

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektrických pohonů a trakce



**Regulace pohonu  
se stejnosměrným motorem**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

**DANIEL JUSTIZ**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblíček, Ph.D.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Justiz** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **491999**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Regulace pohonu se stejnosměrným motorem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Control of the DC Drive**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupné podklady pro práci s vybranou vývojovou deskou s hradlovým polem pro řízení pohonů.
2. Zhotovte nezbytný hardware pro kompletaci pohonu se stejnosměrným motorem.
3. Realizujte vhodný regulační algoritmus pro řízení pohonu.
4. Na hotovém pohonu proveďte vhodná měření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Balátě, J., Automatické řízení, BEN Praha, 2004.
- [2] Záhlava, V., Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN Praha 2011.
- [3] Vukosavic, S.N., Digital Control of Electrical Drives, Springer Verlag 2007.
- [4] De Doncker, R., Pulle, D.W.J., Veltman, A., Advanced Electrical Drives, Springer Verlag 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Koblre, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce**

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

\_\_\_\_\_  
Ing. Pavel Koblre, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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



### **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D. za veškerý čas věnovaný vedení mé bakalářské práce a cenné připomínky při jejím vypracovávání. Dále děkuji panu Ing. Miroslavu Lvovi za zapůjčení motoru a měniče pro sestavení pohonu.

Daniel Justiz

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 17. května 2022

.....

Daniel Justiz

## Abstrakt

Tato práce se věnuje praktickému sestavení a regulaci elektrického pohonu se stejnosměrným motorem. Pro řízení pohonu je použita vývojová deska s hradlovým polem a integrovaným mikroprocesorem. V práci jsou popsány jednotlivé části elektrického pohonu včetně návrhu desky plošných spojů pro měření a vytvoření rozhraní mezi částmi pohonu. Dále se práce zaměřuje na implementaci struktury regulátoru a řídicích algoritmů v logických obvodech hradlového pole a programu pro integrovaný procesor. Diskutován je matematický model pro simulaci sestaveného pohonu a použité metody ladění regulátorů. V závěru je provedeno zhodnocení funkce sestaveného pohonu včetně regulace.

**Klíčová slova:** elektrický pohon, programovatelné hradlové pole, návrh desky plošných spojů, PID regulátor

## Abstract

This thesis deals with practical assembly and control of a DC drive. An FPGA Development Kit with an integrated microprocessor is used to control the drive. The thesis contains description of electric drive components, including the procedure of a printed circuit board design to provide measurement and interface between the drive parts. Controller structure and control algorithms implementation into the FPGA and the integrated processor program is described. A mathematical model of the drive and its simulation are discussed, as well as methods used to tune the controllers. In the conclusion, function of the drive and its control is evaluated.

**Keywords:** Electrical drive, Field-programmable gate array, Printed circuit board design, PID controller

**Title translation:** Control of the DC Drive

# Obsah

Seznam použitých zkratk	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam obrázků	x
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Hardware</b>	<b>3</b>
2.1 Popis vývojové desky ZedBoard . . . . .	3
2.1.1 Integrované hradlové pole a procesor Zynq-7000 . . . . .	3
2.1.2 Periferie a konektory . . . . .	5
2.2 Motor . . . . .	5
2.3 Měnič . . . . .	5
2.4 Návrh hardwaru nutného k sestavení pohonu . . . . .	7
2.4.1 Účel navrhovaného hardwaru . . . . .	7
2.4.2 Základ návrhu hardwarového řešení . . . . .	8
2.4.3 Výběr součástek pro měření napětí a proudu . . . . .	9
2.4.4 Obvody zpracování signálu snímače otáček . . . . .	10
2.4.5 Napájení . . . . .	11
2.4.6 Návrh desky plošného spoje . . . . .	12
<b>3 Regulátory a ovládání pohonu</b>	<b>15</b>
3.1 PID regulátor . . . . .	15
3.1.1 Unášení integračního členu (windup) a jeho potlačení . . . . .	16
3.1.2 Odvození přírůstkového tvaru regulátoru . . . . .	17
3.2 Regulační obvod . . . . .	17
3.3 Implementace v hradlovém poli . . . . .	18
3.4 Softwarové řešení regulátorů . . . . .	21
3.4.1 Regulátor proudu a řízení měniče . . . . .	22
3.4.2 Regulátor rychlosti a ostatní řídicí logika . . . . .	23
3.4.3 Záznam průběhů a komunikace s obslužnou aplikací . . . . .	23
3.5 Obslužná aplikace pro osobní počítač . . . . .	24
<b>4 Ladění regulátorů a provoz</b>	<b>26</b>
4.1 Matematický model pohonu . . . . .	26
4.1.1 Určení konstant pro simulaci . . . . .	29
4.2 Ladění regulátorů . . . . .	29
4.3 Ověření funkce regulace simulací a v provozu . . . . .	31
<b>5 Zhodnocení</b>	<b>36</b>
<b>Přílohy</b>	<b>40</b>
A Dokumentace navržené desky plošných spojů . . . . .	40
B Návod k obslužné aplikaci . . . . .	44

