciální bipolární tranzistory, avšak v tomto případě, kde spínané napětí činí 42 V, je vhodnější využít tranzistory typu MOSFET. Vynikají totiž nižším odporem v sepnutém stavu, čímž se minimalizují ztráty a tím generované teplo. [5]

Tranzistory jsou v takovém zapojení obvykle buzeny speciálním budičem, který zajišťuje rychlý přechod z nevodivého do plně otevřeného stavu, aby mimo spínačový režim strávil tranzistor co nejméně času. Podle typu budiče také musí řídicí aplikace brát v potaz doby otevírání a zavírání tranzistorů tak, aby nedošlo k tzv. prostřelení můstku. Jedná se o stav, kdy se například horní tranzistor ještě plně nezavřel, ale řídicí aplikace již otevírá spodní tranzistor stejné fáze. Prakticky zkratový proud (dle míry otevření, resp. zavření tranzistorů) začne protékat větví můstku a v krajním případě může dojít ke zničení tranzistorů, nebo minimálně k nechtěné zvýšení spotřeby zařízení. Některé druhy budičů, zvláště těch přímo určených pro můstky již obsahují obvody pro eliminaci těchto stavů a jsou navíc schopny počítat s časy pro otevření a zavření tranzistorů. V opačném případě je nutno toto implementovat v rámci samotné řídicí aplikace. [3]

3.2.2 Generování sinusového průběhu metodou SPWM

Při dvoustavovém ovládní tranzistorů můstku ale není v principu možné dosáhnout libovolné hodnoty výstupního napětí a tím pádem vygenerování sinusového průběhu. Tento problém je možné eliminovat použitím pulzně-šířkové modulace (PWM). Změnou střídy budičeho signálu tranzistorů je možné vygenerovat signál s libovolnou

střední hodnotou, zde v závislosti na aktuálně požadované hodnotě sinusového průběhu, jak v principu vysvětluje následující obrázek 3.3. [6],[7]



Obr. 3.3: Rozpad sinusového signálu na PWM dvou tranzistorů jedné fáze

Tímto způsobem by bylo možné realizovat generování signálu všech třech fází, za pomoci fázového posunu o velikosti 60° . Výsledkem je metoda SPWM (Sine PWM), běžně používaná pro svoji relativní jednoduchost v obvodech s potřebou řízení otáček.

Nicméně, pro řízení otáček, minimalizaci zkreslení a maximalizaci momentu existuje vhodnější, široce používaná metoda PWM prostorového vektoru (SVPWM), která bude popsána v následujících kapitolách. Pro získání maximálního momentu je výhodné nad metodou SVPWM realizovat řízení typu FOC (field-oriented control). [3],[6],[7]

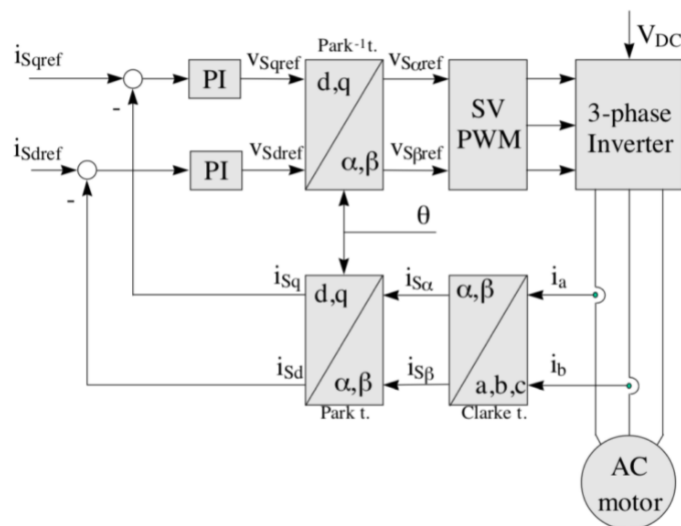
3.2.3 Řízení metodou FOC s SVPWM

Informace v této kapitole vychází z [3], [8] a [9]. Field oriented control (FOC) je metoda, díky které je možné odděleně řídit magnetizační (i_d) a moment generující (i_q) složky statorového proudu. Oproti přímému řízení 3fázového napětí, kde by bylo obtížné regulovat PI regulátory jsou řízeny pouze tyto dvě složky (i_d a i_q), které jsou v porovnání spíše konstantní. Metoda umožňuje maximalizovat produkovaný moment tak, že udržuje moment generující složku proudu kolmou na vektor magnetického toku rotoru. Magnetizační složka se při použití této metody běžně udržuje rovna 0. Díky tomu se zjednoduší závislost momentu a proudu – linearizuje. Je-li proud v ose d roven 0, elektromagnetický moment se řídí vztahem

$$M_e = \frac{3}{2} p_p \cdot i_{qref} \psi_{Bpm}, \quad (3.2)$$

kde M_e je výsledný moment v Nm, pp počet pólových dvojic motoru a ψ_{Bpm} magnetický tok permanentních magnetů ve Wb.

Základním blokem FOC algoritmu je SVPWM (space vector PWM) logika, která generuje řídicí signály pro spínací tranzistory v 3fázovém můstku, na jehož výstup je motor připojen. Proud je na dvou fázích motoru snímán a předáván bloku Clarkovy transformace, která převede 3fázový systém do pravoúhlého systému α, β také spřaženého se statorem. Následuje transformace do rotorového prostoru přes Parkovu transformaci. Jejím výsledkem jsou proudy i_d a i_q . Z těchto se vypočte odchylka oproti nastaveným hodnotám a velikost chyby je předána jednotlivým regulátorům typu PI (proporcionálně integrační, resp. proporcionálně sumační a předpokladu digitálního algoritmu). Výstupem regulátorů jsou jednotlivá napětí v d a q osách. Následuje jejich transformace z prostoru rotoru do statorových souřadnic α, β za pomoci inverzní Parkovy transformace. Tyto hodnoty se využijí jako parametry prostorového vektoru SVPWM. Celý algoritmus je znázorněn na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Blokové schéma řízení pomocí SVPWM [10]

Jak je z nákresu patrné, do Parkovy transformace vstupuje také aktuální natočení motoru, respektive elektromagnetického pole, označené jako θ . Oproti natočení hřídele motoru se spočte podle následující vztahu:

$$\Theta = \Theta_m \cdot p_p, \quad (3.3)$$

kde Θ_m je natočení hřídele motoru a p_p počet pólových dvojic motoru.

Nejjednodušší možností je využít inkrementální snímač natočení, případně analogovou variantu typu resolver.

Clarkova transformace

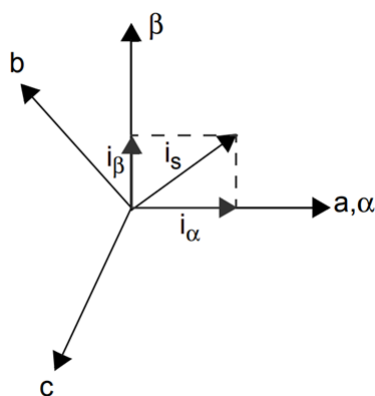
Pro zjednodušení výpočtu se využívá tzv. Clarkova transformace, při které dojde k převodu tříosého systému spřaženého se statorem (3fázových proudů) na dvouosý systém, který je také vázán na stator. Nutnou podmínkou pro možné provedení transformace je 120° fázový posun mezi osami a, b, c. Princip popisuje obrázek 3.5 a rovnice pro převod znějí následovně:

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (3.4)$$

$$i_\alpha = i_a, \quad (3.5)$$

$$i_\beta = \frac{i_a + 2i_b}{\sqrt{3}}. \quad (3.6)$$

[8],[10],[14]



Obr. 3.5: Princip Clarkovy transformace – volně převzato z [14]

Parkova transformace

Po převodu na dvouosý pravoúhlý systém vázaného na stator následuje další transformace. Parkovou transformací je dvouosý systém α , β převeden do rotorového systému souřadnic, obvykle označovaný jako d, q (kde d je osou reálnou a q osou imaginární). Při převodu fázových proudů i_α , i_β zní transformace následovně:

$$i_d = i_\alpha \cos(\Theta) + i_\beta \sin(\Theta), \quad (3.7)$$

$$i_\alpha = i_a, \quad (3.8)$$

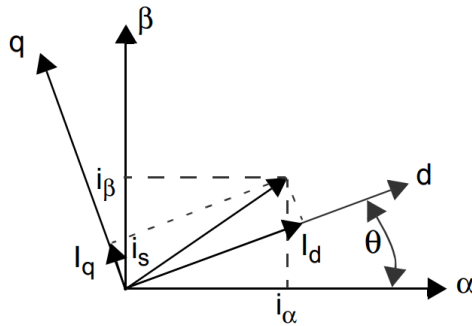
kde Θ je natočení motoru.

Transformaci inverzní pak je možné provést podle

$$i_\alpha = i_d \cos(\Theta) - i_q \sin(\Theta), \quad (3.9)$$

$$i_{\beta} = i_q \cos(\Theta) + i_d \sin(\Theta) \quad (3.10)$$

a popisuje ji obrázek 3.6. [8],[10],[14]

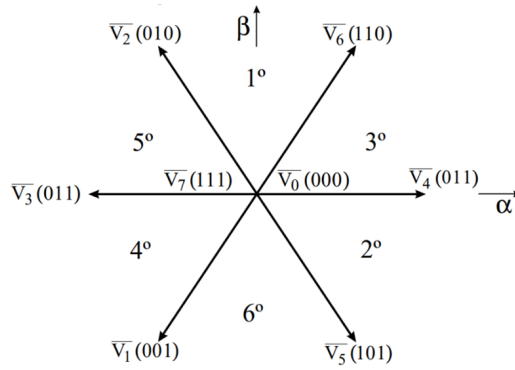


Obr. 3.6: Princip Parkovy transformace, volně převzato z [14]

Metoda SVPWM

Tato kapitola vychází z informací ze zdrojů [7], [9], [15], a [16]. Pro řízení 3fázového měniče pro synchronní motor je možné použít metodu SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation). Jedná se o výpočetní metodu, jejíž výsledek zajistí řídicí signály pro high-side a low-side MOSFETY v můstku v závislosti na aktuálně generovaném natočení elektromagnetického točivého pole. Takto generované řízení minimalizuje obsah vyšších harmonických, které jinak způsobují majoritní část ztrát v motoru. S tím souvisí také daleko nižší harmonická zkreslení průběhů (THD), mající pozitivní vliv na snížení generovaných rušících signálů a snížení vyzařování. Oproti metodě SPWM je možné SPWM dosáhnout až o 15% větší amplitudy generovaného signálu.

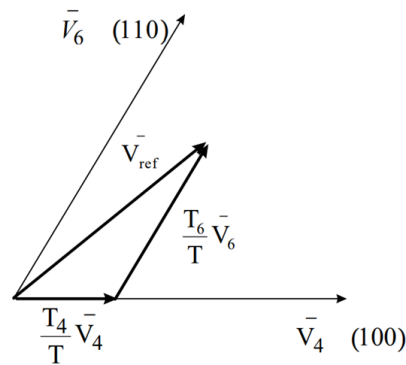
Máme-li tři fáze, které je možné sepnout jak ke kladnému pólu, tak k nulovému, existuje 8 možných kombinací stavů úrovní, respektive 6 různých kombinací, kdy přes připojený motor může téct proud. Vhodným sledem spínání těchto kombinací vytvoříme rotující elektromagnetické pole, které můžeme v základu otáčet v 6 krocích – základní princip je patrný z obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Vektorový prostor SVPWM [10]

Index jednotlivých vektorů na nákrese odpovídá binární reprezentaci stavů na jednotlivých fázových přívodech (W, V, U) – např. $V_1(001)$ odpovídá stavu, kdy fáze W a V jsou přizemněny a fáze U je připojena na kladnou svorku zdroje. Vstupními hodnotami pro metodu SVPWM jsou hodnoty α a β , udávající polohu vektoru.

Samozřejmě otáčení vektoru v šesti krocích by nevygenerovalo potřebně plynulé otáčivé pole. Proto je třeba využít časové vážení působení jednotlivých vektorů v rámci periody T , dle požadovaného natočení pole (resp. vektoru výstupního napětí). Prostor rozdělíme na jednotlivé sekce vymezené základními šesti vektory. Rotující vektor V_{out} se vyjádří jako součet násobků těch vektorů, mezi kterými se právě nachází. Například v první sekci, mezi vektory V_4 a V_6 se provede rozklad tak, jak je znázorněno na nákrese 3.8.



Obr. 3.8: Rozklad libovolného vektoru na působení vektory SVPWM [10]

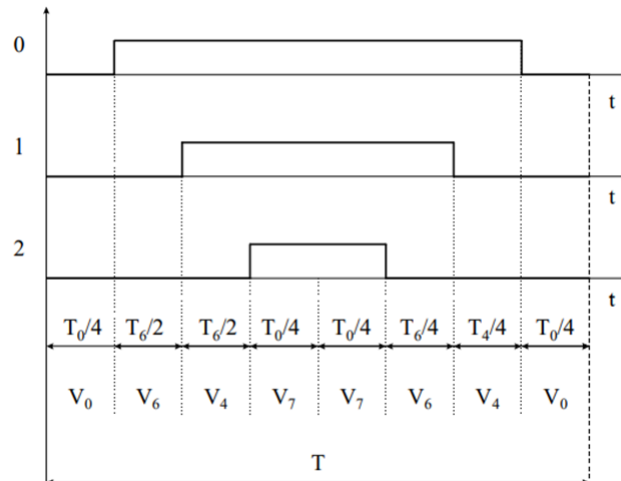
Výsledkem pak jsou časy T_4 a T_6 udávající dobu působení daných vektorů. Po zbytek periody T jsou aplikovány nulové vektory. Ve výsledku pak platí

$$T = T_4 + T_6 + T_0 \quad (3.11)$$

a

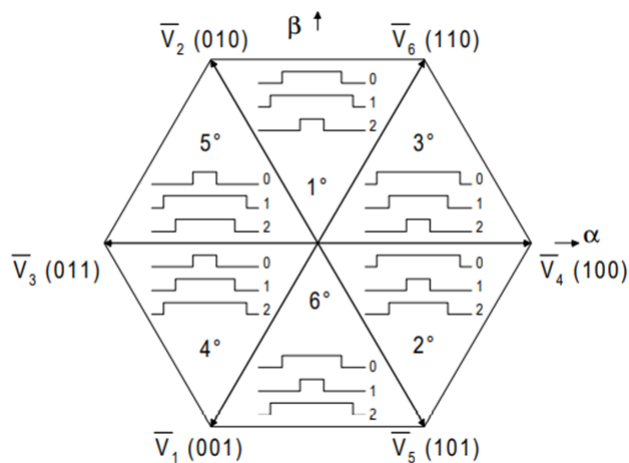
$$\bar{V}_{ref} = \frac{T_4}{T} \bar{V}_4 + \frac{T_6}{T} \bar{V}_6. \quad (3.12)$$

Na základě vypočtených časů je generován PWM signál pro všechny tři fáze, a to symetricky vzhledem ke středu periody. Čísla vektorů opět odpovídají binární reprezentaci signálů, jak ilustruje obrázek (3.9):



Obr. 3.9: Časový průběh působení vektory SVPWM na výstupy (vektor mezi V_4 a V_6) [10]

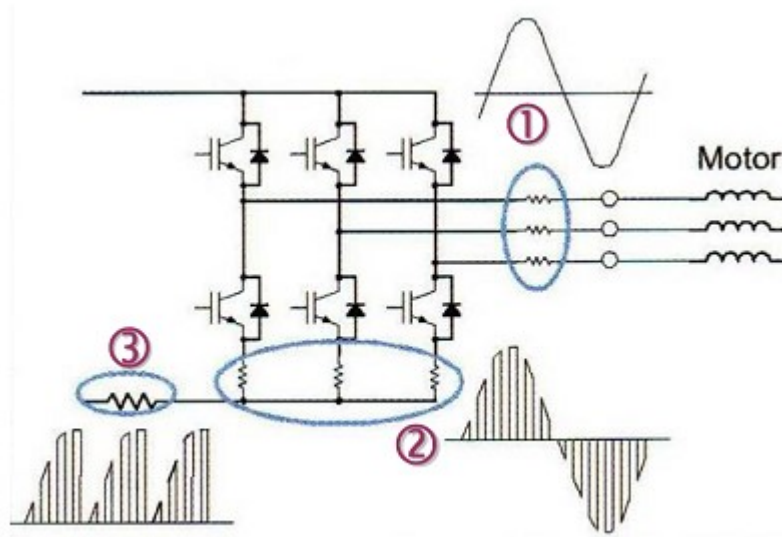
Podobně se postupuje i v ostatních sektorech, jak je znázorněno na kompletním hexagonu SVPWM - obrázek 3.10.



Obr. 3.10: Kompletní hexagon SVPWM spolu s průběhy výstupů [10]

Možnosti snímání proudu motorem

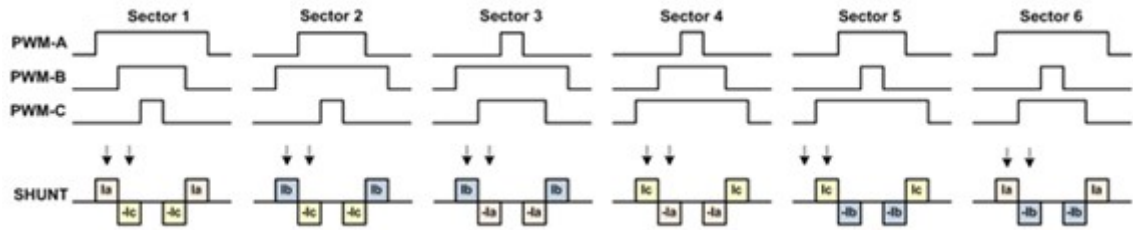
Tato kapitola čerpá z [9], [10] a [17]. Jak vyplývá z blokového schématu FOC řízení PMSM, je nutné kromě zpětné vazby otáček také zpětná vazba proudu. Tu je možné realizovat několika způsoby s různou mírou složitosti a výhod. Nejčastěji používané metody zobrazuje schéma na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Možnosti měření proudu motorem [17]

Jedná se o tyto metody:

1. Měření proudu přímo na fázových vodičích motoru. Tato možnost je nejjednodušší na realizaci v FW, přináší však negativa v podobě potřeby zesilovačů s vysokým činitelem potlačení souhlasného napětí a vysokým rozsahem napájecího napětí. Je také nutné simultánní vzorkování úbytků.
2. Metoda měření v low-side spínacího můstku odstraňuje nevýhody předešlé metody – není již třeba speciálních zesilovačů, jelikož souhlasné napětí je blízké nule. Je však nutné synchronizovat vzorkování se změnami signálu řídicího algoritmu SVPWM.
3. Tato metoda používá měření pouze na jednom snímacím rezistoru společném pro všechny tři fáze můstku. Poskytuje největší úspory v ceně hardware, ale je ještě náročnější na proces rekonstrukce proudu ve firmware. Změřený proud totiž poté odpovídá následujícím průběhům (3.12). Je proto nutné také synchronizovat vzorkování ADC se změnami signálu PWM a následně proudy odečítat.