# Seznam použitých zkratek

<b>AXI</b>	Advanced eXtensible Interface
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>DMA</b>	Direct Memory Access
<b>DPS</b>	deska plošných spojů
<b>FPGA</b>	Field-programmable gate array, hradlové pole
<b>FPU</b>	Floating-point Unit
<b>I/O</b>	Input/Output, vstup/výstup
<b>IRC</b>	Incremental Rotary Coder, inkrementální snímač otáček
<b>I2C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode, svítivá dioda
<b>OLED</b>	Organic Light-Emitting Diode, organická svítivá dioda
<b>PI</b>	proporcionálně-integrační
<b>PID</b>	proporcionálně-integračně-derivační
<b>PL</b>	Programmable Logic, programovatelné logické obvody
<b>PS</b>	Processing System, procesor
<b>PSD</b>	proporcionálně-sumačně-diferenční
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation, pulzně-šířková modulace
<b>RAM</b>	Random Access Memory, paměť s náhodným přístupem
<b>SMD</b>	Surface Mount Device, součástka pro povrchovou montáž
<b>SoC</b>	System on a Chip, systém na čipu
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>VHDL</b>	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
<b>ZedBoard</b>	Zynq™ Evaluation and Development



# Seznam tabulek

2.1	Štítkové údaje použitého motoru. . . . .	5
2.2	Vybrané parametry izolovaných převodníků řad AMC1306 a AMC1336. . .	9
2.3	Vypočtené hodnoty odporu snímacího rezistoru a jim příslušné ztrátové výkony pro jednotlivé převodníky. . . . .	10
2.4	Spotřeba obvodů a zařízení pro návrh napájení. . . . .	11
4.1	Přehled použitých konstant regulátorů. . . . .	30
A.1	Seznam součástek osazených na desce plošných spojů. . . . .	42
A.2	Popis pinů konektorů. . . . .	43

# Seznam obrázků

1.1	Obecné schéma regulačního obvodu se zápornou zpětnou vazbou. . . . .	1
2.1	Vývojová deska ZedBoard. . . . .	3
2.2	Blokový diagram desky ZedBoard. . . . .	4
2.3	Použitý měnič. . . . .	6
2.4	Zjednodušené schéma silových obvodů střídače. . . . .	6
2.5	Obvody pro měření proudu kotvy a napětí na kotvě. . . . .	14
2.6	Hotová osazená deska plošného spoje. . . . .	14
3.1	Navržený regulační obvod. . . . .	18
3.2	Přehledové schéma obvodů realizovaných v hradlovém poli. . . . .	19
3.3	Obvod zpracování signálu převodníku pro měření proudu/napětí s číslicovým filtrem. . . . .	20
3.4	Obvod detekce hrany signálu IRC. . . . .	20
3.5	Obvod zpracování signálů IRC. . . . .	21
3.6	Obvod generování řídicího PWM signálu. . . . .	21
3.7	Okno obslužné aplikace. . . . .	25
4.1	Model pohonu v prostředí Matlab-Simulink. . . . .	28
4.2	Odezva proudu na skok střední hodnoty napětí – bez tlumivky. . . . .	31
4.3	Odezva proudu na skok střední hodnoty napětí – s tlumivkou. . . . .	31
4.4	Průběh otáček a napětí na kotvě při konstantním zatěživateli – bez průměrování otáček. . . . .	32
4.5	Průběh otáček a napětí na kotvě při konstantním zatěživateli – průměrování 10 vzorků otáček. . . . .	32
4.6	Regulační děj regulátoru proudu – bez tlumivky. . . . .	33
4.7	Regulační děj regulátoru proudu – s tlumivkou. . . . .	33
4.8	Regulační děj regulátoru rychlosti – bez tlumivky. . . . .	34
4.9	Regulační děj regulátoru rychlosti – s tlumivkou. . . . .	34
4.10	Práce regulace rychlosti: změny žádané hodnoty. . . . .	35
4.11	Práce regulace rychlosti: změny směru otáčení. . . . .	35
A.1	Obvodové schéma navržené desky plošných spojů. . . . .	40
A.2	Vrchní strana navržené desky plošných spojů. . . . .	41
A.3	Spodní strana navržené desky plošných spojů. . . . .	41

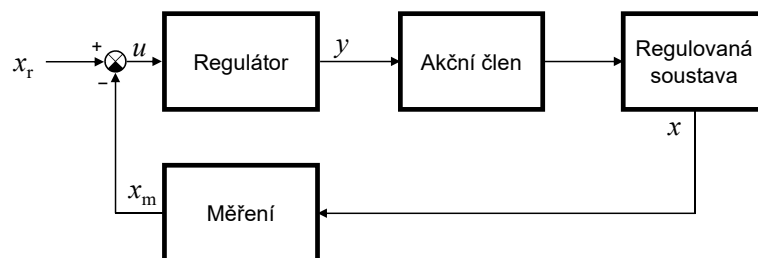
# Kapitola 1

## Úvod

Elektrické pohony představují významný způsob využití elektrické energie, neboť jejich účelem je přeměna elektrické energie na mechanickou a naopak. Z širokého spektra aplikací uvedme jako příklad pohony pracovních mechanismů a strojů, pohony trakční, pohony ventilátorů a čerpadel nebo pohony ventilů, klapek a podobných mechanických zařízení. Elektrický pohon lze definovat jako „soustavu, vytvořenou z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů řídících tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní řídicí signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazeným řídicím, regulačním nebo automatizačním členem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu“ [1, str. 5]. Nejdůležitějšími prvky elektrického pohonu jsou obvykle elektrický točivý stroj, polovodičový měnič zajišťující jeho napájení a prvky měření a regulace (řízení).