Obr. 3.12: Průběh proudu při použití jednoho snímacího rezistoru [17]

Po zvážení všech kladů a záporů jednotlivých metod a řešení nutných komponent byla pro první prototyp zvolena první metoda měření - primárně z důvodu jednoduchosti implementace a spolehlivosti, navíc díky malosériové výrobě by nebyly výsledné rozdíly cen tak velké. Nakonec však bylo nutné přejít k metodě druhé, jelikož původně vybrané integrované obvody při změně common-mode napětí na vstupech produkovaly špičku na výstupu a jiné nebyly dostupné z důvodu aktuální krize.

4 Analýza původního modulu a identifikace

V rámci analýzy je důležité zjistit základní parametry původní elektroniky, ať už mechanické z prostorových důvodů, tak elektrické. Nezbytná pro návržení hardware a následné řízení je také identifikace motoru.

4.1 Analýza původní elektroniky

Původní modul řízení pohonu dveří pochází od neznámé italské firmy a je určen pro ovládání motorických dveří například v obchodech. Jeho fotografie je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Původní elektronika pro řízení pohonu dveří

Zařízení sestává z několika jednoduše identifikovatelných částí. Na levé straně desky plošných spojů (DPS) se nachází ovládací vstupy jednotky, spolu s konfiguračními propojkami a ovládacím rozhraním v podobě segmentových displejů a tlačítek.

Následuje řídicí část a výkonová část řízení motoru. Ta je realizována dle předpokladu 3fázovým můstkem z tranzistorů typu MOSFET a specializovaným budičem. Zapojení také umožňuje měření proudu tzv. low-side, neboli v negativní napájecí větvi, zde v každé spínané fázi. Na pravé straně DPS se nachází síťový napájecí zdroj. Jedná se o standardní provedení spínaného zdroje pro napájení z 230 V AC.

4.1.1 Identifikované parametry

Od dodavatele jsou dostupné pouze údaje uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Známé parametry původní elektroniky

Parametr	Hodnota
Napájení	100-240 V AC 50/60 Hz
Jmenovitý příkon	70 W
Pohotovostní příkon	10 W
Zatížení	150 N

Na základě měření bylo zjištěno napájecí napětí můstku a tím také motoru. Jedná se o napájecí napětí o velikosti $U = 42$ V. Dále byly identifikovány klíčové součástky – budič tranzistorů můstku a samotné tranzistory. Jedná se o integrovaný obvod výrobce Infineon – 6EDL04N02PR, který obsahuje vše potřebné pro řízení 3fázového můstku spolu s ochranami. Obvod bude podrobně rozebrán v kapitole 7.2.

V dalším kroku byl odhadnut maximální příkon motoru jako rozdíl jmenovitého a pohotovostního příkonu zařízení při zanedbání ztrát na spínacích prvcích:

$$P_{mot} = P_{jmen} - P_{pohot} \quad (4.1)$$

a po dosazení:

$$P_{mot} = 70 - 10 = 60W. \quad (4.2)$$

Z takto spočteného příkonu motoru je možné spočítat jmenovitý proud motoru. Jelikož interní zapojení odpovídá zapojení do hvězdy, pak můžeme psát:

$$P_{mot} = \sqrt{3} \cdot U_s I, \quad (4.3)$$

kde U_s je sdružené napětí [V], resp. napájecí napětí motoru, a I proud motorem [A]. Ve tvaru pro výpočet proudu dostáváme:

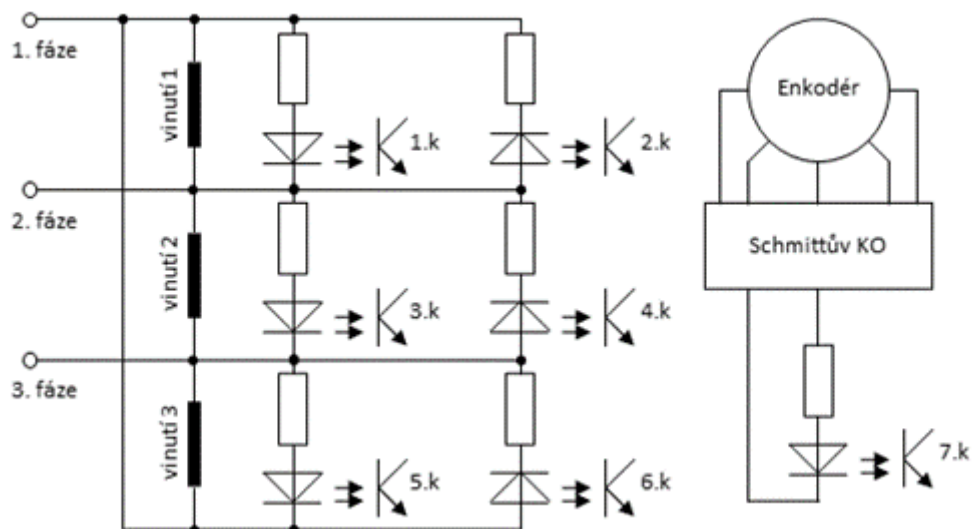
$$I = \frac{P_{mot}}{\sqrt{3}U_s}. \quad (4.4)$$

Po dosazení:

$$I = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 42} = 0,824A. \quad (4.5)$$

4.1.2 Použitý princip řízení

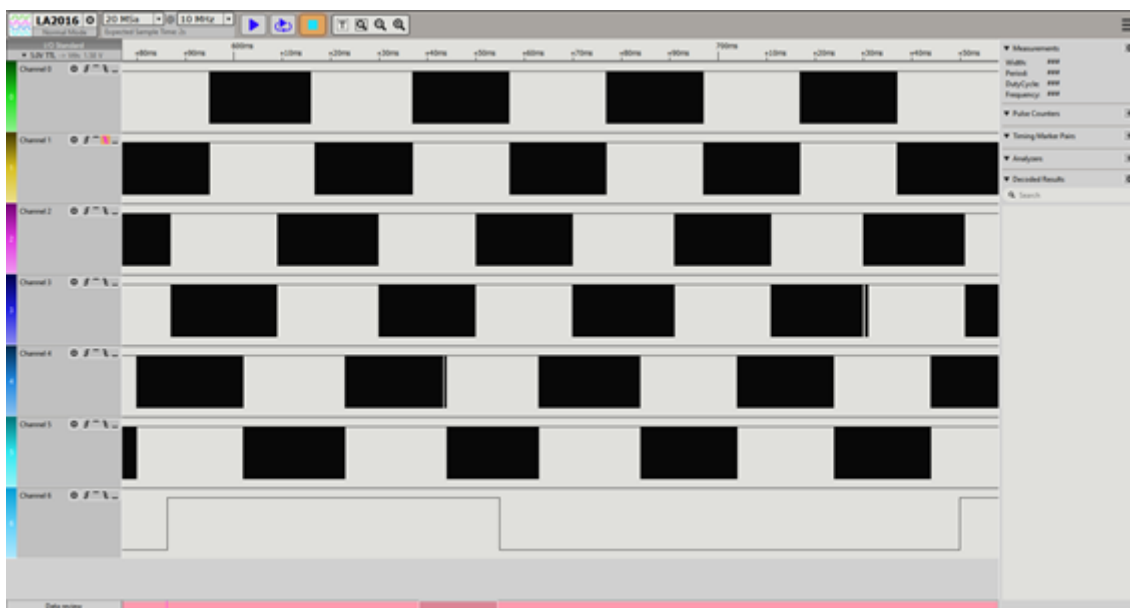
Aby bylo možné navrhnout zařízení s lepšími vlastnostmi nežli stávající řešení, je nejprve nutné pochopit a analyzovat jeho princip funkce a řídicí algoritmy. Proto bylo zvoleno zapojení, které je principiálně vyobrazeno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Principiální zapojení obvodu pro analýzu buzení

Z ideového schématu zapojení je patrné připojení sedmi kanálů logického analyzátoru, umožňující nepřímou detekci spínání horních i dolních mosfetů můstku pro jednotlivé fáze, současně poskytující galvanické oddělení od výkonové elektroniky.

Pohon byl uveden do chodu a následně byly změřeny logickým analyzátozem průběhy řízení s cílem zjistit použitou metodu. Naměřené průběhy buzení vinutí jsou reprezentuje obrázek 4.3. První kanál (kanál 0) vyobrazuje buzení prvního vinutí v kladné polaritě, druhý kanál (kanál 1) v záporné. Podobně pak pro druhé vinutí (kanály 2 a 3) a třetí vinutí (kanály 4 a 5).



Obr. 4.3: Průběhy buzení vinutí původní elektronikou

Na základě průběhů vznikla domněnka o řízení metodou SPWM (Sine PWM). Ta byla následně potvrzena přiblížením jednoho bloku impulzů a zobrazením průběhů na začátku a v jednotlivých násobcích čtvrtiny bloku (viz obrázek 4.4).

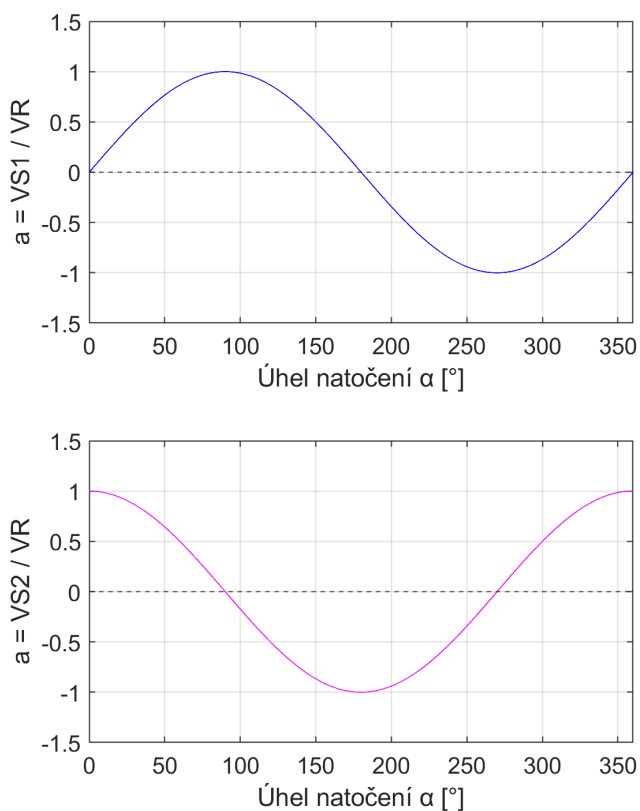


Obr. 4.4: Detail buzení původní elektronikou

V jednotlivých částech bloku impulzů dochází k postupnému nárůstu aktivní doby a následně k jejímu poklesu. Následuje blok stejných impulzů v opačné polaritě, tvořící zápornou část sinusového průběhu. Jednotlivé fáze jsou posunuté o 60° a tvoří tak rotující elektromagnetické pole.

4.1.3 Snímání otáček

V tomto případě je využit sin/cos enkodér, jelikož je jím motor vybaven. V závislosti na natočení hřídele motoru poskytuje dvě hodnoty napětí. Za jedno otočení motorem o 360° vygeneruje jednu periodu průběhu odpovídající průběhu funkce sin a v druhém kanálu o 90° posunutý signál, cos. Díky fázovému posunu mezi oběma signály je možné určit také směr otáčení. Průběh za jednu otáčku motoru je vyobrazen na obrázku 4.5 (VS1 a VS2 jsou napěťové signály enkodéru a VR jeho referenční napětí). [18]



Obr. 4.5: Průběh napětí na výstupech enkodéru při změně natočení

Výsledné natočení pak lze spočítat pomocí goniometrické funkcí následovně:

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{V_{SN}}{V_{SC}}, \quad (4.6)$$

kde V_{SN} a V_{CN} jsou napětí normalizovaná za pomoci referenčního napětí na rozsah ± 1 .

4.2 Zjištění parametrů motoru

Tato kapitola a podkapitoly čerpají z poznatků v [11]. Z teorie řízení PMSM vyplývá potřeba znalosti jistých parametrů motoru. Pro řízení metodou FOC jsou to pro proudové regulátory nutné následující parametry:

1. R_s – elektrický odpor jedné z fází motoru [Ω]
2. L_d – indukčnost jedné z fází motoru v d-ose [H]
3. L_q – indukčnost jedné z fází motoru v q-ose [H]
4. p_p – počet pólových dvojic motoru [-]

Pro otáčkový regulátor jsou nezbytné další parametry:

1. J – celkový moment setrvačnosti zátěže [$kg \cdot m^2$]
2. ψ_{pm} – magnetický tok permanentních magnetů [Wb]

Návrh konkrétního regulátoru následuje po identifikaci parametrů.

4.2.1 Zjištění R_s

Při měření RS lze použít dvě základní metody – přímo změřit odpor multimetrem, nebo 4vodičovou metodou. Po prvním změření multimetrem, který naměřil hodnotu odporu pod 1Ω , byla zvolena druhá možnost – 4vodičová metoda. Tato metoda se běžně používá při měření elektrických odporů malých hodnot. Výhodou je její vysoká přesnost, jelikož využívá separátní připojení napájecí částí a měřicí části, čímž se eliminuje vliv úbytku napětí na přívodech na výslednou vypočtenou hodnotu odporu. Pro měření byl nastaven proud $I=0,297A$. Na vývodech fází byl při tomto proudu naměřen úbytek $U=0,367V$, což dle Ohmova zákona odpovídá

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,367}{0,297} = 1,236\Omega. \quad (4.7)$$

Vzhledem k zapojení motoru do hvězdy, kdy se mezi dvěma vývody motoru nachází dvě vinutí, je skutečná hodnota odporu jednoho vinutí fáze poloviční:

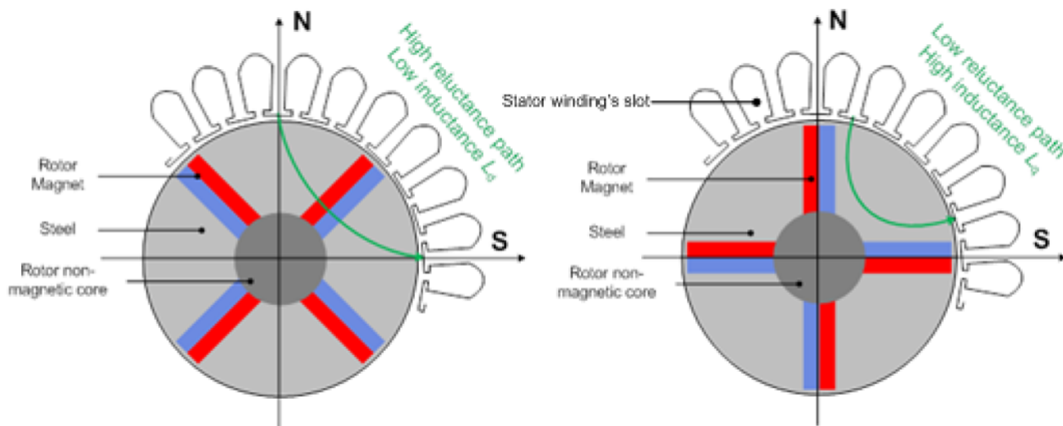
$$R_s = \frac{R}{2} = \frac{1,236}{2} = 0,618\Omega. \quad (4.8)$$

4.2.2 Zjištění p_p

Počet pólových dvojic motoru odpovídá počtu stabilních poloh rotoru. Proto byl pro měření použit způsob popsáný v [10]. Ten spočívá v připojení dvou fází (zde U a V) na stejnou polaritu zdroje a třetího fázového vodiče na polaritu opačnou (zde fáze W). Následně je na zdroji nastaven proud cca 10 % nominálního (zde cca 300 mA), který zaručí, že s motorem je stále možné otáčet rukou, ale spolehlivě se zastaví ve stabilních polohách (u větších výkonů motoru se volí proud menší). Postupným otáčením motoru o 360° je zjištěn počet stabilních poloh v jedné otáčce (tedy p_p). Pro měřený motor je $p_p = 4$. Tato skutečnost byla posléze ověřena i experimentem s generováním napětí pro motor. Buzení motoru 3f signálem o frekvenci 4 Hz odpovídá rychlosti otáčení 1 otáčky/sec.

4.2.3 Zjištění L_d a L_q

Pro toto měření se očekávané výsledky liší v závislosti na typu konstrukce motoru. Pro PMSM s vnitřními permanentními magnety jsou synchronní indukčnosti L_d a L_q rozdílné ($L_d < L_q$) z důvodu nižší reluktance v ose q, jak vysvětluje obrázek 4.6.



Obr. 4.6: Princip změny reluktance při natočení rotoru [11]

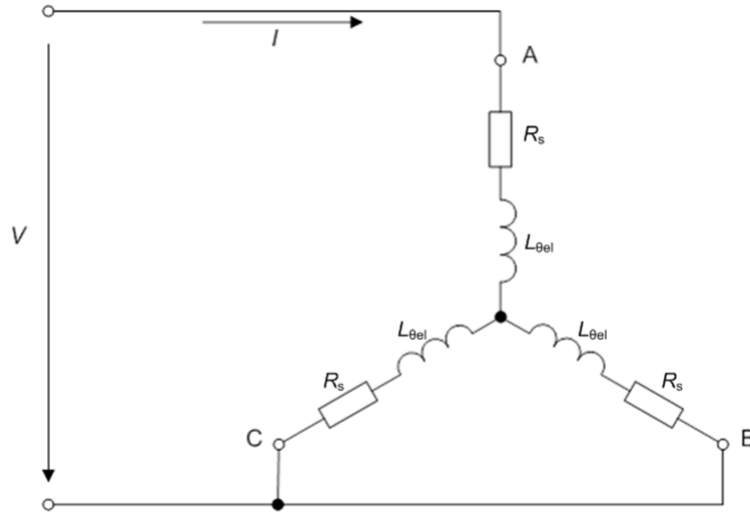
Při měření PMSM z povrchovými permanentními magnety je možné považovat $L_d \approx L_q$, jelikož reluktance je stejná v každé poloze rotoru. Z mechanické analýzy motoru bylo zjištěno, že se jedná o PMSM s povrchovými permanentními magnety, tudíž se očekává $L_d \approx L_q$. Pro měření indukčností byla použita metoda popsáná v [11]. Spočívá v natočení rotoru do potřebné polohy, kde je následně zajištěn proti dalšímu otáčení svěrkou. Následuje změna připojení vinutí a změření odezvy proudu na jednotkový skok napětí. Z této odezvy je odečtena časová konstanta τ , reprezentující čas, za který proud dosáhne 63,2% ustálené hodnoty. V závislosti na natočení

rotoru je možné změřit indukčnost v d-ose nebo q-ose. Indukčnost se pak spočte ze sérioparalelní kombinace satorových vinutí:

$$L_d = \frac{2}{3}L, (\theta_{el} = 0^\circ), \quad (4.9)$$

$$L_q = \frac{2}{3}L, (\theta_{el} = 90^\circ), \quad (4.10)$$

viz obrázek 4.7.