Regulace je způsob řízení regulované soustavy, jehož cílem je dosažení požadovaných hodnot určených veličin, jejich udržování a zajištění přechodu na nové hodnoty při změně požadavku. Součástí regulované soustavy je regulovaný systém, jehož výstupním parametrem je obecná regulovaná veličina, akční člen sloužící k ovlivnění parametrů regulovaného systému a regulátor, který podle požadavků a předem stanovených pravidel řídí akční člen, a tím ovlivňuje celou regulovanou soustavu včetně hodnoty regulované veličiny. Všechny prvky dohromady tvoří regulační obvod.

Regulace se od ovládání, které je jiným druhem řízení, odlišuje tím, že regulátor má jako svou vstupní veličinu k dispozici informace o stavu regulované soustavy. Tyto informace jsou získávány dalším prvkem regulačního obvodu – měřicím členem. Vstupem regulátoru je pak rozdíl žádané a měřené hodnoty regulované veličiny, nazývaný regulační odchylkou [1], [2]. Ovládání je tedy řízením bez zpětné vazby, též řízením s otevřenou smyčkou, zatímco regulace je řízením se zápornou zpětnou vazbou, též řízením s uzavřenou regulační smyčkou [2]. Obecné schéma uzavřené regulační smyčky je na obrázku 1.1. Na kterémkoli místě mohou do této smyčky vstupovat ještě tzv. poruchové veličiny, tedy další vlivy, které ovlivňují stav regulované soustavy. Jedním z úkolů regulátoru je vliv poruchových veličin eliminovat [1], [2].



Obrázek 1.1: Obecné schéma regulačního obvodu se zápornou zpětnou vazbou.

Regulaci a řízení obecně můžeme rozdělit na regulaci spojitou, při níž regulátor reaguje na regulační odchylku na základě fyzikálních principů trvale, a regulaci diskrétní, při níž je struktura regulátoru implementována v číslicových elektronických obvodech nebo v programu mikroprocesoru a k vyhodnocení regulační odchylky a tomu odpovídající změně výstupu regulátoru dochází pouze v určitých časových okamžicích, obvykle s pevnou, předem určenou periodou.

V případě elektrických pohonů je regulovaným prvkem elektrický stroj a akčním členem polovodičový měnič, který mění parametry napájení stroje. Pro regulaci je často využíván prvkem proporcionálně-integračně-derivační (PID) regulátor, který je podrobněji popsán v části 3.1.

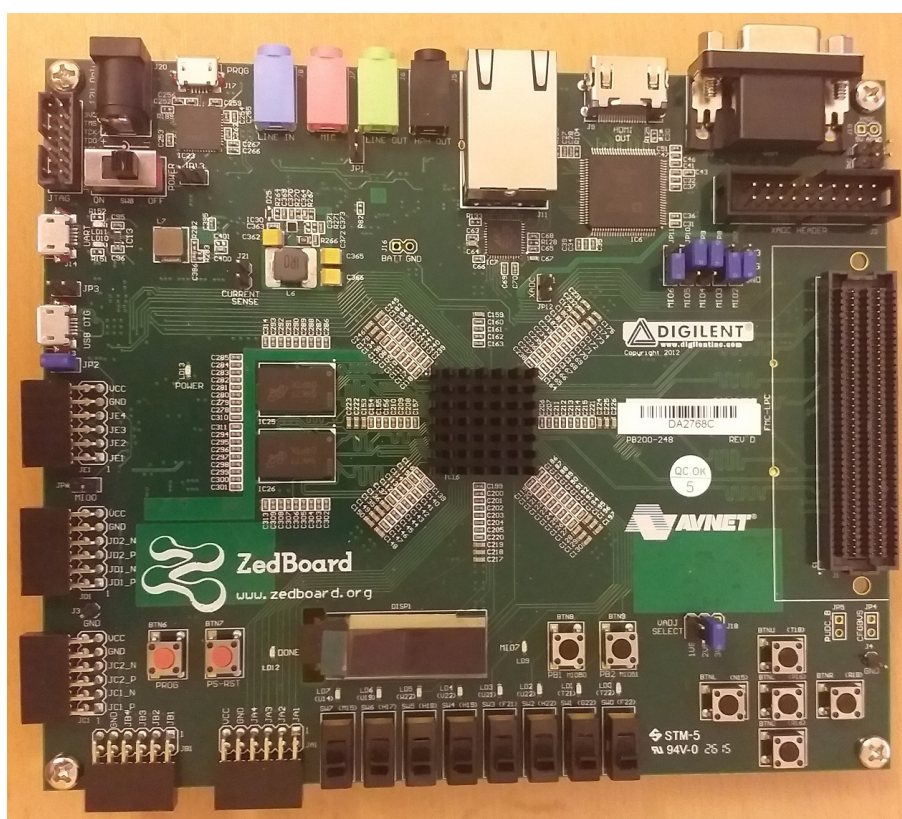
V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé součásti použité k sestavení elektrického pohonu se stejnosměrným motorem, obvody a algoritmy použité k regulaci tohoto pohonu, postupy využité k nastavení regulátorů a výsledky simulací a měření provedených na sestaveném pohonu.

## Kapitola 2

# Hardware

### 2.1 Popis vývojové desky ZedBoard

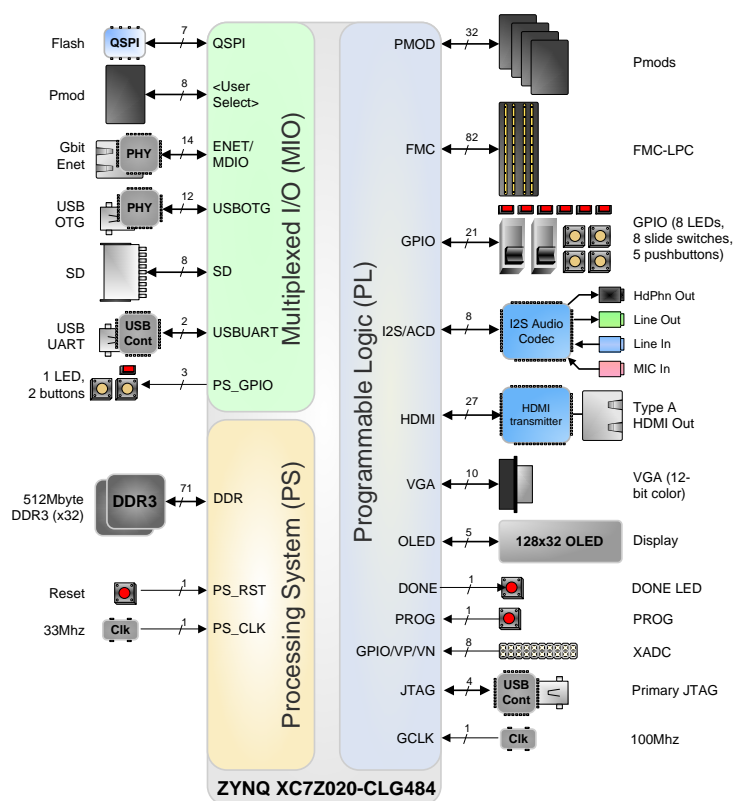
Jako řídicí člen pro řízení pohonu je použita vývojová deska ZedBoard od společnosti Avnet. Jádrem desky je programovatelné hradlové pole (zkráceně hradlové pole, FPGA) řady Zynq®-7000 SoC s integrovaným procesorem architektury ARM®. Deska je určena pro použití v široké škále aplikací a je proto vybavena velkým množstvím různých periférií.



Obrázek 2.1: Vývojová deska ZedBoard.

#### 2.1.1 Integrované hradlové pole a procesor Zynq-7000

Na desce ZedBoard je osazeno hradlové pole XC7Z020-1CLG484C SoC z řady Zynq®-7000 SoC vyrobené společností Xilinx, do kterého je integrován dvoujádrový procesor ARM Cortex-A9 [4]. Funkci, která má být implementována, je tedy možné rozdělit mezi programovatelné logické obvody hradlového pole (PL) a procesor (PS). Výhodou tohoto řešení



Obrázek 2.2: Blokový diagram desky ZedBoard. Převzato z [3, str. 3].

je možnost realizovat tu část požadované funkce, která by procesor příliš zatěžovala, nebo by ji dokonce kvůli nárokům na čas nebylo vůbec pomocí procesoru možné řešit, pomocí logických obvodů implementovaných v hradlovém poli. Nevýhodou hradlového pole je naopak velmi obtížná implementace složitějších operací s daty, a zejména pak ladění jejich funkce, proto je k těmto operacím naopak vhodné použít procesor.

PL a PS jsou datově propojeny sběrnici Advanced eXtensible Interface (AXI), která jinak slouží ke komunikaci uvnitř procesoru ARM [4]. V hradlovém poli potom lze vytvořit registry, které jsou připojeny ke sběrnici AXI, a je možné k nim z procesoru přistupovat stejným způsobem jako k perifériím procesoru. Spojením hradlového pole s procesorem je tedy možné v podstatě vytvořit vlastní periférii s funkcí, která byla navržena a implementována do logických obvodů hradlového pole.

Procesor ARM Cortex-A9 s maximální taktovací frekvencí 666,6 MHz sestává ze dvou jader, která mohou pracovat odděleně nebo v režimu symetrického nebo asymetrického multiprocessingu. Procesor je vybaven Floating-point Unit (FPU) umožňující efektivní práci s čísly ve formátu plovoucí řádové čárky, vnitřní paměť 256 kB a řadičem přerušování. Z dalších součástí procesoru lze jako relevantní pro aplikace v oblasti regulace elektrických pohonů jmenovat řadič přímého přenosu dat mezi pamětí a perifériemi (DMA) a celkem 9 čítačů (časovačů) s různými funkcemi včetně Capture (zachycení okamžiku změny úrovně vstupního signálu), Compare (změna úrovně výstupního signálu v předem určený okamžik) a Watchdog (resetování procesoru v případě selhání programu). Periferií procesoru jsou také dva dvanáctibitové analogově-číslcové převodníky [4].