Obr. 4.7: Principiální schéma pro měření indukčností v D a Q ose [11]

Ze schématu vyplývá, že v případě zajištěného rotoru se systém chová jako RL obvod prvního řádu. Proud pak odpovídá rovnici

$$i_d = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (4.11)$$

kde τ je časová konstanta obvodu

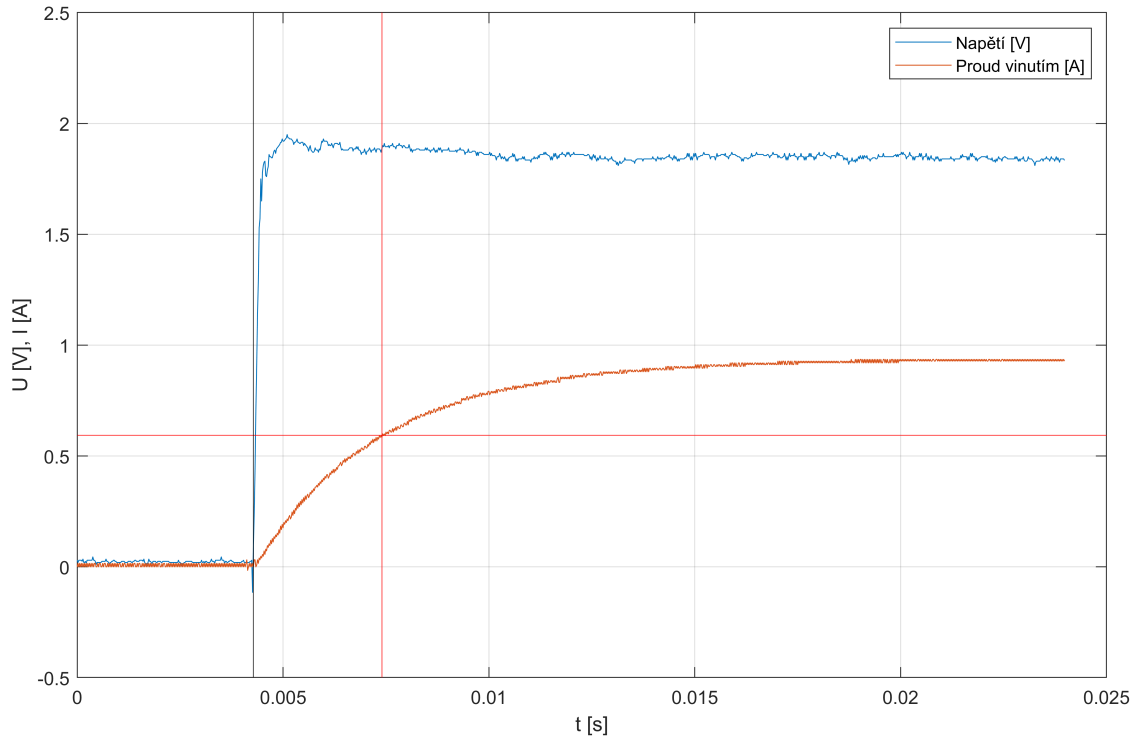
$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (4.12)$$

Při znalosti časové konstanty τ je možné spočítat L_d :

$$L_d = \frac{2}{3}\tau R. \quad (4.13)$$

Na základě výše zmíněné teorie bylo započato měření. Nejprve byl motor srovnán do d-osy aplikováním kladného napětí na fázi U a uzemněním fází V a W (je doporučen proud cca 10 % nominálního, avšak zde, jelikož se jedná o nízko-otáčkový motor s velkým momentem by se naměřené údaje příliš lišily od oblasti, ve které bude provozován - proto byl zvolen proud bližší nominálnímu). Poté je nutné použít

svorku nebo truhlářský šroub pro zajištění rotoru motoru proti otáčení. Následuje aplikování jednotkového skoku napětí pro identifikaci systému. To se provede připojením fází V a W na kladné napětí a uzemněním fáze U (negativní jednotkový skok). Při tomto kroku zaznamenáváme průběh napětí a proudu (proudovou sondou nebo úbytkem na rezistoru – v tomto případě na rezistoru 1Ω) – viz obrázek 4.8.



Obr. 4.8: Odezva proudu na jednotkový skok napětí (měření v D ose)

Na změřeném průběhu odečteme ustálenou hodnotu proudu, resp. úbytku napětí na snímacím rezistoru a spočteme 63,2% hodnoty, kde odečteme časovou konstantu. Na výše vyobrazeném průběhu toto odpovídá hodnotě úbytku $\Delta U_R = 928mV$. Pak $\Delta U_{R63} = 586mV$ a odečtený čas náběhu do této hodnoty je $t_d = 3,12ms$.

Dosazením do vztahu pro výpočet indukčnosti L_d získáme:

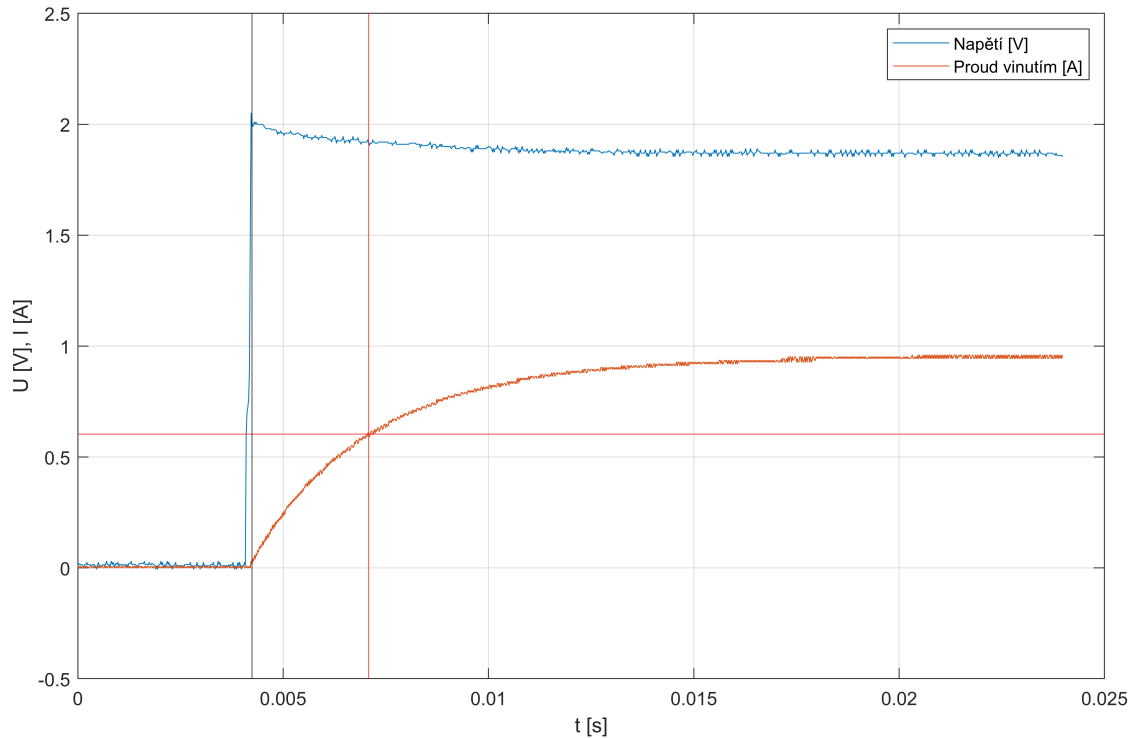
$$L_d = \frac{2}{3} \cdot 3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1.235, \quad (4.14)$$

což se rovná

$$L_d = 2,57mH. \quad (4.15)$$

Podobně měření opakujeme pro získání indukčnosti L_q , pouze s tou změnou, že motor srovnáme do q-osy. To se provede připojením napětí mezi fáze V a W s kladným pólem na fázi V (pro proud platí stejné podmínky). Fáze U zůstává nepřipojena. Po natočení motoru opět zafixujeme motor, tentokrát je nutné dbát skutečně pevně

uchycení, jelikož jednotkový skok v ose q vytvoří velký moment. Následně aplikujeme jednotkový skok pro identifikaci systému, připojením fáze U na napájecí napětí a uzemněním fází V a W a zaznamenáme stejným způsobem jako v předchozím případě odezvu osciloskopem - viz obrázek (4.9).



Obr. 4.9: Odezva proudu na jednotkový skok napětí (měření v Q ose)

Po spočtení 63,2 % ustálené hodnoty úbytku napětí na snímacím rezistoru ($\Delta U_R = 944mV$, $\Delta U_{R63} = 597mV$) nalezneme časovou konstantu $\tau_q = 2,84ms$.

Dosažením do vztahu pro výpočet indukčnosti L_q získáme:

$$L_q = \frac{2}{3} \cdot 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot 1.235, \quad (4.16)$$

po vyjádření

$$L_q = 2,34mH. \quad (4.17)$$

4.2.4 Zjištění ψ_{pm}

Magnetický tok permanentních magnetů je možné jednoduše zjistit použitím motoru v režimu generátoru. Hřídel se roztočí jiným motorem na konstantní známé otáčky a následně je změřeno napětí mezi fázemi měřeného motoru. Magnetický tok

permanentní magnetů pak lze vypočítat podle vzorce:

$$\psi_{pm} = \frac{U_{pp}}{2\sqrt{3} \cdot p_p \cdot \omega_m}, \quad (4.18)$$

kde U_{pp} je změřené napětí špička-špička a ω_m mechanické úhlové otáčky. Při měření tohoto motoru byl roztočen na 6.02 otáček za sekundu ($\omega_m = 2\pi f_m$), kdy generoval napětí $U_{pp} = 20V$. Po dosazení do uvedeného vzorce pak dostáváme

$$\psi_{pm} = 0,0382Wb. \quad (4.19)$$

4.2.5 Výpočet J

Pro návrh regulátoru rychlosti v rámci FOC je nutná znalost momentu setrvačnosti. Mechanický systém dveří neobsahuje žádný systém řemenic a křídla dveří jsou posouvána přímo řemenem motoru - křídla jezdí po kolejnici. Díky tomu je možné přepočítat hmotnost křídel přímo na ekvivalentní hmotnost řemenice na ose motoru. Poté stačí určit moment setrvačnosti ekvivalentní řemenice

$$J = mr^2, \quad (4.20)$$

kde m je přepočítávaná hmotnost v kilogramech a r poloměr řemenice v metrech. Při znalosti hmotnosti obou křídel (2x90 kg) a poloměru řemenice $r=1,2$ cm dostáváme po dosazení:

$$J = 180 \cdot 0,012^2 = 0,0264kg \cdot m^2. \quad (4.21)$$

4.2.6 Shrnutí výsledků identifikace PMSM

V rámci předchozích kapitol byly identifikovány důležité parametry řízeného motoru. Pro přehlednost jsou souhrnně uvedeny v následující tabulce (tabulka 4.2).

Tab. 4.2: Přehled identifikovaných parametrů motoru

Parametr	Význam	Hodnota
R_s	elektrický odpor jedné z fází motoru	0,618 Ω
L_d	indukčnost jedné z fází motoru v d-ose	4
L_q	indukčnost jedné z fází motoru v q-ose	2,57mH
p_p	počet pólových dvojic motoru	2,34mH
ψ_{pm}	magnetický tok permanentních magnetů	0,0382Wb
J	celkový moment setrvačnosti zátěže	0,0264kg · m ²

5 Návrh a simulace regulátorů

V rámci přípravy implementace FOC je třeba navrhnout regulátory. Z předchozí teorie FOC vyplývá nutnost dvou proudových regulátorů a nadřazeného otáčkového v kaskádě. Na základě teorie PMSM a řízení v d-q souřadnicích bylo vytvořeno simulační schéma motoru (viz elektronická příloha ve formátu aplikace Matlab/Simulink). Z něho pak vyplývají přenosové funkce proudu v osách d,q a rychlosti použité v následujících podkapitolách. Pro samotný návrh regulátorů byly použity dvě metody, metoda optimálního modulu (OM) a metoda symetrického optima (SO). První z metod (OM), je vhodná pro proudové regulátory, díky svému malému překmitu, který je za cenu rychlosti. Na druhé straně metoda symetrického optima bude využita pro regulátor otáček, jelikož je rychlejší za cenu překmitu. [12], [13]

5.1 Návrh proudových regulátorů

Nejprve je nutné určit přenos otevřené smyčky proudu ($F_{si}(p)$), která se skládá z přenosu motoru ($F_{mot_i}(p)$), přenosu měniče ($F_{men}(p)$) a čidla proudu ($F_{cp}(p)$):

$$F_{si}(p) = F_{mot_i} \cdot F_{men} \cdot F_{cp}. \quad (5.1)$$

Přenos motoru odpovídá:

$$F_{mot_i} = \frac{1/R_s}{1 + p\tau_{el}}, \quad (5.2)$$

kde τ_{el} je časová konstanta pro danou osu (d,q) spočtená podle:

$$\tau_{el} = \frac{R_s}{L_{d(q)}}. \quad (5.3)$$

Samotný motor je buzen měničem, který má také svoji časovou konstantu určenou frekvencí PWM. Jeho přenos vychází:

$$F_{men}(p) = \frac{K_{men}}{1 + p\tau_{men}}, \quad (5.4)$$

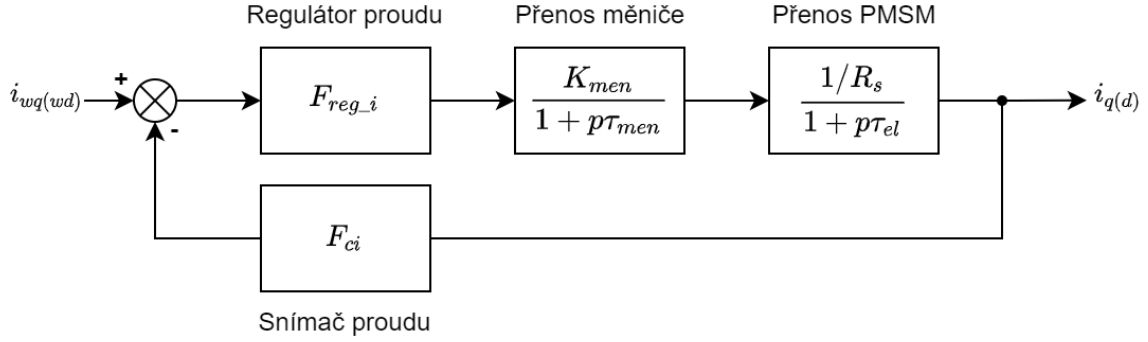
kde K_{men} je zesílení měniče a τ_{men} zmíněná časová konstanta.

Posledním blokem je snímač proudu. Jeho dynamiku je možné obvykle možné považovat za zanedbatelnou (v porovnání s konstantami motoru), proto zjednodušeně platí:

$$F_{cp}(p) = K_{cp}, \quad (5.5)$$

zde vystupuje pouze jeho zesílení K_{cp} .

Nyní jsou známé všechny jednotlivé přenosy proudové smyčky a lze vytvořit kompletní schéma proudového regulační smyčky (viz obrázek 5.1).



Obr. 5.1: Schéma regulační smyčky proudu

Výsledný přenos proudové smyčky bez regulátoru pak odpovídá:

$$F_{si}(p) = \frac{K_{men} K_{cp} \frac{1}{R_s}}{(1 + p\tau_{el})(1 + p\tau_{men})}. \quad (5.6)$$

Pro zjednodušení stanovme zesílení proudové smyčky K_{si} :

$$K_{si} = K_{men} K_{cp} \frac{1}{R_s}, \quad (5.7)$$

které přenos zjednoduší do formy:

$$F_{si}(p) = \frac{K_{si}}{(1 + p\tau_{el})(1 + p\tau_{men})}. \quad (5.8)$$

Toto je kompletní přenos proudové smyčky.

Jak bylo zmíněno výše, proudové regulátory jsou navrženy metodou optimálního modulu. Standardním přenosem otevřené smyčky OM má být:

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2\tau_{\sigma}p(1 + p\tau_{\sigma})}. \quad (5.9)$$

Jelikož platí:

$$F_{OM}(p) = F_{reg_i} \cdot F_{si}, \quad (5.10)$$

je možné vyjádřit regulátor:

$$F_{reg_i}(p) = F_{OM} F_{si}^{-1} = \frac{1}{2\tau_{\sigma}p(1 + p\tau_{\sigma})} \frac{(1 + p\tau_{el})(1 + p\tau_{men})}{K_{si}}. \quad (5.11)$$

Typicky se stanovuje $\tau_{\sigma} = \tau_{men}$, díky čemuž dojde ke zjednodušení:

$$F_{reg_i}(p) = \frac{1}{2\tau_{men}p} \frac{(1 + p\tau_{el})}{K_{si}}. \quad (5.12)$$

Z takto upravené rovnice se substituuje τ_0 :

$$\tau_0 = 2K_{si} \cdot \tau_{men} = 2K_{si} \cdot \tau_{men} \cdot \frac{K_{men}}{R_s} \quad (5.13)$$

Čímž dojde ke zjednodušení přenosu na:

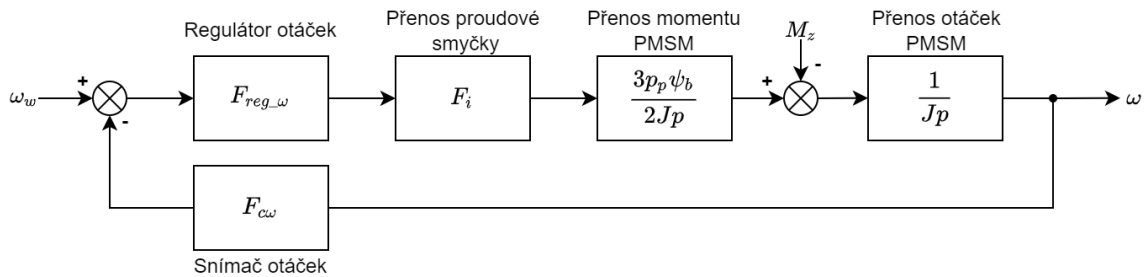
$$F_{reg_i}(p) = \frac{1 + p\tau_{el}}{\tau_0 p} \quad (5.14)$$

a dále je možné z přenosu vyjádřit jednotlivé složky PI regulátoru následovně:

$$F_{reg_i}(p) = \underbrace{\frac{\tau_{el}}{\tau_0}}_{K_p} + \underbrace{\frac{1}{\tau_0}}_{K_i} \frac{1}{p}. \quad (5.15)$$

5.2 Návrh otáčkového regulátoru

Pro návrh regulátoru otáček byla zvolena metoda symetrického optima, z důvodu rychlého regulačního průběhu. Princip metody návrhu je stejný, jako pro optimální modul. Nejprve je stanoven přenos otáčkové regulační smyčky, který se skládá z přenosu proudové smyčky, přenosu momentu a otáček a přenosu snímače otáček. Regulační smyčka pak vypadá následovně (viz obrázek 5.2).



Obr. 5.2: Schéma regulační smyčky otáček

Její celkový přenos bez regulátoru pak odpovídá:

$$F_{s\omega}(p) = \frac{K_{s\omega}}{(1 + p\tau_{iq})(1 + p\tau_{c\omega})p}, \quad (5.16)$$

kde τ_{iq} je časová konstanta proudu v ose q a $K_{s\omega}$ je celkové zesílení smyčky otáček:

$$K_{s\omega} = \frac{3K_{c\omega}p_p\psi_b}{2J \cdot K_{cp}}. \quad (5.17)$$

Oproti předchozí metodě se pro symetrické optimum používá jiný přenos otevřené smyčky, a to ve tvaru:

$$F_{SO}(p) = \frac{1 + 4p\tau_{\Sigma}}{8p^2\tau_{\Sigma}^2(1 + p\tau_{\Sigma})}. \quad (5.18)$$

Jelikož platí:

$$F_{SO}(p) = F_{reg_ω} \cdot F_{s\omega}, \quad (5.19)$$

je možné vyjádřit regulátor:

$$F_{reg_ω}(p) = F_{SO} F_{sw}^{-1} = \frac{1 + 4p\tau_{\Sigma}}{8p^2\tau_{\Sigma}^2(1 + p\tau_{\Sigma})} \frac{(1 + p\tau_{iq})(1 + p\tau_{c\omega})p}{K_{sw}}. \quad (5.20)$$

Uvažuje-li se $\tau_{c\omega} \gg \tau_{iq}$, stanoví se časová konstanta $\tau_{\Sigma} = \tau_{c\omega}$. Tím dojde opět ke zjednodušení:

$$F_{reg_ω}(p) = \frac{(1 + 4p\tau_{c\omega})(1 + p\tau_{iq})}{\frac{1}{J} \cdot 12\psi_b p_p \cdot 4\tau_{c\omega}^2 p}. \quad (5.21)$$

Z takto upravené rovnice se substituuje τ_0 :

$$\tau_0 = \frac{1}{J} \cdot 12\psi_b p_p \cdot 4\tau_{c\omega}^2. \quad (5.22)$$

Čímž dojde ke zjednodušení přenosu na:

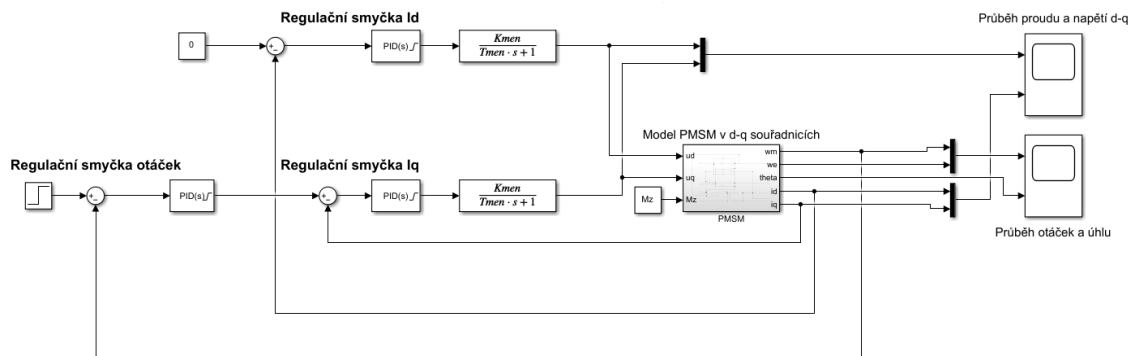
$$F_{reg_ω}(p) = \frac{(1 + 4p\tau_{c\omega})(1 + p\tau_{iq})}{\tau_0} \quad (5.23)$$

a dále je možné z přenosu jednotlivé složky PID regulátoru vyjádřit následovně:

$$F_{reg_ω}(p) = \underbrace{\frac{\tau_{iq} + 4\tau_{c\omega}}{\tau_0}}_{K_p} + \underbrace{\frac{1}{\tau_0}}_{K_i} \frac{1}{p} + \underbrace{\frac{4\tau_{c\omega}\tau_{iq}}{\tau_0}}_{K_d} p. \quad (5.24)$$

5.3 Výpočet a simulace regulátorů

Pro provedení výpočtů regulátorů a simulaci bylo použito prostředí Matlab/Simulink. V rámci Simulinku je zapojen model PMSM spolu s kaskádními regulátory (viz obrázek 5.3).



Obr. 5.3: Zapojení regulačního schématu v programu Matlab/Simulink

Pro výpočty regulátorů byly použity informace o motoru získané identifikací motoru (přehledně v předešlé kapitole, tabulka 4.2). Dále je nutné stanovit časové

parametry a jednotlivá zesílení. Frekvence generované PWM byla zvolena 30kHz pro potlačení vzniku nepříjemných slyšitelných tónů. Z ní vychází časová konstanta měniče:

$$\tau_{men} = \frac{1}{f_{pwm}} = \frac{1}{30 \cdot 10^3} = 33,3\mu s \quad (5.25)$$

a jeho zesílení odpovídá díky vstupnímu rozsahu parametru plnění PWM 0 – 100% hodnotě napájecího napětí měniče:

$$K_{men} = U = 42. \quad (5.26)$$

Převod hodnot ze snímače proudu a otáček je řešen v rámci FW, proto je uvažováno zesílení 1:

$$K_{ci} = K_{c\omega} = 1. \quad (5.27)$$

Snímač otáček bude vzorkován s taktem 10 kHz, tudíž jeho časová konstanta odpovídá:

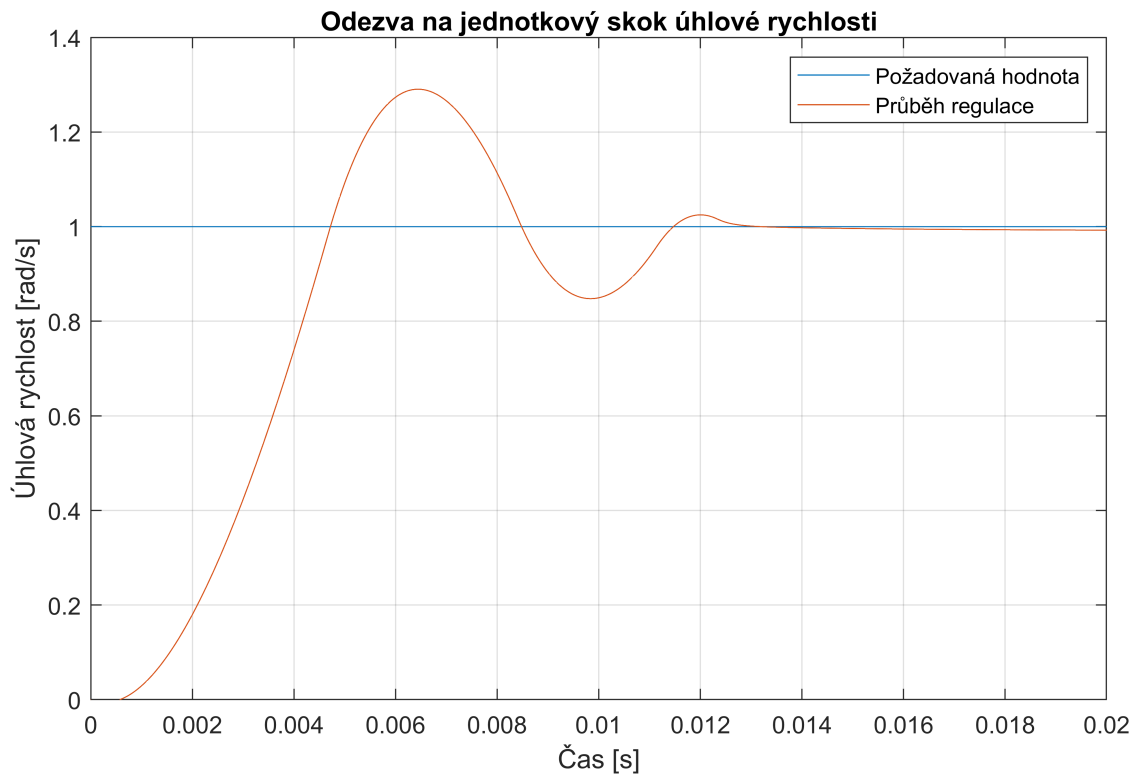
$$\tau_{c\omega} = \frac{1}{f_{c\omega}} = \frac{1}{10 \cdot 10^3} = 100\mu s. \quad (5.28)$$

Nyní jsou k dispozici všechny potřebné údaje pro provedení výpočtu regulátorů, ty byly dosazeny do vzorců z předchozích kapitol o návrhu regulátoru (rovnice 5.15 a 5.24. Pouze pro regulátor úhlové rychlosti byla z důvodu optimalizace přechodové charakteristiky ručně doladěna konstanta integrační složky (původní hodnota 359700), regulační průběhy ostatních regulátorů odpovídaly požadavkům. Výsledkem jsou koeficienty uvedené v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Výsledné koeficienty regulátorů

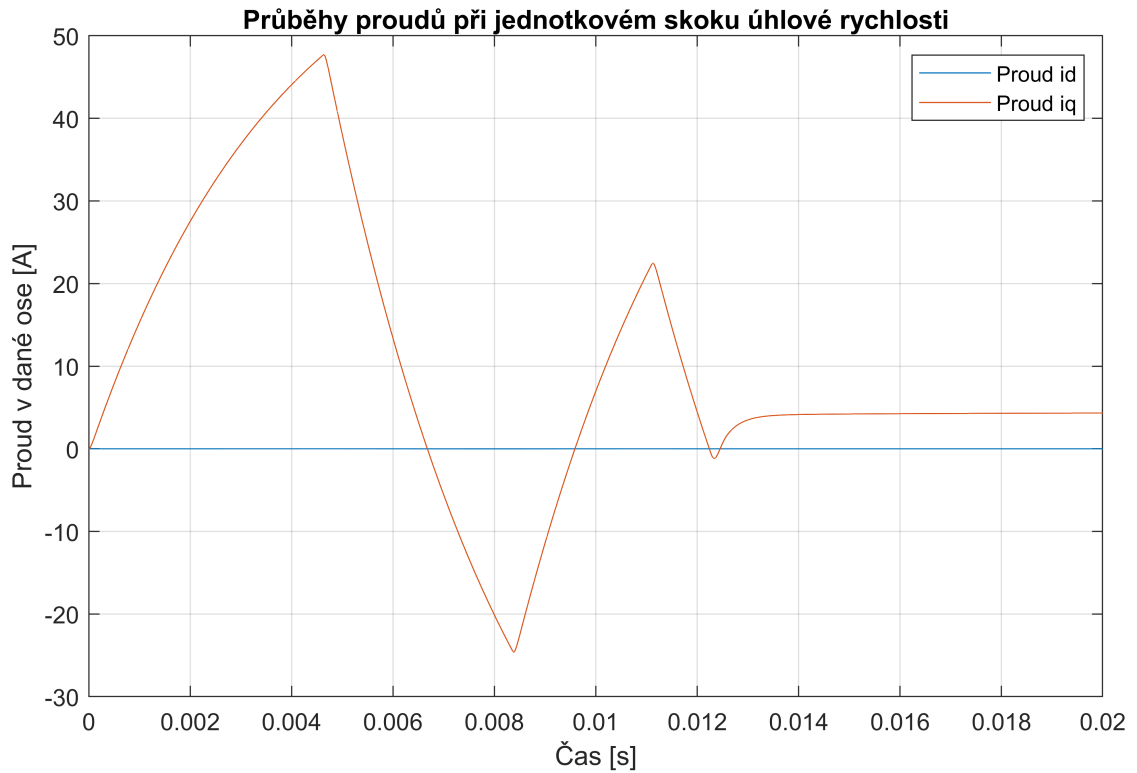
Regulátor	K_p	K_i	K_d
Regulátor I_d	0,918	220,7	0
Regulátor I_q	0,836	220,7	0
Regulátor ω	156,9	1000	155,9

Pro výsledné regulátory byla zaznamenána odezva jednotlivých veličin na jednotkový skok požadované úhlové rychlosti (viz obrázek 5.4).



Obr. 5.4: Odezva na jednotkový skok úhlové rychlosti

Regulátor otáček překmitne až na 130% regulované hodnoty a po čase 14 ms dojde k ustálení. Překmit zde není na závadu, požadavek byl kladen na rychlost regulace. Průběhy proudů i_d a i_q jsou na obrázku 5.5).

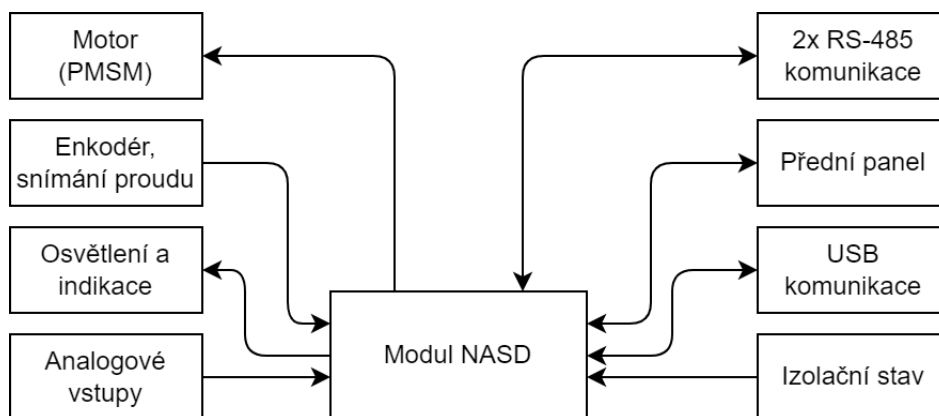


Obr. 5.5: Průběhy proudů při jednotkovém skoku úhlové rychlosti

Dalšího zlepšení regulačních vlastností by bylo možné docílit ručním doladěním konstant na základě odezvy, avšak v tomto případě je průběh regulace dostačující. Šlo zejména o ověření principu, jelikož ve výsledku nebude na požadavek klienta FOC realizována (viz kapitola 7.2.1).

6 Návrh hardware

Na základě požadavků z předchozích kapitol, zjištěných údajích o motoru a jeho řízení původním modulem, spolu s řešerší řízení pohonu a norem bylo sestaveno blokové schéma zařízení (obrázek 6.1).



Obr. 6.1: Blokový diagram HW

Řídicí modul bude řídit PMSM za pomoci zpětné z enkodéru a proudu fází. Komunikaci s nadřazenou jednotkou zajistí dvě linky RS-485. Pro světelnou indikaci a případné rozšíření jsou k dispozici výkonové výstupy a analogové vstupy. Jelikož je zařízení napájeno z IT sítě, je součástí také hlídač izolačního stavu. Pro místní diagnostiku bude k dispozici přední panel zařízení, pokročilá diagnostika a parametrizace je umožněna připojením k PC pomocí USB.

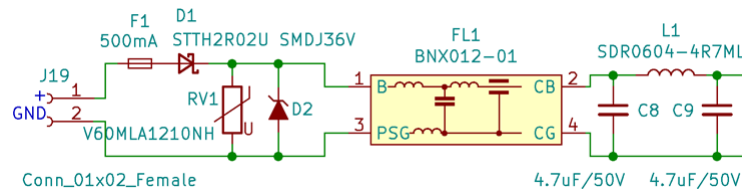
S ohledem na blokový diagram pak bylo navrženo elektrické schéma a následně deska plošných spojů, které budou detailněji popsány v následujících podkapitolách. Výběr vhodných komponent byl ztížen aktuální krizí. Zasáhla například ve výběru mikrokontroléru, kdy model s periferiemi pro řízení motoru byl dostupný pouze v nižší řadě a s nižším počtem vývodů. To se projevilo nejen v návrhu HW, ale také problémy s neoptimálně malým počtem DMA kanálů v rámci firmware. Dalším příkladem je dříve zmíněný způsob snímání proudu pomocí specializovaných IC.

6.1 Napájecí obvody

Napájecí obvody jsou řešeny tak, aby poskytovaly potřebné úrovně napětí jak pro řídicí logiku, tak pro logiku výkonové části. Napájení výkonové části můstků a jeho filtrace je z prostorových důvodů řešena mimo desku zařízení.

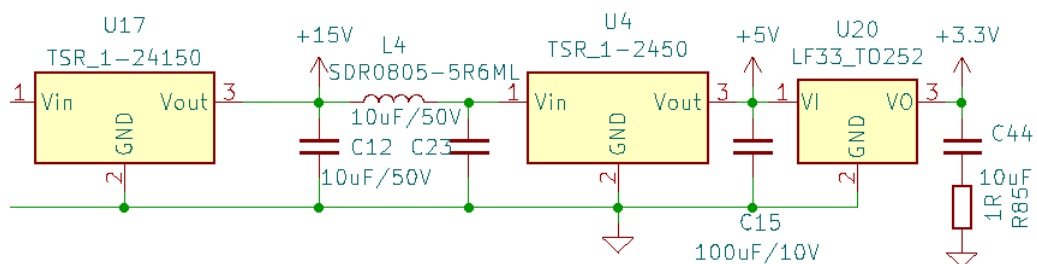
Prvním částí napájecí kaskády je filtrační zapojení spolu s jištěním. Logická část by dle výpočtů a odhadu na základě zkušeností neměla odběrem přesáhnout

hodnotu 400 mA, proto byla pro jistění zvolena vratná pojistka typu PolySwitch se jmenovitým proudem 500 mA. Ochranu proti přepólování napájecího zdroje tvoří spolu s pojistkou Schotkyho dioda D2. Následující dva filtry zajišťují odfiltrování špiček a vyšších harmonických vstupujících do zařízení z napájecího rozvodu a také průchodu rušení v opačném směru ze spínaných zdrojů ven mimo zařízení. Toto je velmi důležité zejména s ohledem na EMC zkoušky, kterými zařízení musí projít dle dříve zmíněných norem. Vstupní napájecí část je na obrázku 6.2.



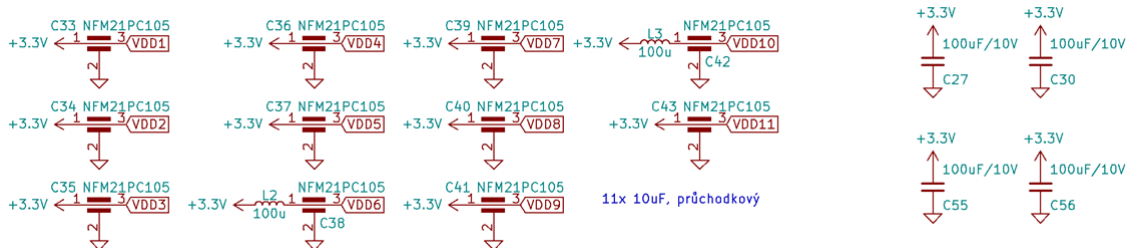
Obr. 6.2: Zapojení vstupních filtrů napájení

Samotné spínané zdroje pro vytvoření vhodných napájecích napětí pro jednotlivé bloky následují po filtraci. První část je tvořena izolovaným spínaným zdrojem od firmy TRACO. Konkrétně jde o model TSR 1-24150, který generuje 15 V pro logickou část 3fázového můstku řídicího motory. Z 15 V se následně vytvoří 5 V pro obvody měření proudu motorem a také 3.3 V lineárním stabilizátorem pro logiku desky. Zapojení zdrojů je na obrázku 6.3, jsou zapojeny v katalogovém zapojení.



Obr. 6.3: Zapojení zdrojové části

Napájecí piny integrovaných obvodů jsou blokovány adekvátními kondenzátory. Vzhledem k dobrým zkušenostem s potlačováním rušení u průchodkových kondenzátorů byly použity v maximální míře tyto (obrázek 6.4).