Vstupně-výstupní (I/O) piny jsou sdruženy do bank, přičemž každá může pracovat s jiným napětím. Na desce ZedBoard jsou použity napěťové úrovně vstupů a výstupů procesoru 1,5 V, 1,8 V, 2,5 V a 3,3 V. K I/O lze přistupovat buď pouze z PL, pouze z PS, nebo z obou součástí v případě multiplexovaných I/O. Připojení periférií desky ZedBoard k I/O pinům z tohoto hlediska je patrné z obrázku 2.2. Hradlové pole s procesorem vedle obecných vstupů a výstupů mimo jiné disponuje následujícími vstupně-výstupními rozhraními: Ethernet, USB, CAN, SPI, UART a I2C [4].

### 2.1.2 Periferie a konektory

Na vývojové desce ZedBoard jsou umístěny další periferie rozšiřující dostupné funkce, a tím i oblast použití hradlového pole s procesorem. Nachází se zde dvě paměti RAM typu DDR3 s celkovou velikostí 512 MB a flash paměť o velikosti 32 MB. Deska dále obsahuje převodník komunikačních rozhraní UART a USB, další dvě USB rozhraní pro komunikaci s hradlovým polem a jeho programování, konektor pro rozhraní Ethernet a slot pro SD kartu, oscilátory pro generování hodinových signálů pro hradlové pole a procesor, dále jako vstup od uživatele tlačítka a přepínače a jako výstup signální LED a čtyřřádkový OLED displej. Deska je také vybavena vstupně/výstupními rozhraními pro zobrazovací zařízení a zvuk [3].

Za účelem připojení dalších zařízení rozšiřujících funkce vývojové desky ZedBoard je tato vybavena několika konektory. Prostřednictvím konektoru LPC FMC určeného pro připojení rozšiřujících modulů k desce lze přistupovat k 68 I/O pinům hradlového pole. Konektor označený jako XADC slouží zejména pro připojení vstupního analogového signálu pro analogově-číslkové převodníky. Třetím typem konektoru, určeným pro připojení další desky plošných spojů (DPS) ležící s vývojovou deskou ve stejné rovině, je konektor  $2 \times 6$  pinů 2,54 mm označovaný v materiálech k ZedBoard obchodně jako Digilent Pmod™. Těchto konektorů je na desce umístěno celkem pět. Dva z nich (označené JA, JB) poskytují přístup k 8 I/O hradlového pole na straně PL, další dva (JC, JD) ke 4 I/O na straně PL s podporou diferenciálního signálu a poslední (JE) k 8 I/O na straně PS [3].

## 2.2 Motor

Hlavní součástí pohonu je stejnosměrný motor s cizím buzením permanentními magnety. Motor není připojen k žádné zátěži. Štítkové údaje motoru jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 2.1:** Štítkové údaje použitého motoru.

Jmenovité napětí:	24 V
Jmenovitý proud:	4,7 A
Jmenovité otáčky:	$3000 \text{ min}^{-1}$
Druh zatížení:	S2 – krátkodobý chod

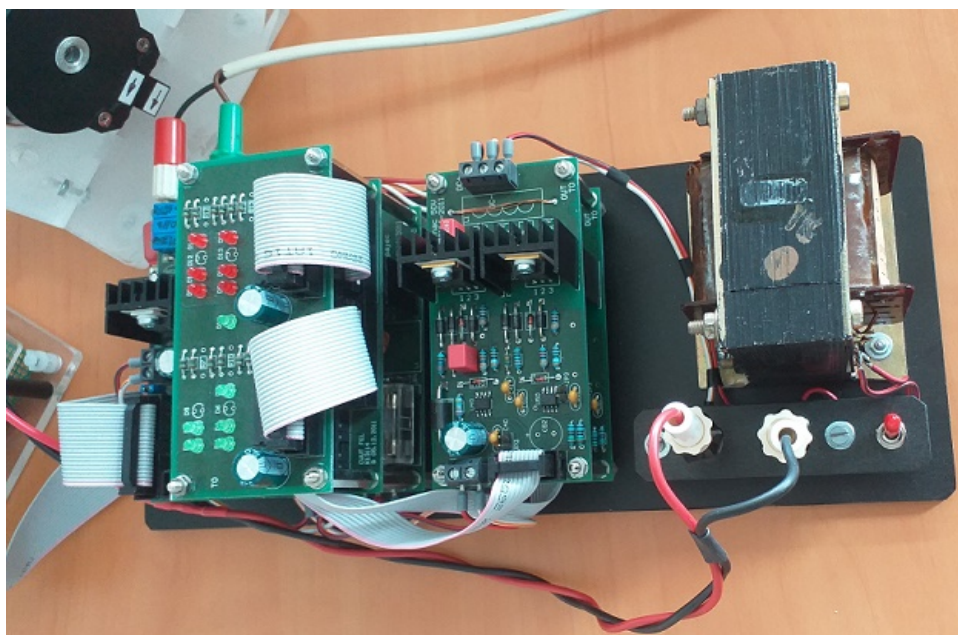
Na hřídeli motoru je osazen optoelektronický inkrementální rotační snímač otáček se dvěma kanály s 500 impulzy na otáčku a kanálem nulového impulsu. Snímač je třeba napájet stejnosměrným napětím 5 V.