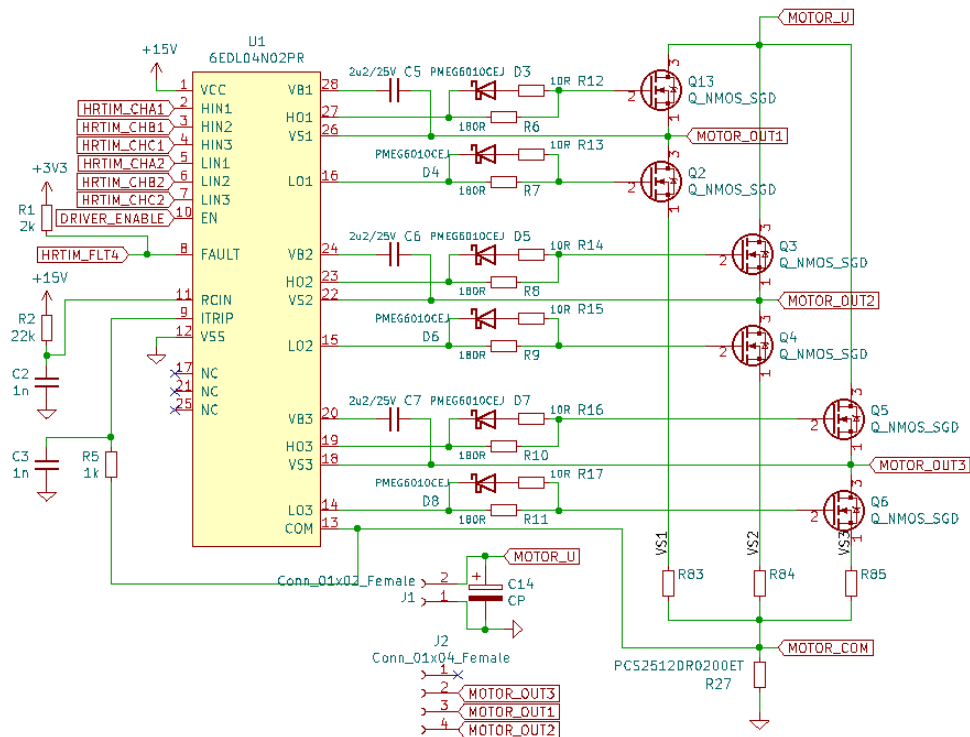
Obr. 6.4: Filtrační kondenzátory (průchodkové a běžné)

6.2 Výkonové budiče motoru

Pro buzení motoru byla vybrána kombinace můstku 6EDL04N02PR od firmy Infineon spolu s výkonovými MOSFETy výrobce Vishay.

Stejný můstek byl použit v původní verzi řídicí desky a po kontrole parametrů a provedení prvních pokusů s můstkem na vývojové desce byl zvolen jako vhodný pro finální řešení. Můstek se vyrábí v dostatečně malém pouzdře TSSOP-28, dokáže pracovat s napětím až 200 V a poskytuje proudy až 0,165/-0,375 A pro buzení výkonových tranzistorů. Obsahuje také integrovanou nadproudovou ochranu formou měření celkového proudu můstku na snímacím rezistoru, integrovanou ochranu proti sepnutí horních a spodních tranzistorů najednou („shoot-through prevention“) a vkládání deadtime. Chybové stavy jsou indikovány řídicí logice pomocí FAULT signálu, tranzistory jsou ovládány vstupy HIN(1-3) pro horní a LIN(1-3) pro spodní.

Tranzistory byly vybírány primárně na základě nízkého odporu v sepnutém stavu pro minimalizaci tepelných ztrát. Výsledkem jsou tranzistory SiSS30DN, s odporem v sepnutém stavu $R_{DSon} = 8,25m\Omega$, maximálním napětím $R_{DS} = 80V$ a maximálním proudem až 54 A. Časy sepnutí také s ohledem na proud poskytnutý budičem odpovídají požadavkům na řízení pomocí PWM. Výhodou je malé pouzdro PowerPAK o rozměrech 3x3 mm, jehož většina spodní části je chladič ploška pro odvod tepla (spojená s vývodem Drain). Díky tomu je možné ušetřit místo na DPS a zároveň nepodcenit chlazení. Celkové zapojení odpovídá doporučenému z katalogového listu s minimálními úpravami, viz obrázek 6.5.

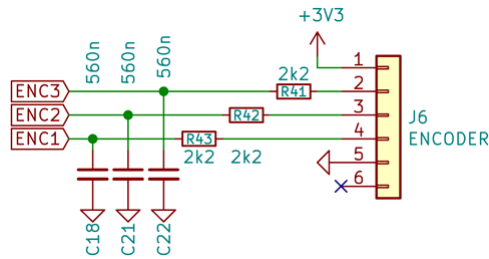


Obr. 6.5: Schéma bloku výkonového buzení motoru

Svorkovnice J1 slouží pro připojení napájení výkonové části, konektor J2 je výstupní (typu Molex 2x2) pro připojení motoru.

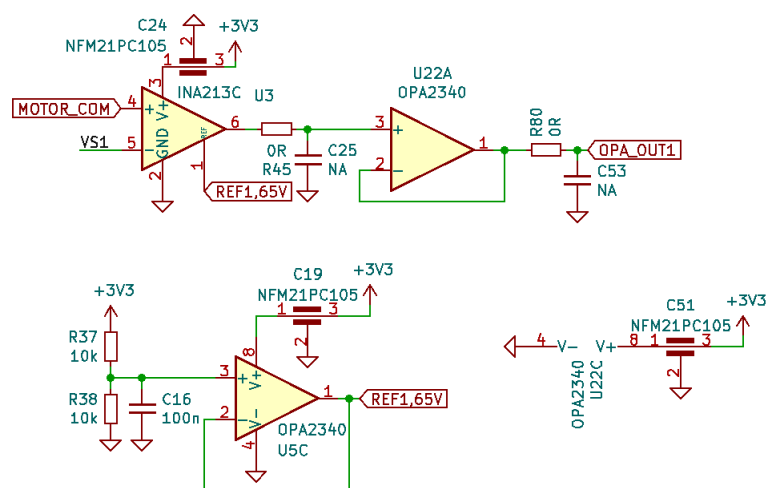
6.3 Zpětná vazba od motoru

Motor poskytuje zpětnou vazbu polohy pomocí enkodéru (viz kapitola 6.3). Po přivedení napájení 3,3V je na dvou vodičích dostupný signál sin a cos, na třetím referenční napětí (střed signálů). Všechny tyto signály jsou po přivedení na desku filtrovány RC filtrem typu dolní propust s $f_{c|-3dB} = 129Hz$. Tak jsou zachovány potřebné pomalu se měnící signály a potlačeno možné rušení od spínání MOSFETů a dalších vnějších vlivů jako jsou napájecí zdroje. Zapojení je na obrázku 6.6.



Obr. 6.6: Vstupní obvody pro připojení enkodéru

Dále je dle teorie řízení nutné měřit proud motorem, viz kapitola 3.2.3. Jak je popsáno ve zmíněné kapitole, bylo zvoleno měření proudu ve spodních části můstku. Pro měření je výhodné použít specializované integrované obvody, které jsou pro měření úbytků na malých rezistorech uzpůsobeny a samozřejmě jsou rail-to-rail vstupy. Pro tuto aplikaci byly použity integrované obvody INA213C. Jedná se o rychlý IC pro snímání proudu pomocí úbytku na snímacím rezistoru, schopný pracovat až do napětí 26V mezi snímacími piny a GND. Samotné diferenční napětí nesmí přesáhnout $\pm 100\mu V$, obvod zde poskytuje zesílení 50 V/V. Výstup z měřicího obvodu je možné filtrovat RC filtrem s vysokou hodnotou odporu, pro který jsou zde připraveny patice. Dále je signál oddělen OZ v zapojení bufferu pro impedanční přizpůsobení tak, aby nebyl nadměrně zatížen výstup měřicího IC a zároveň aby byly splněny požadavky na vstupní odpor pro ADC mikrokontroléru. Díky tomu by bylo možné také za oddělovačem připravit RC filtr typu dolní propust pro případné použití v budoucnu, bude-li třeba. Kompletní zapojení měření proudu je na obrázku 6.7.

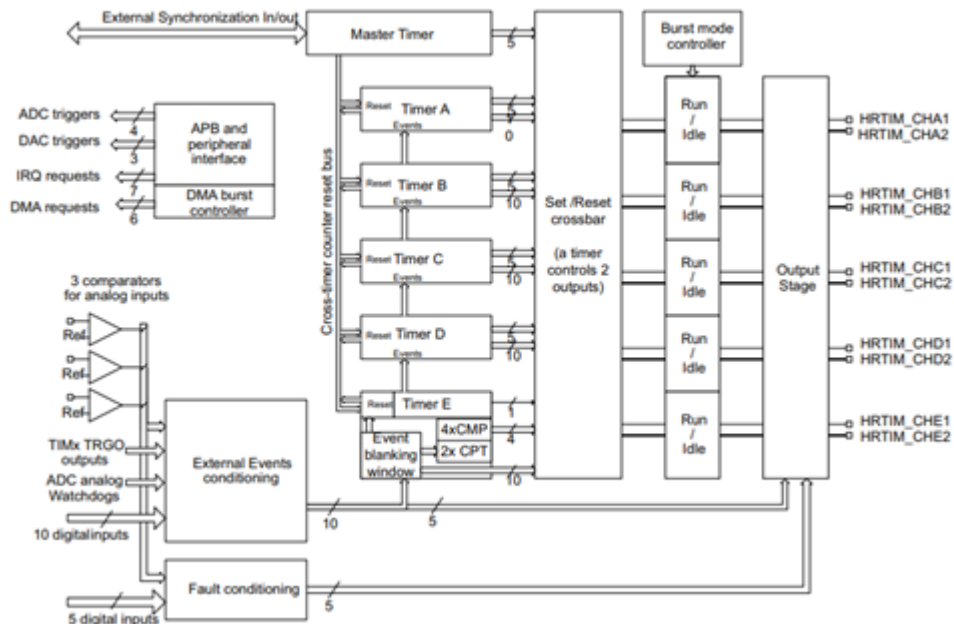


Obr. 6.7: Schéma zapojení měřicích obvodů proudu

6.4 Řídicí logika

Jako jádro systému byl zvolen mikrokontrolér (MCU) STM32F334, z řady specializující se na řízení výkonových měničů. Mikrokontrolér je založen na jádře ARM Cortex M3, běžícím na frekvenci 72 MHz. Pro program je dostupná 64 kB paměť, která by měla být více nežli dostatečná pro implementaci řídicích a komunikačních algoritmů v kombinaci s 12 kB RAM. Výhodou tohoto typu MCU je přítomnost jednotky FPU (floating point unit) pro akceleraci výpočtů s čísly s plovoucí desetinnou čárkou. Dále také přítomnost dvou 12bitových delta-sigma ADC, celkem 5 časovačů/čítačů pro všeobecné použití (jeden z nich 32bitový), zastoupení standardních komunikačních rozhraní typu USART/I2C/SPI a neméně důležitý specializovaný časovač pro řízení motorů (HRTIM).

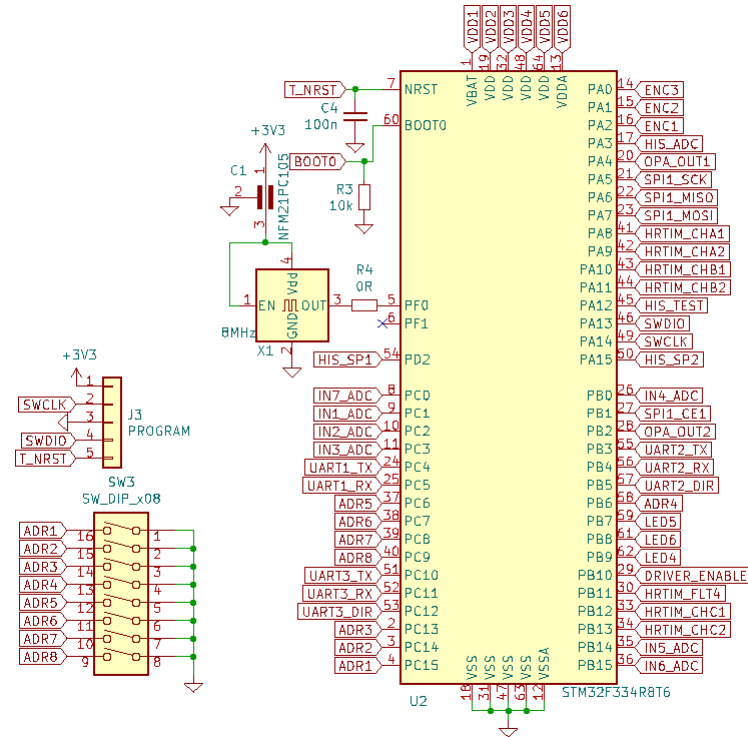
Časovač HRTIM (obrázek 6.8) poskytuje široké spektrum možných nastavení pro generování signálů. Sestává z hlavního časovače (Master Timer) a 5 sekundárních, se kterými může interagovat pomocí set/reset crossbaru. Každý z časovačů A-E pak má dva konfigurovatelné výstupy. Při detekci chyby např. můstku indikovanou změnou stavu pinu je možné provést hardwarové odstavení. Další možnosti nabízí také propojení s integrovanými periferiemi jako ADC, časovače a komparátory. Tento časovač bude využit pro řízení 3fázového můstku.



Obr. 6.8: Blokové schéma HRTIM [19]

Další důležitou funkcionalitou je připojení analogových vstupů, komunikačních

linek RS-485, adresacího/konfiguračního DIPswitche (SW3) a několika indikačních LED. Schéma MCU části s podpůrnými součástkami a možností osazení externího oscilátoru je na obrázku 6.9.

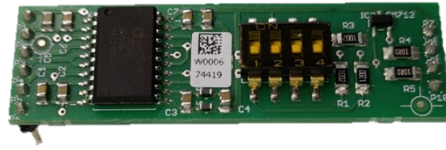


Obr. 6.9: Zapojení hlavního mikrokontroléru

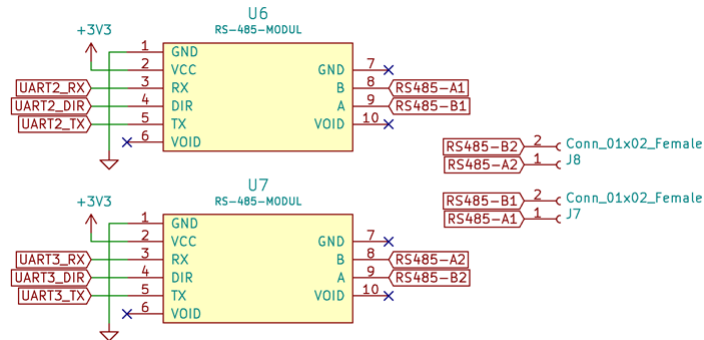
Jednou z nevýhod, které se projeví v návrhu byla nedostupnost mikrokontroléru STM32F334 nebo alternativy s HRTIM v pouzdech s větším počtem vývodů. Proto byly některé funkce přeneseny na pomocný MCU integrující uživatelské rozhraní a výstupy zařízení, komunikující přes rozhraní SPI (viz kapitola 6.7.1).

6.5 Komunikační linky RS-485

Ze zadání plyne potřeba komunikace po rozhraní RS-485, nejlépe s možností osazení izolovaných (4kV) i neizolovaných budičů. Proto byly s výhodou použity firmou dříve vyvinuté moduly pro RS-485 komunikaci. Ty se připojují jednoduchým zasazením do DPS na dvou kolíkových lištách (viz obrázek 6.10 a obrázek 6.11). Na těchto konektorech jsou dostupné jak vstupní signály (Rx, Tx, směr), tak napájení a výstupní signály (A, B).



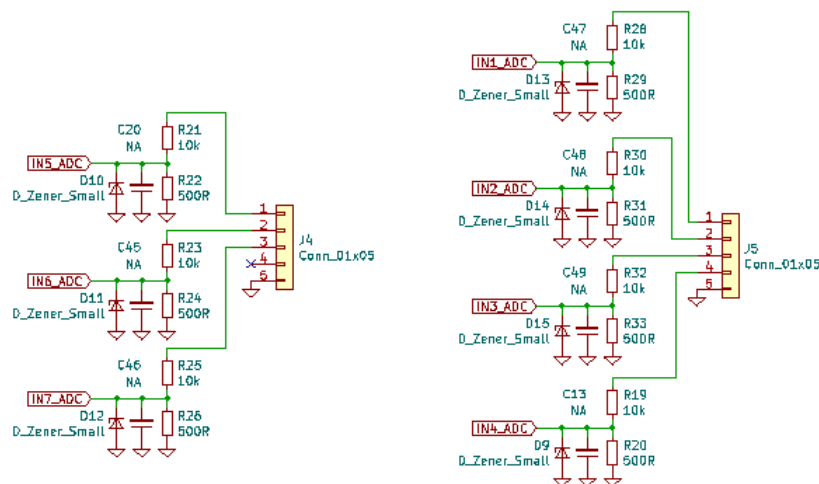
Obr. 6.10: Modulek RS-485 s izolací 4kV



Obr. 6.11: Zapojení komunikačních modulů linek RS-485

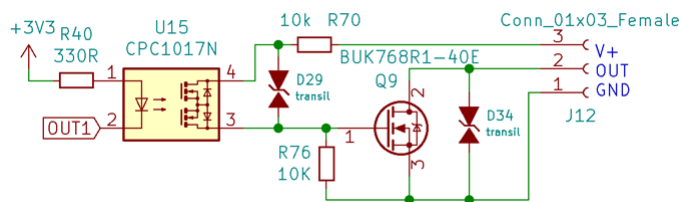
6.6 Vstupně/výstupní porty

Pro interakci s okolím je k dispozici několik vstupních a výstupních portů. Vzhledem k očekávané instalaci v zařízení s rozdílnými napájecími napětími (maximální o hodnotě 42 V) bylo rozhodnuto o použití analogových vstupů s velkým rozsahem při zachování rezervy a rozumného rozlišení. Tyto požadavky splňují navržené odporové děliče z rezistorů o běžně dostupných hodnotách ($10k\Omega$ a 500Ω), poskytující rozsah vstupního napětí cca 0–67 V s rozlišením 16 mV při použití integrovaného ADC v MCU. Pro ochranu mikrokontroléru jsou také použity Zenerovy diody s $U_Z = 3,3$ V a je k dispozici patice pro filtrační kondenzátor v případě potřeby. Celé zapojení 6 vstupů je na obrázku 6.12.



Obr. 6.12: Analogové vstupy desky

Výstupy jsou také uzpůsobeny pro co největší univerzálnost v rámci zařízení s více napájecími zdroji. Každý z výstupů (celkem 4) je galvanicky oddělen a spolehlivě zvládne spínání požadovaných 10 A při 24 V. Vzhledem k vývojovému prototypu, možnému budoucímu použití a minimalizaci ztrát na spínacím prvku byly výstupy značně naddimenzovány použitím tranzistoru s maximálním teoretickým proudem až 75 A a napětím až 40 V. Výstup je samozřejmě doplněn adekvátními ochranami v podobě transilů, zabraňujícím zničení tranzistoru přepětím (D34 a D29 na 36 V). V případě zničení tranzistoru je pak nutná pouze jeho výměna, budící optočlen je ochráněn. Schéma jednoho z výstupů je na obrázku 6.13.



Obr. 6.13: Galvanické oddělení výstupů

6.7 Údržbářské rozhraní

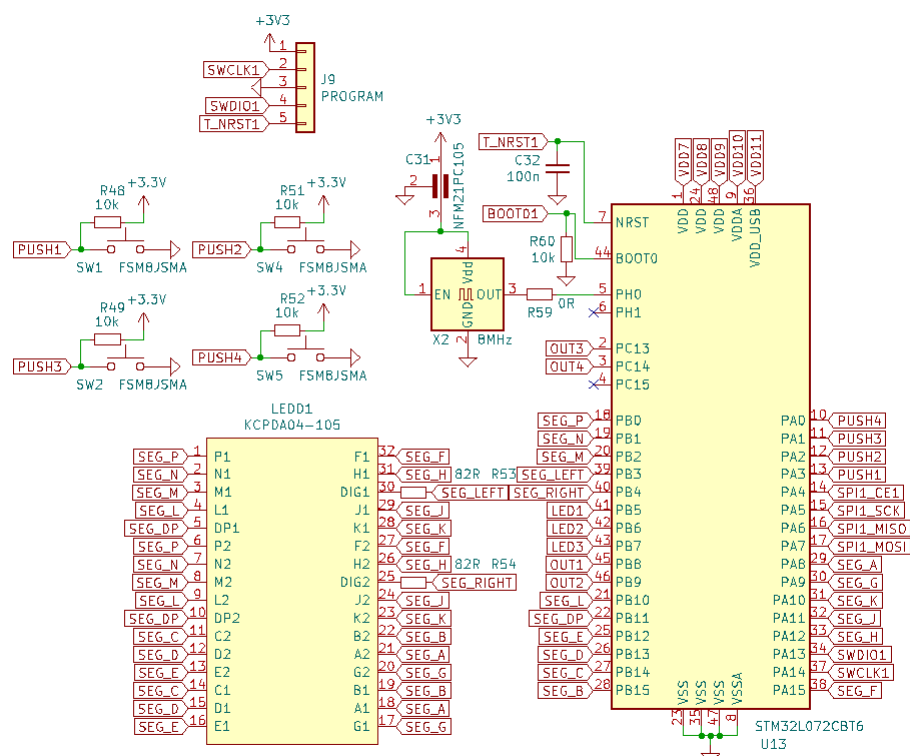
Rozhraní pro udržujícího pracovníka se skládá ze dvou částí - předního panelu zařízení pro místní rychlou parametrizaci a indikaci a USB-C rozhraní pro pokročilou

parametrizaci a diagnostiku za pomoci počítače. Zapojení obou částí je rozebráno v následujících kapitolách.

6.7.1 Přední panel

Přední panel zařízení bude sloužit pro indikaci, nastavení parametrů a diagnostiku. Z důvodů univerzálnosti je tedy koncipován jako duální 15segmentový displej s indikačními LED a čtyřmi tlačítky, která by mohla být použity například pro pohyb v menu.

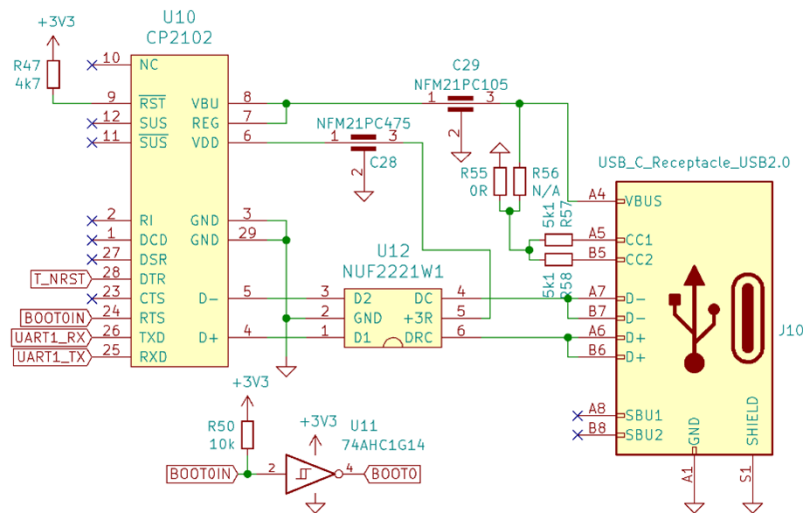
Základem je mikrokontrolér řady STM32L0xx (varianta L nebyla nutná, avšak vzhledem k nedostupnosti součástek byly využity vlastní skladové zásoby), který komunikuje s hlavním MCU po sběrnici SPI vhodně navrženým protokolem. Dále zapojení obsahuje podpůrné obvody pro zajištění vhodných napěťových úrovní na pinech BOOT a NRST, programovací konektor, patici pro případné osazení externího oscilátoru a samozřejmě dříve zmíněná 4 tlačítka, 6 indikačních LED a duální 15segmentový displej. Displej je multiplexován (tj. vždy svítí jen jedna číslice), v tomto případě jsou dokonce multiplexovány jednotlivé segmenty, což zjednodušilo zapojení a ušetřilo spínací tranzistory. Schéma zapojení předního panelu je na obrázku 6.14.



Obr. 6.14: Zapojení pomocného MCU (přední panel)

6.7.2 Komunikace přes USB-C

Pro zlepšení možností ladění (přenos naměřených hodnot atd.), případně možnosti parametrizace nasazeného zařízení a vyčítání diagnostických údajů na PC bylo doplněno komunikační rozhraní USB-C. Jedná se o virtualizovanou sériovou linku RS-232 v 3,3V logických úrovních připojenou na sériový port MCU (jednotu UART). Zapojení je na obrázku 6.15.



Obr. 6.15: Zapojení komunikačního rozhraní USB-C

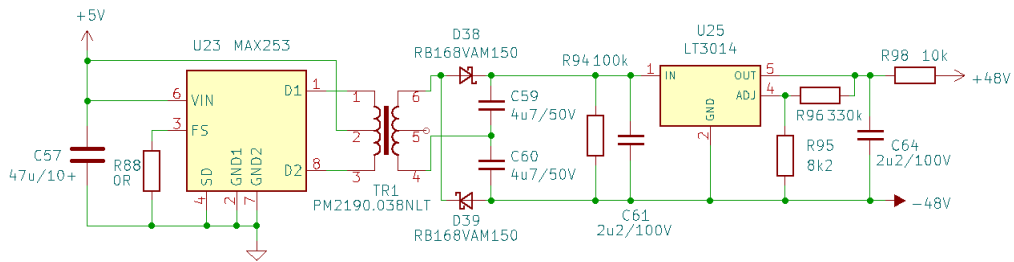
Díky použití UART1 a napojení BOOT a NRST pinů mikrokontroléru na piny převodníku pro řízení směru komunikace a indikaci je možné z PC také přehrání firmware pomocí integrovaného bootloaderu od ST. Ten se aktivuje přivedením log. 1 na pin BOOT0 při resetu MCU, jak napovídá tabulka 6.1 (bootloader je umístěn v „System memory“).

Tab. 6.1: Výběr boot módů MCU – volně převzato z [19]

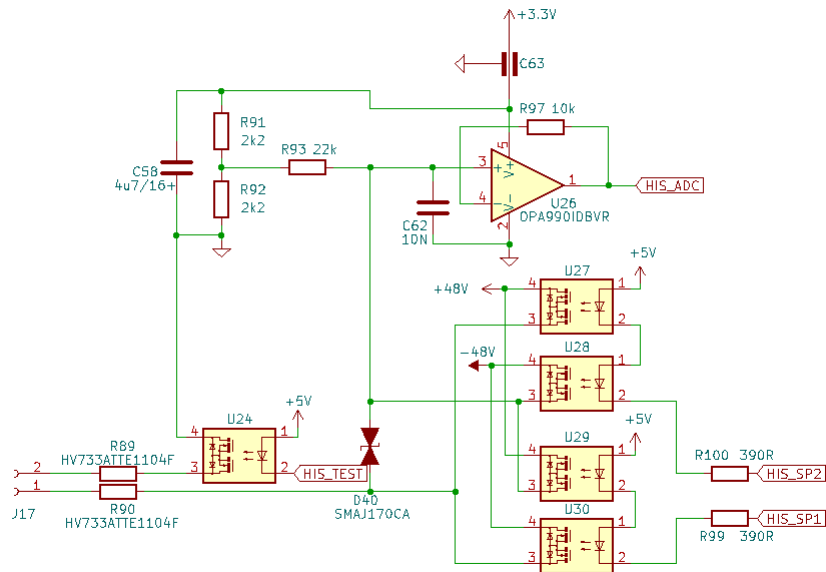
Boot mode selection		Boot mode
nBOOT1	BOOT0	-
X	0	Main Flash memory
1	1	System memory
0	1	Embedded SRAM

6.8 Hlídní izolačního stavu

Vzhledem k napájení zařízení IT (izolovanou) sítí je nutné hlídání izolačního stavu mezi sítí a zemí. Případné porušení není životu nebezpečné, avšak je nutné jej indikovat pro servisní zásah. Samotné měření probíhá aplikováním izolovaného napětí 48V (vytvořeného zdrojem na obrázku 6.16) mezi referenční napětí a zemní vodič (svorka J17 1,2). Případné narušení izolačního stavu se projeví jako změna referenčního napětí na operačním zesilovači. Měřicí obvody umožňují měření v obou polaritách a kontrolu funkce testovacím optočlenem (viz obrázek 6.17).



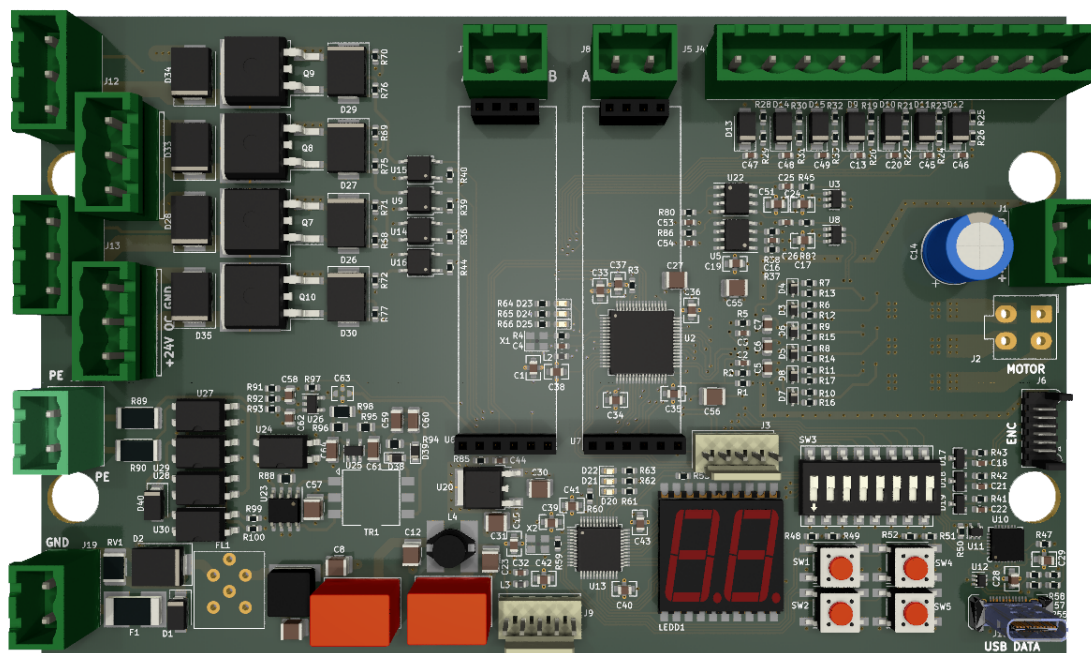
Obr. 6.16: Zapojení izolovaného zdroje 48V



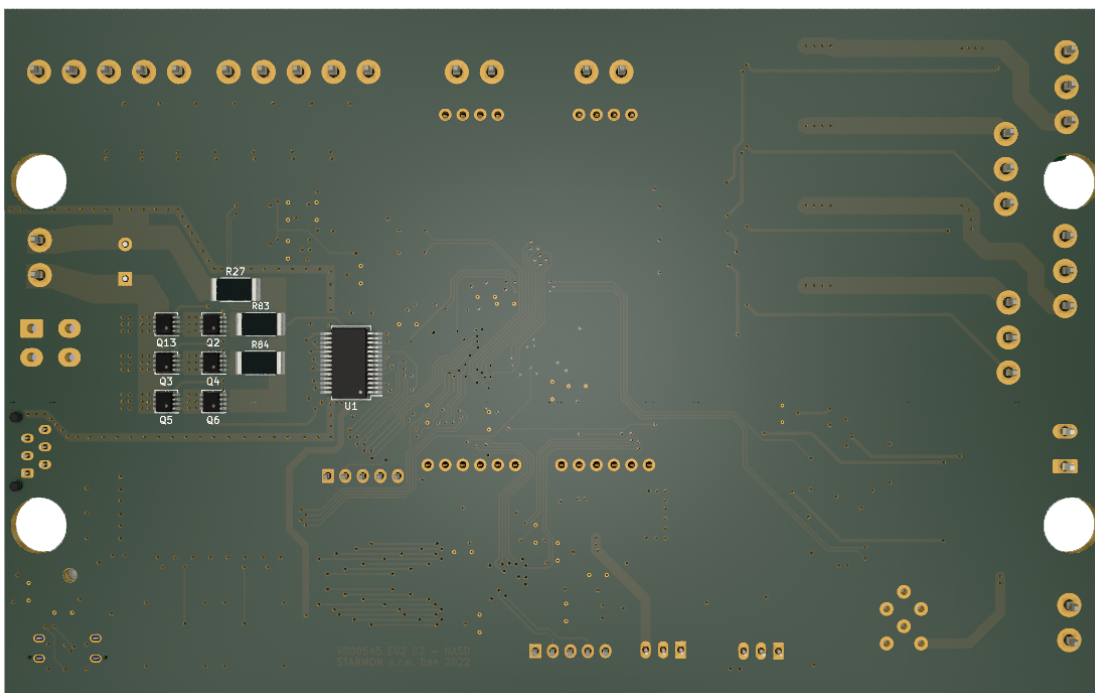
Obr. 6.17: Zapojení hlídače izolačního stavu

6.9 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů (DPS) byla navržena standardním postupem v návrhovém programu KiCAD dle vnitřních standardů firmy. Jedná se o čtyřvrstvou DPS cílenou svou velikostí tak, aby mohla být usazena ve standardně používaném hliníkovém profilu pro jednodušší montáž i chlazení výkonových součástí. Rendery DPS jsou na obrázcích 6.18 a 6.19.



Obr. 6.18: Render DPS – horní strana



Obr. 6.19: Render DPS - spodní strana

V levé části DPS se nachází obvody výkonových výstupů, pravá horní část je věnována vstupním obvodům. Vpravo dole je ovládací rozhraní spolu s pomocným MCU, displejem, ovládacími tlačítky a také adresačním DIP přepínačem a USB-C rozhraním. Nad ním je z prostorových důvodů umístěna výkonová část s budičem a tranzistory 3fázového můstku (ze spodní strany z důvodu chlazení). Obvody snímání proudu a obvody enkodéru jsou od této části odděleny prokovenými zemními plochami pro minimalizaci vlivu rušení vznikajícího spínáním na obvody zpětné vazby. Uprostřed desky je pak umístěn hlavní mikrokontrolér, nad kterým se budou nacházet moduly umožňující RS-485 komunikaci.

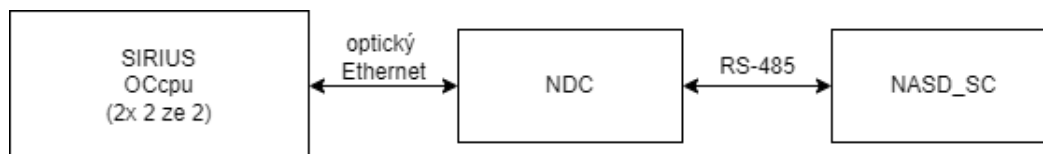
Pro splnění norem EMC a zlepšení funkce zařízení je mimo jiné výhodou dříve zmíněná realizace formou 4 vrstvé DPS, využití filtrů v napájení, použití průchodkových kondenzátorů a zemních oddělovacích ploch. Kompletní schéma zapojení a výkres desky plošných spojů jsou k dispozici v elektronické podobě v příloze.

7 Firmware a software

Firmware zařízení je rozdělen mezi dva mikrokontroléry, jak bylo zmíněno dříve. Hlavní mikrokontrolér pak komunikuje s nadřazeným systémem, případně PC aplikací za pomoci navrženého komunikačního protokolu. V rámci této kapitoly bude nejprve navržen komunikační protokol, následně oba struktury firmware obou mikrokontrolérů a samotnou logikou řízení dveří. Nakonec je prezentována PC aplikace pro parametrizaci a ovládání modulu.

7.1 Komunikační protokol

V rámci zadání je nutná implementace komunikačního protokolu, který zajistí možnost vzdáleného ovládání řídicího modulu. Jelikož nadřazený systém spolehlivé části bude obsahovat jádro SIRIUS (komponenty distribuovaného systému zabezpečovacího zařízení firmy STARMON) upravené pouze pro spolehlivou činnost bez bezpečnostní relevance, vychází komunikační protokol z existujícího protokolu PSIRIUS. Není tak nutná úprava kódu v datových koncentrátorech systému (NDC). Datový koncentrátor je připojen optickou linkou Ethernet k řídicímu modulu systému (OCcpu). NDC poté komunikuje po sběrnici RS-485 s vyvíjeným řídicím modulem dveří (NASD-SC). Vše vysvětluje obrázek 7.1.



Obr. 7.1: Komunikace OCcpu - NASD_SC

Přesná definice komunikačního protokolu PNASD (protokol nástupištích dveří, vycházející z PSIRIUS) je tajemstvím firmy, avšak je možné říci, že se výsledný paket pro NDC skládá z více částí (P2,P1,P0), obsahující balíčky pro jednotlivá NDC a v nich data pro cílové prvky. Dále nás bude zajímat právě datový paket pro řídicí modul, který obdrží na lince RS-485.

7.1.1 Paket povelu OCcpu → NASD_SC (P0_RS485)

V rámci fáze návrhu byly identifikovány jednotlivé povel, které musí NASD-SC přijímat. Jedná se o tyto:

- Zjištění stavu dveří (povel *GET_STATE* - paket *P0_GENERAL*)

- Změna stavu dveří (povel *SET_STATE* - paket *P0_STATE*)
- Načtení konfigurace (povel *GET_PARAMS* - paket *P0_GENERAL*)
- Nastavení konfigurace (povel *SET_PARAMS* - paket *P0_SET_PARAMS*)
- Nastavení osvětlení a indikace LED pásky (povel *SET_LEDS* - paket *P0_SET_LEDS*)

Všechny povely P0 (a následně i odpovědi C0, viz následující kapitola) jsou zabezpečeny proti chybě při přenosu kontrolním součtem CRC32. Dále obsahují adresu cílového modulu, číslo verze protokolu, proprietární data a nakonec data samotného povelu. Podle typu povelu jsou přenášeny 4 různé pakety: P0_GENERAL, P0_SET_STATE, P0_SET_PARAMS, P0_SET_LEDS. obsah popisují tabulky 7.1, 7.2, 7.3 a 7.4.

Tab. 7.1: Paket P0_GENERAL

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
—	(18B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Tab. 7.2: Paket P0_SET_STATE

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
state	uint8_t	Stav
—	(17B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Tab. 7.3: Paket P0_SET_PARAMS

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
lengthOpen1	uint8_t	Poloha otevřeno-1 [cm]
lengthOpen2	uint8_t	Poloha otevřeno-2 [cm]
—	(2B)	Proprietární parametrizace zavírání
retriesDelay	uint8_t	Prodleva před opakováním zavření [100ms]
—	(3B)	Proprietární parametrizace zavírání
—	(9B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Tab. 7.4: Paket P0_SET_LEDS

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
leds	uint8_t	Stav LED
—	(17B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Jednotlivé položky byly vysvětleny na odpovídajících místech v tabulkách paketů. Výjimku tvoří *doorAddress*, která nabývá hodnot 0-65535, avšak hodnota 0 je rezervována pro broadcast přenos. Na takovýto povel poté moduly neodpovídají, pouze jej zpracují. Možnost broadcast komunikace byla navržena z důvodu synchronizovaného otevírání vícero dveří, bez nutnosti každé povelovat zvlášť, což by způsobovalo další zpoždění. Důležitou hodnotou je také parametr *state*, který určuje požadovaný pohyb dveří a může nabývat následujících hodnot:

- UNLOCK (=0)
- OPEN1 (=1)
- OPEN2 (=2)

- CLOSE (=3)
- E-STOP (=4)

Stav *UNLOCK* umožňuje přiřazení křídel dveří motorem k sobě v zamčeném stavu, aby bylo možné výstupem bezpečné části odjistit zamykací mechanismus. *OPEN1* a *OPEN2* otevřou dveře do jedné z nastavených poloh, *CLOSE* vyvolá zavírací sekvenci a E-STOP umožní nouzové zastavení v kterékoliv fázi pohybu zabrzděním motorem.