## 2.3 Měnič

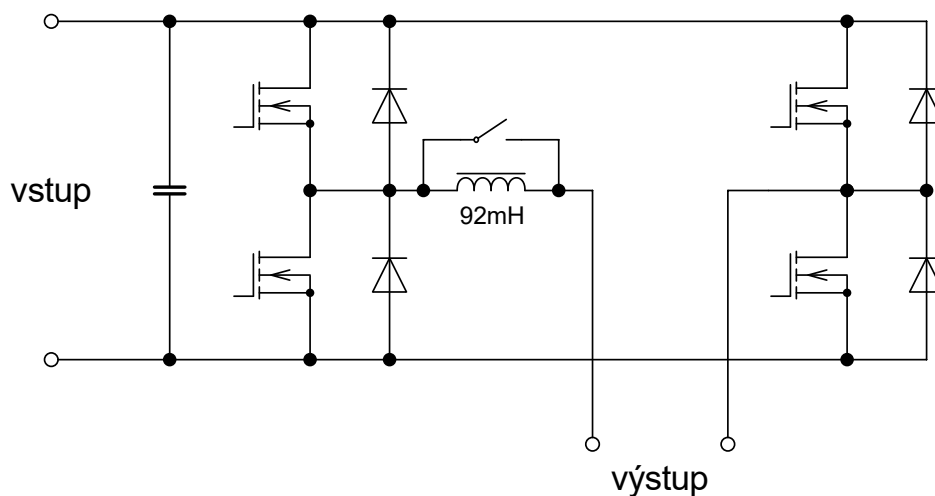
Stejnoscsměrný motor s cizím buzením permanentními magnety je možné řídit pouze změnou napájecího napětí na jeho kotvě. K tomuto účelu je použit měnič dostupný v laboratoři katedry elektrických pohonů a trakce. Jde o tzv. H-můstek, neboli jednofázový napěťový střídač v můstkovém zapojení. Měnič vyžaduje napájení stejnosměrným napětím 24 V.

Použitý střídač při svém chodu přepíná mezi dvěma dvojicemi tranzistorů, a tím připojuje na svůj výstup střídavě napětí  $+24 \text{ V}$  a  $-24 \text{ V}$ . Řízením měniče lze měnit periodu tohoto střídání (spínací kmitočet) a poměr dob zapnutí jedné a druhé dvojice tranzistorů, a tím stejnosměrnou složku (střední hodnotu) výstupního napětí. Měnič může spínat s kmitočtem až 40 kHz.

Měnič je doplněn tlumivkou o indukčnosti 92 mH pro vyhlazení proudu, kterou je možno pomocí přepínače připojit sériově k výstupu měniče nebo přemostit.



Obrázek 2.3: Použitý měnič.



Obrázek 2.4: Zjednodušené schéma silových obvodů střídače.

Použitý měnič se ovládá pomocí tří vstupních signálů, které jsou přiváděny kabelem připojeným ke konektoru na řídicí DPS měniče:

- logický signál *reset* (kvitace havárie),
- logický signál *enable* povolující sepnutí tranzistorů, a tím chod měniče a
- řídicí signál ve formě pulzně-šířkové modulace (PWM). Kmitočet signálu určuje spínací kmitočet střídače, střída řídicího signálu určuje střídu (zatěžovatele) napětí na jeho výstupu. Při střídě signálu 50 % je střední hodnota napětí na výstupu nulová, při vyšší střídě je kladná a při střídě nižší než 50 % je záporná.

Výstupním signálem *error* přenášeným stejným kabelem signalizuje měnič provozní stav havárie.



Napájecí napětí řídicích obvodů měniče, a tedy i napětí odpovídající logické 1 uvedených signálů, činí 3,3 V.

## 2.4 Návrh hardwaru nutného k sestavení pohonu

V předchozích podkapitolách byly popsány prvky hardwaru, které byly pro sestavení pohonu v rámci této práce již k dispozici. Do hradlového pole s procesorem na desce ZedBoard lze implementovat regulátory, tato deska tedy slouží k řízení pohonu. Regulovanou soustavu pak tvoří měnič působící jako akční člen a stejnosměrný motor. Pro řízení v uzavřené regulační smyčce je však třeba ještě doplnit měření regulovaných veličin, tedy kotevního proudu motoru a jeho rychlosti otáčení. Tu je možné měřit pomocí inkrementálního rotačního snímače otáček (IRC) na hřídeli motoru, avšak je třeba zajistit napájení tohoto snímače a jeho připojení k řídicí desce. Uvedené skutečnosti jsou některými z důvodů, proč bylo třeba přistoupit k návrhu hardwaru, který doplní součásti pohonu uvedené v předchozích podkapitolách a umožní jejich propojení.