Dále je speciální parametr *sequenceNumber*, který je inkrementován každou smyčkou komunikace (převzato z PSIRIUS). Nakonec zabezpečení proti chybě při přenosu pomocí *CRC* realizuje standardní CRC32 výpočet HW jednotkou CRC s ethernetovým polynomem.

7.1.2 Paket odpovědí NASD_SC → OCcpu (C0_RS485)

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, kromě broadcast adresy modul odpovídá na povel paketem C0, a to podle typu přijatého povelu:

- P0_GENERAL → C0_GENERAL
- P0_STATE → C0_GENERAL
- P0_SET_PARAMS → C0_GET_PARAMS
- P0_SET_LEDS → C0_GENERAL

Pakety mají obdobnou strukturu jako pakety P0, jejich detailní popis následuje v tabulkách 7.5 a 7.6.

Tab. 7.5: Paket C0_GENERAL

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
simplifiedTxState	uint8_t	Aktuální stav dveří
currentLen	int16_t	Aktuální poloha [cm]
targetLen	int16_t	Cílová poloha [cm]
currentSpeed	uint8_t	Aktuální rychlost [cm/s]
targetSpeed	uint8_t	Cílová rychlost [cm/s]
—	(2B)	Proprietární informace o zavírání
driverState	uint8_t	Stav budiče tranzistorů můstku [0-chyba / 1-OK]
motorCurrent	uint8_t	Proud motorem [100mA]
—	(7B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Tab. 7.6: Paket C0_GET_PARAMS

Položka	Interpretace	Význam
doorAddress	uint16_t	Adresa modulu NASD-SC
protocolVersion	uint8_t	Verze komunikačního protokolu
—	(5B)	Proprietární data
sequenceNumber	uint32_t	Časově sekvenční značka
command	uint8_t	Povel
simplifiedTxState	uint8_t	Aktuální stav dveří
lengthOpen1	uint8_t	Poloha otevřeno-1 [cm]
lengthOpen2	uint8_t	Poloha otevřeno-2 [cm]
—	(2B)	Proprietární parametrizace zavírání
retriesDelay	uint8_t	Prodleva před opakováním zavření [100ms]
—	(3B)	Proprietární parametrizace zavírání
—	(9B)	Nepoužitá data
CRC	uint32_t	CRC32

Za zmínku stojí parametr *simplifiedTxState*, který udává zjednodušený stav vnitřního stavového automatu řízení dveří. Může nabývat následujících hodnot:

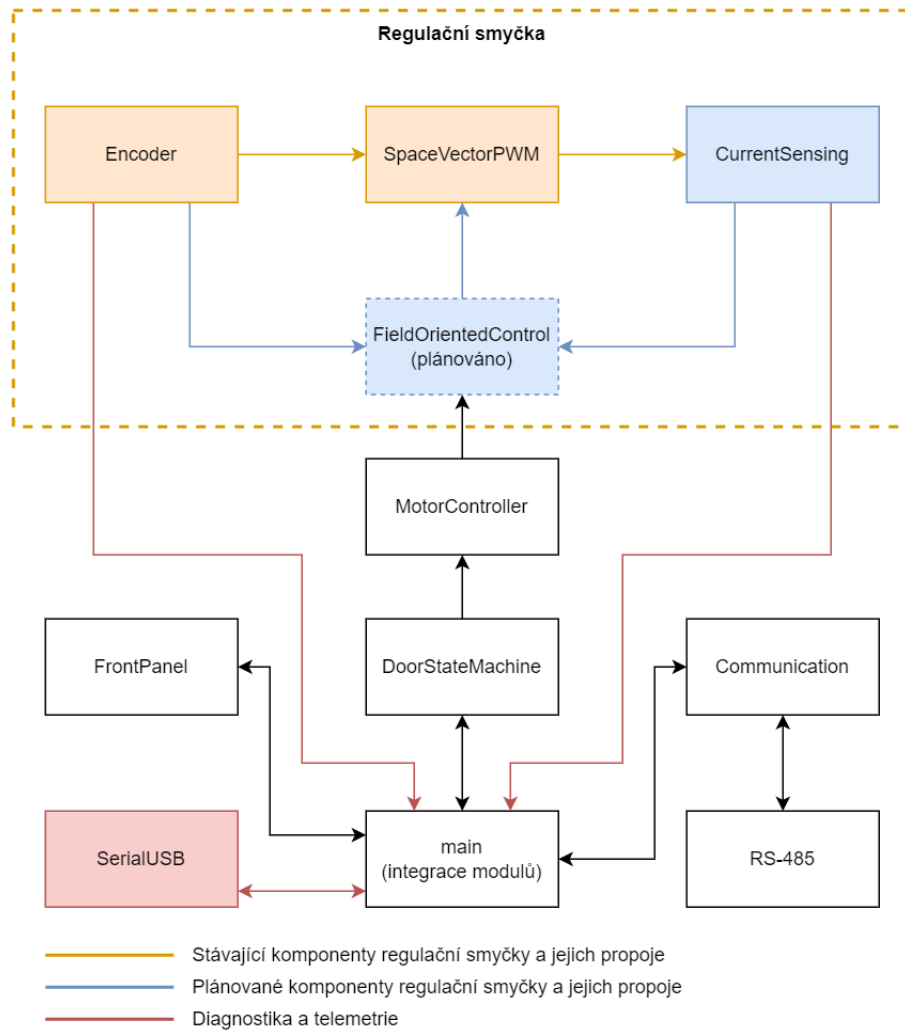
- OPENING (=0)
- OPEN1 (=1)
- OPEN2 (=2)
- CLOSING (=3)
- CLOSED (=4)
- OBSTACLE (=5)
- E_STOP (=6)
- TRAVELING_TO_UNLOCK_POSITION (=7)
- WAITING_FOR_UNLOCK (=8)

Pomocí takto podrobných stavů je možné rozlišit jednotlivé pod-kroky otevírání (*OPENING*, *OPEN1*, *OPEN2*), zavírání (*CLOSING*, *OBSTACLE*, *CLOSED*), procesu odemykání (*TRAVELING_TO_UNLOCK_POSITION*, *WAITING_FOR_UNLOCK*) a samozřejmě také nouzové zastavení (*E_STOP*). Stavový automat bude podrobněji popsán v kapitole 7.2.2.

7.2 Firmware hlavního MCU

Firmware hlavního mikrokontroléru je psán v jazyce C++ s ohledem na omezení dané embedded zařízením. Nejsou proto využívány například dynamické alokace nebo výjimky. Pro abstrakci hardware a pomoc s inicializací komplexnějších periférií byla využita volně dostupná knihovna od ST Microelectronics z řady STM32Cube s názvem STM32CubeF3.

Celý program je rozdělen do několika tříd, které mezi sebou navzájem komunikují. Názorně rozdělení ilustruje obrázek 7.2.



Obr. 7.2: Hlavní MCU - blokové schéma programu

V hlavní smyčce programu (blok *main*) nejprve dojde k inicializaci všech modulů a následně se přechází do hlavní smyčky, kde je periodicky obsluhována komunikace (třída *Communication*) a volán stavový automat dveří z modulu *DoorStateMachine*, jemuž se zde také předávají přijaté povely. Smyčka běží s taktem 1ms.

7.2.1 Řízení pohonu a jeho moduly

Původním záměrem bylo řízení motoru pomocí FOC, jejíž principy byly popsány v kapitole 3.2.3. Toto řízení poskytuje nesporné výhody v rámci zpětné vazby proudu a je široce používaným způsobem v oblasti řízení PMSM. Proto byl firmware (a hardware) vyvinut tak, s ohledem na jednoduchou integraci těchto metod (viz plánovaný modul *FieldOrientedControl* spolu s implementovanými transformacemi v pomocném souboru *Transformations.cpp/.h* a dokončené podřízené moduly v nákrese na

obrázku 7.2). Avšak z důvodu pozdějšího požadavku klienta na specifické řízení bez proudové vazby byl implementován jiný způsob, popsáný níže.

Požadovaný způsob spočívá v odstranění proudové zpětné vazby, se kterou měl klient špatné zkušenosti u původní elektroniky. Na jejím místě byla použita pouhá kontrola dráhy za pomoci dat z enkodéru, čímž má být detekována překážka na dráze. Navíc je při zavírání využito zvláštního způsobu dodávání energie do motoru, který minimalizuje nárazové síly, avšak jeho detaily si klient nepřeje zveřejňovat. Poskytnuté zdrojové kódy jsou proto v této části nekompletní, stejně jako některé části ovládací aplikace a komunikačního protokolu (v sekci nastavení a logů rychlosti).

Řízení pohonu se skládá z těchto modulů:

- Encoder
- SpaceVectorPWM
- CurrentSensing

Encoder

Třída zpracovává analogové signály z enkodéru, které na pozadí vzorkuje jeden z A/D převodníků automaticky spouštěný časovačem o frekvenci 1kHz. Data automaticky přenáší do paměti DMA (direct memory access). Na základě dat jsou spočteny a poskytovány údaje o aktuálním mechanickém a elektrickém úhlovém natočení, rychlosti a poloze v cm.

SpaceVectorPWM

Modul obsahuje rutiny pro nastavení časovače s vysokým rozlišením (HRTIM), pomocí něhož se generuje 3-fázový signál PWM prostorového vektoru (SVPWM). Poskytuje také metody pro nastavení nebo získání aktuálního natočení vektoru a jeho velikost v procentech a ovládání signálu povolení samotného budiče motoru.

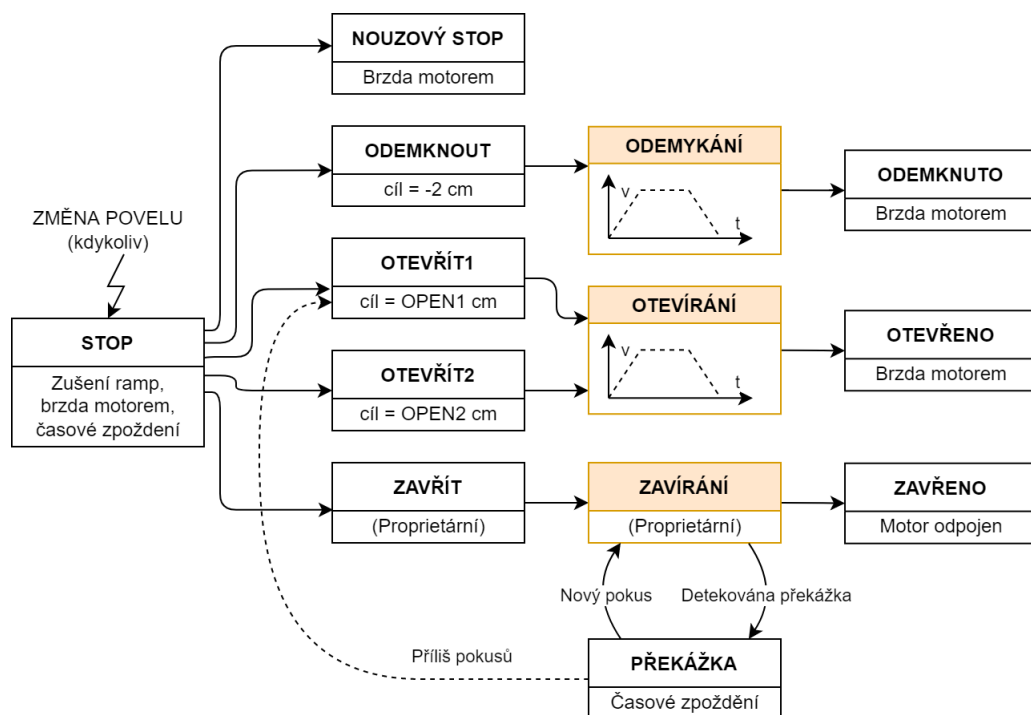
CurrentSensing

S touto třídou bylo počítáno ve zpětné vazbě. Nejprve nastaví druhý z A/D převodníků na automatické spouštění od časovače HRTIM ve všech třech fázích. Proud je pak vzorkován na každé z fází ve třech okamžicích periody SVPWM (jak popisuje teorie v kapitole 3.2.3). Naměřená data uložená do paměti periférií DMA jsou na konci sekvence převodů zpracována a je vypočítán aktuální proud fázemi motoru. Za použití metod jsou proudy zpřístupněny dalším modulům. Tento údaj je nyní používán pouze jako diagnostický, avšak je připraven pro poskytování zpětné vazby pro FOC.

7.2.2 Stavový automat a logika dveří

Nad generátorem SVPWM je v tomto případě třída *MotorController*, která umožňuje generování rampy i speciálního požadovaného průběhu pro zavírání dveří. Generování rampy je realizováno v periodickém volání metody *Tasks* časovačem. V rámci metody je v případě aktivní rampy spočtena požadovaná rychlost na základě aktuálního času, požadované ujeté dráhy a maximální rychlosti. Nejprve dojde ke zrychlení na požadovanou rychlost, poté se pokračuje konstantní rychlostí a nakonec je pohon po rampě zastaven (obě rampy s konstantním zrychlením). Požadovaná rychlost je přepočtena na aktuální natočení vektoru SVPWM a spolu s vypočtenou amplitudou jsou předány generátoru. Amplituda byla z důvodu absence FOC spočtena pomocí lineární závislosti na generované frekvenci 3-fázového signálu.

Logiku dveří řeší modul *DoorStateMachine*. Tento modul pracuje jako stavový automat (viz obrázek 7.3), přijímající povely pomocí poskytované metody. Pokud je vyvolána změna požadovaného stavu, je vynucen přechod do pomocného stavu (na zjednodušeném obrázku znázorněn jako *STOP*), kde je motor nejprve zastaven, aby nemohlo dojít například k nečekané reverzaci pohonu. Poté je dle stavu povelován *MotorController* pro generování ramp.



Obr. 7.3: Zjednodušený náčrt stavového automatu dveří

Přesun do odemykací polohy

Motor je uveden do činnosti rampou s nízkou rychlostí a cílovou pozicí 2cm za běžnou zavírací polohou. Toto umožní deformace nárazové gumy na hraně dveří, proto se v tomto stavu nepředpokládá překážka. Po dojetí do cílové pozice je motor držený zabrzděný zkratem.

Otevření dveří

Pohon je aktivován a rychlost je řízena dle rampy s nakonfigurovanou rychlostí a cílovou pozicí. Jelikož se křídla pohybují mimo uživatelsky dostupný prostor, ani zde není nutná detekce překážek. Po dojetí do cílové pozice je motor opět držený zabrzděný zkratem.

Zavření dveří

I zde je pohon zapnut a pomocí proprietárního algoritmu uvede dveřní křídla do pohybu. Zde již je nutná detekce překážek, jelikož může dojít k nárazu křídla do procházejícího cestujícího. Na základě údaje o skutečné rychlosti z enkodéru je vyhodnocena odchylka od rychlosti otáčení generovaného pole SVPWM. V případě překročení stanovené procentní odchylky dojde k okamžitému zabrzdění dveří zkratováním motoru, aby nedošlo k ublížení na zdraví. Po nakonfigurovaném čase (minimum stanovené normou) jsou dveře opět uvedeny do pohybu a pokračují stejným algoritmem. V případě překročení daného počtu opakování (ve výchozí konfiguraci 3) jsou dveře plně otevřeny a čekají na opakovaný povel z nadřazeného systému. V případě úspěšného zavření je motor odpojen (dveře zajistil automatický zámek, odemknutelný pouze bezpečnou vrstvou) a pomocí výpočtu s koeficientem zapomínání jsou aktualizovány parametry proprietárního řídicího algoritmu, čímž se postupně učí na drobné změny v mechanice modulu způsobené zastaráváním v čase. Z vypočtených parametrů lze jmenovat například zpomalení a , na jehož základě je možné plánovat údržbu mechaniky modulu.

7.2.3 Komunikace a diagnostika

Komunikaci s nadřazeným systémem zabezpečují třídy *RS485* a *Communication*. První jmenovaná obsahuje nízkourovňové funkce. Inicializuje modul UART pro DMA příjem/vysílání spolu s kruhovými buffery a poskytuje metodu pro dekódování dat do připraveného pole. Druhá třída, *Communication*, paket kontroluje a podle přijatých povelů aplikuje odpovědi a poskytuje přijatá data spolu s povely dalším třídám. Obě třídy mají vytvořené dvě instance, každá pro jednu linku RS-485.

V aktuální verzi je třetí sériová linka, která je poskytována pomocí Virtual COM portu na USB-C, využívána pro diagnostické výpisy a exporty naměřených dat ve formátu CSV pro analýzu. Proto také obsluhovaná třída *SerialUSB* obsahuje po nutné inicializaci vysílání i příjmu v DMA módu metody pro příjem řádku a vysílání textu (pole znaků). Příjem je bufferován do velikosti 128B kruhovým bufferem, což je dostačující pro příjem například jednoduchých textových povelů.

Dalším diagnostickým prvkem je přední panel, obsluhovaný třídou *FrontPanel*. Umožňuje zobrazení čísel v různých formátech na displeji, nastavení indikačních LED a získání stavu tlačítek. Data jsou ve formě povelů po sběrnici SPI odesílána pomocnému MCU předního panelu, jeho firmware je popsán v následující kapitole.

7.3 Firmware MCU předního panelu

Mikrokontrolér předního panelu zpracovává digitální vstupy z ovládacích tlačítek, provádí potlačení záskmitů a detekci uvolnění tlačítka a řídí segmentové displeje. Tyto informace a funkce jsou zpřístupněny hlavnímu MCU přes sběrnici SPI, na které se MCU předního panelu chová jako slave s mapovanou pamětí do 'registru'. Komunikační protokol je díky tomu velmi jednoduchý - skládá se pouze z povelu (čtení nebo zápis), adresy registru a 16b hodnoty pro zápis spolu s kontrolním součtem. V případě čtení MCU displeje navíc přidá hodnoty požadovaného registru a jejich kontrolní součet. Firmware po nutné inicializaci modulů ve smyčce obsluhuje blikání LED a aktualizaci stavu tlačítek. Na pozadí od časovače pak probíhá multiplexování displeje. Přerušením od změny pinu \overline{CS} a přijatého znaku je obsluhován stavový automat SPI slave.

7.4 Aplikace pro PC

Jelikož zatím není realizován softwarový modul v nadřazeného systému, byla vytvořena aplikace pro PC, přes kterou je možné povelování, monitorování a parametrizace modulu. Z důvodu rychlého návrhu, výborné kompatibility napříč operačními systémy a případné možnosti jednoduchého portování kódu pro mobilní aplikaci systému Android byl zvolen programovací jazyk Java, v prostředí NetBeans. Jedná se o grafickou vícevláknovou aplikaci, využívající standardní GUI toolkit Swing.