### 2.4.1 Účel navrhovaného hardwaru

Prvním úkolem při návrhu bylo vymezit, jaké funkce má navrhovaný hardware v pohonu zajišťovat. Tyto funkce můžeme rozdělit do tří skupin:

1. **Měření veličin**, které je nutné nebo vhodné měřit, a předání hodnot měřených veličin do řídicí desky ZedBoard. Měření mají být tyto veličiny:
  - kotevní proud motoru,
  - napětí na kotvě motoru (pro regulaci není nutné) a
  - rychlost otáčení rotoru – samotné měření je zajištěno IRC na hřídeli, nicméně snímač je nutné doplnit dalšími prvky, aby jej bylo možné k měření použít.
2. **Vhodné propojení jednotlivých součástí hardwaru**, kterým je myšleno především:
  - (a) *Propojení řídicí desky s měničem.* Na desce ZedBoard se nenachází vhodný konektor pro připojení propojovacího kabelu z měniče k I/O pinům hradlového pole. Proto je třeba vytvořit hardware sloužící jako vhodná redukce.
  - (b) *Galvanické oddělení řídicí desky od obvodu kotvy motoru.* Kotva motoru je připojena k měniči, neboli jednofázovému můstkovému střídači napájenému ze zdroje stejnosměrného napětí 24 V. Řídicí obvody měniče jsou napájeny z téhož zdroje, přičemž v době návrhu nebylo známo, zda jsou od tohoto zdroje bezpečně galvanicky odděleny či nikoliv. V případě, že nejsou, by hrozilo, že bude na řídicí desku ZedBoard přivedeno vyšší napětí než je napětí dovolené, a to mezi I/O pro ovládání měniče (číslicové řídicí obvody měniče) a vstupy pro měření proudu a napětí (obvod kotvy motoru).
3. **Napájení obvodů měření.** Jedná se o:
  - (a) části obvodů měření proudu a napětí galvanicky spojené s řídicí deskou,
  - (b) části obvodů měření proudu a napětí, které jsou galvanicky odděleny v souladu s předchozím bodem a
  - (c) snímač otáček, který vyžaduje napájení o napětí 5 V.

Uvedené body popisující potřebnou funkci navrhovaného hardwaru tvoří zadání, které bylo nutné při návrhu splnit.

## 2.4.2 Základ návrhu hardwarového řešení

Jako základ návrhu hardwarového řešení byly rozpracovány možnosti řešení uvedeného zadání.

1. **Měření proudu** je potřebné minimálně v rozsahu mezi jmenovitého proudu motoru, tedy  $-4,7\text{ A}$  až  $+4,7\text{ A}$ . Takovéto stejnosměrné proudy lze v zásadě snímat měřením napětí na bočníku nebo pomocí snímače pracujícího na principu Hallova jevu. Přestože takový snímač zároveň slouží jako galvanické oddělení, varianta s bočníkem byla upřednostněna jakožto řešení levnější a přesnější.
2. **Měření napětí** minimálně v rozsahu napětí napájecího zdroje, tedy  $-24\text{ V}$  až  $+24\text{ V}$ . Napětí je možno měřit přímo, pokud to měřicí převodník umožňuje, nebo lze použít napěťový dělič a měřit pouze jeho díl. Při měření napětí v obvodu kotvy, který má zejména v případě zapojení vyhlazovací tlumivky nezanedbatelnou indukčnost, byla uvažována i možnost vzniku přepětí při přerušení obvodu a nutnost ochrany měřicích obvodů proti tomuto přepětí.
3. **Měření rychlosti otáčení rotoru** je zajištěno optoelektronickým IRC, který je z hlediska elektroniky vybaven pouze LED a fototranzistory. Tyto tranzistory mají ve vypnutém stavu velkou impedanci, příslušný kanál IRC není připojen k napájecímu napětí ani k zemi a úroveň signálu není přesně určena. V sepnutém stavu spojují kanál se zemí. Proto je třeba použít pull-up rezistory, které zajistí při vypnutých tranzistorech úroveň signálu odpovídající logické 1. Vzhledem ke zpracování signálu v hradlovém poli je také nutné zajistit, aby při spínání a vypínání fototranzistorů nedocházelo k „přeskakování“ vyhodnocené úrovně signálu.
4. **Propojení řídicí desky s měničem a s navrhovaným hardwarem vůbec.** Je třeba zajistit přenos minimálně 7 číslicových signálů (4 signály od měniče a 3 kanály IRC). Hardware bude realizován na desce plošných spojů (DPS), která bude osazována za použití ručního pájení. Není tedy možné použít konektory, které nelze ručně pájet. Z těchto podmínek vyplývá, že jediné použitelné vstupně/výstupní rozhraní k řídicí desce ZedBoard představuje pětice konektorů  $2 \times 6$  pinů  $2,54\text{ mm}$  (označovaných Pmod<sup>TM</sup>) určených pro připojení další desky ve stejné rovině. DPS tedy bude navrhována tak, aby ležela ve stejné rovině s řídicí deskou a byla s ní propojena pomocí těchto konektorů. Připojení měniče pak bude realizováno osazením kompatibilního konektoru na DPS.
5. **Galvanické oddělení** je vzhledem k tomu, že měřené napětí a proud (respektive napětí na bočníku) jsou stejnosměrné analogové signály, nutné řešit izolovanými převodníky. Při průzkumu dostupných převodníků bylo zjištěno, že jsou k dispozici jak izolované převodníky analogově-analogové (např. AMC1200 výrobce Texas Instruments [5]), tak izolované převodníky analogově-číslicové (např. AMC1306 téhož výrobce [6]). Jelikož zpracování analogového signálu z výstupu analogově-analogového převodníku řídicí deskou se jeví jako náročnější jak z hlediska nutnosti použití analogově-číslicového převodníku integrovaného do hradlového pole, tak z hlediska hardwaru (nutnost připojení dalším propojovacím kabelem k pinům určeným pro analogové signály), byla dále sledována druhá varianta.
6. **Napájení obvodů na navrhované DPS** je nutno vzhledem k požadavku na galvanické oddělení rozdělit na část spojenou s řídicí deskou a část galvanicky oddělenou, která je spojena s obvodem kotvy motoru. Napájení první uvedené části je možno realizovat z řídicí desky na napětí  $3,3\text{ V}$ , které je přivedeno na konektory  $2 \times 6$  pinů  $2,54\text{ mm}$  navrhované k použití, za předpokladu, že výkon odebíraný součástkami na navrhované DPS nepřesáhne možnosti zdroje napětí  $3,3\text{ V}$  na desce ZedBoard.