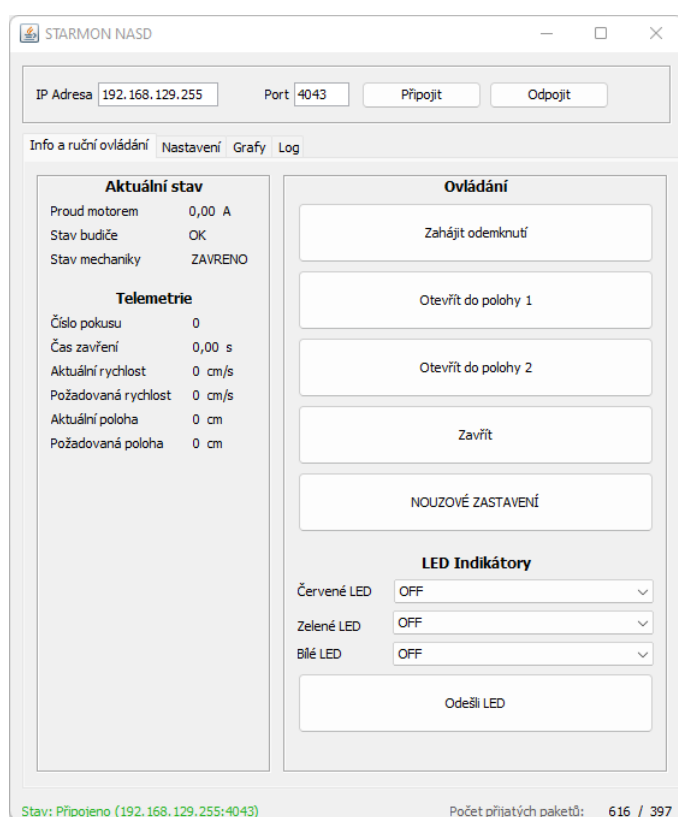
7.4.1 Grafické rozhraní

Samotné uživatelské rozhraní se skládá z několika částí. V horní části je nabízena možnost připojení k datovému koncentrátoru NDC (po zadání IP adresy a portu), dole se nachází stavový řádek indikující připojení a celkový počet paketů spolu s

počtem neplatných paketů. Uprostřed je se nachází hlavní rozhraní složené z několika záložek.

Záložka 'Info a ovládání'

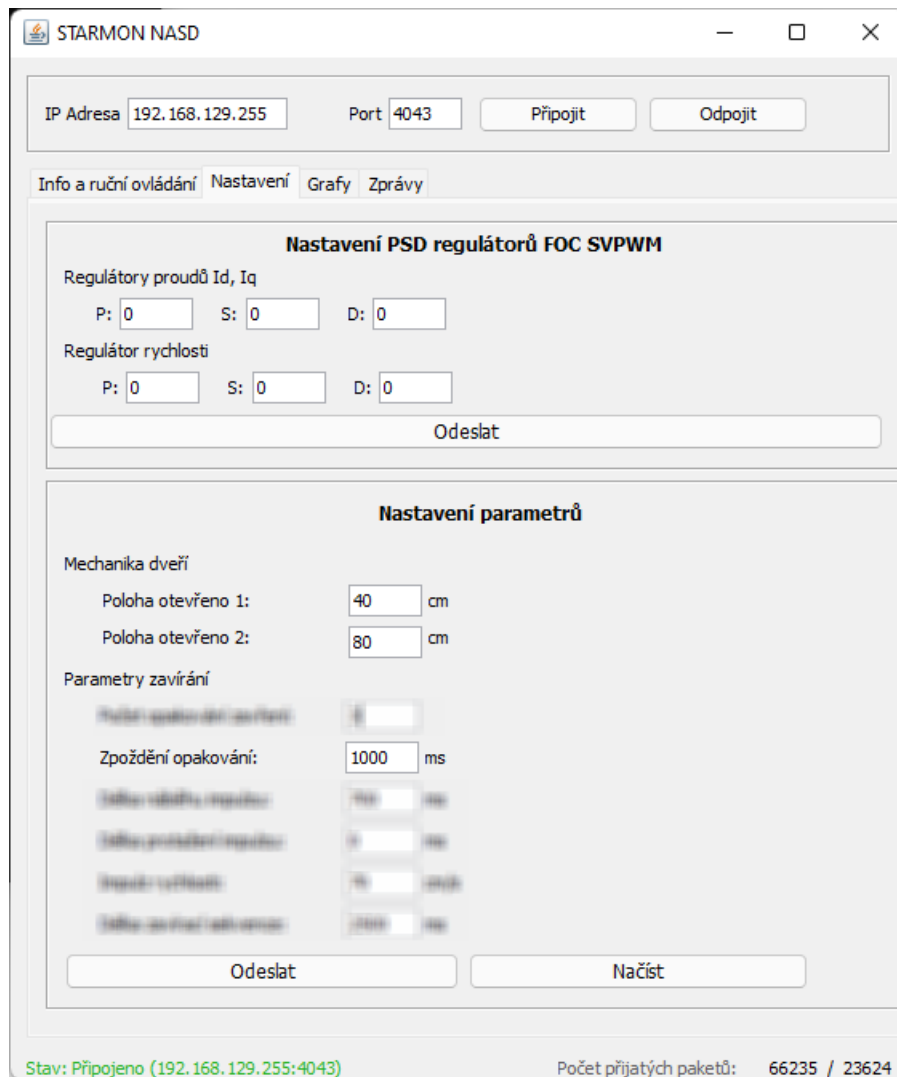
Na této záložce je uživateli prezentován aktuální stav modulu, spolu s podrobnými informacemi o stavu můstku, orientační hodnotě proudu motorem, aktuální a požadované rychlosti a poloze a dalších údajích. Na pravé straně je možné zvolit povel, který bude odeslán a vykonán v rámci modulu. Náhled této záložky je na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: PC aplikace - záložka 'Info a ovládání'

Záložka 'Nastavení'

Karta nastavení umožňuje parametrizaci modulu jak pro pohodlné ladění, tak pro případ úpravy parametrů při nasazení. Ve spodní části záložky lze nastavit cílové vzdálenosti, rychlosti a požadované časy. Horní část je vyhrazena pro budoucí rozšíření modulu o původně plánovaný a připravený FOC algoritmus, kde bude možné odeslat pomocí přidávaných povelů parametry PID (respektive PSD) regulátorů proudu a rychlosti (viz obrázek 7.5).



Obr. 7.5: PC aplikace - záložka 'Nastavení'

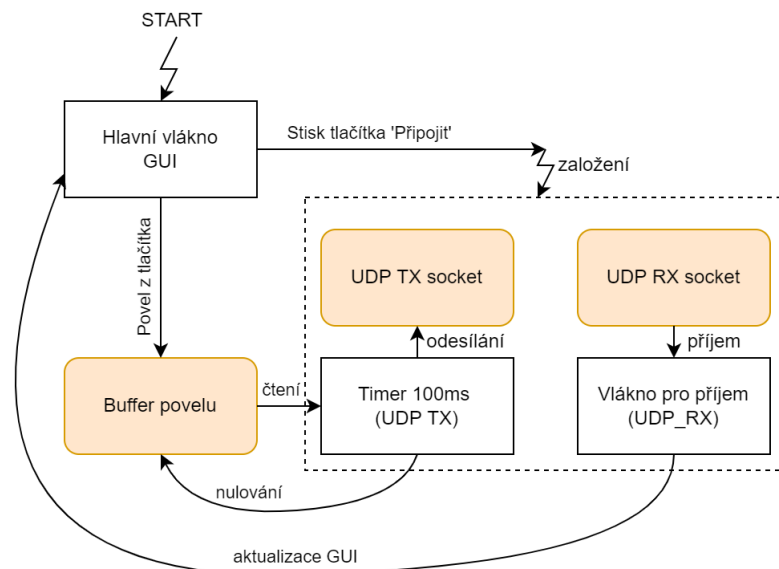
Další záložky

V dalších záložkách se zobrazují grafy požadované a aktuální rychlosti nebo log událostí z modulu. Log spravuje a generuje PC aplikace na základě přijatých dat a jejich změn. Zobrazují se všechny změny trajektorie, tj. zahájení zavírání, náraz na překážku, opakované zavírání, dokončení zavírání, atd.

7.4.2 Architektura aplikace

Aplikace byla rozdělena do několika částí, které spolupracují. V rámci hlavního vlákna jsou po kliknutí na tlačítko 'Připojit' vytvořeny dva UDP sockety - jeden

pro vysílání a druhý pro příjem (z důvodu požadavku NDC na pevný, předem specifikovaný, odesílací port). Poté je aktivován časovač, jehož implementovaná metoda *run* sestaví a odešle povel do NDC každých 100ms, jak NDC požaduje. Není-li vyžádán žádný speciální povel stiskem některého z povelových tlačítek (či načtení konfigurace), odesílá se žádost o stav (*PO_GENERAL*). Je-li požadován jiný povel, v obslužné rutině tlačítka se nastaví potřebné parametry pro odeslání povelu a nakonec se nastaví typ povelu. Odesílací rutina toto načte v příštím tiku časovače a provede odeslání následované snulováním požadovaného typu povelu na výchozí hodnotu. Paralelně běží přijímací vlákno (také spuštěné po stisku tlačítka 'Připojit'), které pouze čeká na přijetí dat z UDP socketu. Po přijetí dat zkontroluje délku, CRC a podle typu povelu data zkonvertuje a zobrazí v jednotlivých elementech GUI spolu s aktualizací logu událostí a grafů. Blokové schéma PC aplikace a základních vazeb je na obrázku 7.6.



Obr. 7.6: PC aplikace - architektura

Problematické se z důvodu kompatibility jazyků C/C++ a Java jeví využití datových struktur při komunikaci. Jazyk Java totiž klasické struktury nepodporuje a použití tříd není možné z důvodu nedefinovaného zarovnávání proměnných. Tuto komplikaci však bylo možné vyřešit použitím volně dostupné knihovny *Javolution* ([20]), poskytující běžný C *struct* s možností nastavení endianity bitů i vypnutí paddingu.

Závěr

V rámci této práce byla navržena a realizována elektronika spolehlivé části pro řízení nástupištní stěny s primárním cílem řízení pohonu dveří, spolu s odpovídajícím FW a SW. Nejprve byla vytvořena rešerše norem týkajících se řízení motorických dveří pro nástupištní stěnu. Byly brány v úvahu také další normy, které je třeba zohlednit v návrhu celého zařízení – hardware i software – pro bezproblémový průběh schvalování a následný bezpečný provoz (EMC, funkční bezpečnost, standardy psaní kódu).

Dále byly popsány jednotlivé možnosti řízení PMSM a to pomocí metod Sine-PWM a Space Vector PWM. Z nich byla vybrána jako nejvhodnější varianta SVPWM, jelikož umožňuje minimalizaci zkreslení a maximalizaci momentu při rozšířením o Field Oriented Control.

Po teoretickém úvodu metod řízení byla analyzována původní komerční řídicí jednotka, zjištěny její elektrické vlastnosti a použita metoda řízení a generování napětí pro motor, která dle změřených průběhů odpovídá Sine-PWM. Na vzorku motoru byly identifikovány jeho neznámé parametry (odpor vinutí, indukčnosti pro stanovení časových konstant, atd.) a použité metody detailně vysvětleny. Vypočtené parametry odpovídají řádově předpokládaným hodnotám.

Po stanovení elektrických koeficientů byly stanoveny vzorkovací frekvence, odvozeny jednotlivé přenosy v regulačním obvodu (motor, měnič, snímače) a použity metody optimálního modulu a symetrického optima pro návrh proudových regulátorů, respektive otáčkového regulátoru. Výsledky regulace byly simulovány v prostředí Matlab/Simulink a po ručním doladění konstanty otáčkového regulátoru bylo dosaženo vyhovujícího regulačního děje. Hodnota úhlové rychlosti překmitne na 130% požadované hodnoty a dojde k ustálení po čase 14ms. Tato část práce, týkající se návrhu regulátorů pro FOC, byla realizována pouze pro ověření konceptu, s ohledem na následný požadavek klienta na nevyužití jakékoliv proudové zpětné vazby. V případě změny požadavku jsou však algoritmus i samotný HW zařízení připraveny.

Dále bylo s přihlédnutím k požadavkům vyplývajících ze zadání navrženo blokové schéma zapojení. Na základě tohoto schématu, požadavků plynoucích z norem a zvolené vzorkovací frekvence bylo navrženo schéma zapojení modulu, přičemž byly jednotlivé bloky detailně popsány. Schéma poté bylo realizováno na 4-vrstvé DPS při dodržení vnitřních firemních standardů návrhu a použití technik minimalizujících potenciální problémy s EMC kompatibilitou.

Následovalo vytvoření komunikačního protokolu kompatibilního s PSIRIUS, dle požadavku firmy. Byly zvoleny potřebné povely a sestaveny jednotlivé struktury paketů, které práce detailně popisuje. Poté bylo možné přistoupit k návrhu firmware, jeho struktury a rozdělení do objektů díky použití jazyka C++. Je implementováno generování napětí pro motor metodou SVPWM, komunikace, diagnostika a další

potřebné prvky, spolu s přípravou implementace a matematickými transformacemi pro případnou implementaci FOC. Navržený stavový automat logiky dveří splňuje požadavky normy i klienta a mnohé jeho parametry jsou konfigurovatelné. Logika zavírací sekvence také určuje koeficient zrychlení, na základě jehož změny v čase je možné s výhodou plánovat servisní zásahy.

Pro ovládání elektroniky je k dispozici multiplatformní PC aplikace. Ta je rozdělena do několika záložek, umožňujících ovládání pohybu a osvětlení, nastavování parametrů stavového automatu, sledování diagnostiky modulu, případně logu událostí při pohybu křídel dveří. Tato aplikace slouží pro zastoupení funkce nadřazeného systému, jenž je ve vývoji a představuje velkou výhodou při testování.

Zařízení je takto připraveno pro zátěžové zkoušky a testy v EMC laboratoři. Pro zajištění shody s drážními normami, zejména pak ČSN-EN 14752, bylo umožněno nastavení parametrů zavírací sekvence a prodlevy opakování zavření z PC aplikace nebo nadřazeného systému. Vhodné nastavení parametrů závisí na finální konstrukci a hmotnosti dveřních křídel, aby nemohlo dojít k překročení stanovených limitů silového působení dveří.

Literatura

- [1] EL PRO CUS. *Permanent Magnet Synchronous Motor Its Working* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-a-permanent-magnet-synchronous-motor-its-working/>.
- [2] DISCOVERIES, I. *Permanent magnet synchronous motor construction* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://innovationdiscoveries.space/wp-content/uploads/2020/08/Types-of-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor-T-.jpg>.
- [3] SWITCHCRAFT. *Space Vector PWM* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>.
- [4] SWITCHCRAFT. *The topology of a two-level inverter* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/584729023e00bebf8abd6ba0/1495979634191-IJUTF9ERVVJDQNI2VXAB/image-asset.png?format=2500w>.
- [5] HW.CZ. *MOSFET vs. IGBT: vědomá volba* [online]. 2014. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/vykonove-obvody/mosfet-vs-igbt-vedoma-volba.html>.
- [6] INFINEON. *Different PWM Waveforms Generation for 3-Phase AC Induction Motor with XC164CS* [online]. 2006-08-04. Infineon Technologies AG, 2006. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/AP1609710_different_PWM_for_three_phase_ACIM.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40a1bf20453.
- [7] WAHEED, A. a USMAN, A. S. Comparative study of SVPWM (space vector pulse width modulation) SPWM (sinusoidal pulse width modulation) based three phase voltage source inverters for variable speed drive. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. OP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 51 012027, 2013. DOI: 10.1088/1757-899X/51/1/012027. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/51/1/012027/pdf>.
- [8] DUŠEK, J. *Control of salient PM machine using d-q frame machine model and Matlab Simulink*. 2010. Diplomová práce. VUT Brno. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/10709/final-thesis.pdf>.

- [9] COLLINS, D. *What is Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). Motion control tips* [online]. 2019. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-space-vector-pulse-width-modulation-svpwm/>.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. *Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors* [online]. Texas Instruments Europe, 1998. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/bpra073/bpra073.pdf>.
- [11] VIKTOR BOBEK. *PMSM Electrical Parameters Measurement* [online]. Freescale Semiconductor, 2013. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/webapp/Download?colCode=AN4680&location=null>.
- [12] FROHR, F. a ORTTENBURGER, F. *Introduction to Electronic Control Engineering*. Siemens, 1982. ISBN 9780855012908. [cit. 2022-01-02].
- [13] AYDIN, O., AKDAG, A., STEFANUTTI, P. a HUGO, N. Optimum Controller Design for a Multilevel AC-DC Converter System. In: Duben 2005, sv. 3, s. 1660 – 1666. DOI: 10.1109/APEC.2005.1453262. ISBN 0-7803-8975-1. [cit. 2022-01-02].
- [14] ZAMBADA, J. a DEB, D. *Sensorless Field Oriented Control of a PMSM* [online]. Microchip Technology Inc., 2010. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01078B.pdf>.
- [15] VASUDEVAMURTHY, S. a AMBEDKAR. Comparison of various PWM techniques for field oriented control VSI fed PMSM drive. In: *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)* [online]. IJERT, 2013, sv. 2. ISSN 2278 – 8875. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/simulation-and-comparison-of-space-vector-pulse-width-modulation-for-three-phase-voltage-source-inverter-IJERTV2IS50677.pdf>.
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. *Field oriented control with space vector pulse width modulation* [online]. 2019. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://314sbp4ao2771ln0f54chhvm-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/03/FOC-with-SVPWM-TI-Diagram-1024x788.png>.
- [17] INGENIA MOTION CONTROL. *Precise Brushless Torque Control With Only 1 Shunt Resistor* [online]. 2012. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2012/11/precise-brushless-torque-control-with-only-1-shunt-resistor/99>.

- [18] BURKE, J., MOYNIHAN, J. F. a UNTERKOFER, K. Extraction of high resolution position information from sinusoidal encoders. In: Intertec International, Inc. *Proceedings of the international intelligent motion conference*. 2000, s. 217–222.
- [19] ST MICROELECTRONICS. *Reference manual - STM32F334xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs: RM0364* [online]. 4. vyd. ST Microelectronics, Červen 2020. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00093941-stm32f334xx-advanced-armed-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
- [20] JAVOLUTION TEAM. *Javolution - Java™ Solution for Real-Time and Embedded Systems* [online]. 2012. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <http://javolution.org/>.

A Obsah elektronické přílohy

V rámci elektronické přílohy jsou k dispozici firmware obou mikrokontrolérů, zdrojové soubory PC aplikace pro ovládání zařízení a diagnostiku a také schéma spolu s navrženou DPS. Pro návrh regulátorů je přiložen skript v programu Matlab/Simulink a simulační zapojení. Ze zdrojových kódů jsou dle požadavků firmy odstraněny proprietární části, taková místa jsou pak označena komentářem "PROPRIETARY". Zejména se jedná o některé komunikační funkce s nadřazeným systémem a metody zavírací sekvence dveří.

/.....	kořenový adresář přiloženého archivu
└ Firmware	Firmware hlavního MCU NASD-SC (Keil MDK-ARM)
└ Firmware-Panel.....	Firmware pomocného MCU NASD-SC (Keil MDK-ARM)
└ Hardware	Schéma a DPS NASD-SC (KiCad)
└ Matlab	Simulace a návrh regulátoru (Matlab/Simulink)