Pomocí oddělovacího DC/DC měniče napětí lze pak napájet i galvanicky oddělenou část.

Dále je nutno vyřešit napájení IRC, který pro svoji činnost vyžaduje napájecí napětí 5 V. Přestože hradlové pole s tímto napětím nepracuje, na desce ZedBoard je napětí 5 V dostupné (využívá se pro napájení některých periférií), připojení napájení IRC by však vyžadovalo další konektor a kabel. Při připojování tohoto kabelu na napájení 5 V z desky by navíc mohla hrozit záměna se sousedními piny, mezi kterými je napájecí napětí 12 V. Proto bylo navrženo spojení napájení IRC s galvanicky oddělenou částí obvodů měření proudu a napětí, která tedy bude pracovat s napájecím napětím 5 V. Ve výsledku tedy byly na DPS navrženy dvě od sebe izolované oblasti napájení s hladinami napájecího napětí 3,3 V a 5 V.

### 2.4.3 Výběr součástek pro měření napětí a proudu

Nutnost řešení galvanického oddělení, upřednostnění izolovaných analogově-číslcových převodníků před analogově-analogovými a omezení výběru na součástky v pouzdech, která je možné na DPS osazovat a pájet ručně, značně zúžily rozsah použitelných převodníků. Tento již tak úzký výběr byl navíc dále omezován dostupností součástek na skladech jejich prodejců. Jako použitelné se proto jevíly v podstatě pouze již zmiňované izolované převodníky řady AMC1306 a funkčně podobné řady AMC1336 výrobce Texas Instruments.

Tyto převodníky mají na analogové straně vstupní piny, mezi které je přiváděn vstupní analogový signál, a na číslicové straně pin pro přivedení hodinového signálu a jeden pin datový. Převodník používá Delta-Sigma modulaci, jeho výstupem je sekvence bitů, jejíž poměr počtu logických 1 a logických 0 za určitou dobu odpovídá měřené analogové hodnotě [6]. Čtení dat tak probíhá synchronně a sériově. Pro galvanické oddělení je použita izolace na bázi SiO<sub>2</sub>, přes kterou jsou data přenášena pomocí kapacitní vazby s využitím nosného kmitočtu 480 MHz, který je generován v převodníku [6]. Převodníky vyžadují napájení na obou stranách. Základní parametry těchto převodníků jsou uvedeny v tabulce 2.2.

**Tabulka 2.2:** Vybrané parametry izolovaných převodníků řad AMC1306 a AMC1336 dle [6], [7].

Doporučený rozsah měřeného napětí:	AMC1306x05	±50 mV
	AMC1306x25	±250 mV
	AMC1336	±1 V
Maximální rozsah měřeného napětí:	AMC1306x05	±64 mV
	AMC1306x25	±320 mV
	AMC1336	±1, 25 V
Vstupní odpor:	AMC1306x05	4, 75 kΩ
	AMC1306x25	19 kΩ
	AMC1336	1, 5 GΩ
Napájecí napětí na analogové straně (AVDD):		3, 0 až 5, 5 V
Napájecí napětí na číslicové straně (DVDD):		2, 7 až 5, 5 V
Požadovaný kmitočet hodin pro datový výstup (pro AVDD ≥ 4, 5 V):	AMC1306	5 až 21 MHz
	AMC1336	5 až 21 MHz
Požadovaný kmitočet hodin pro datový výstup (pro AVDD < 4, 5 V):	AMC1306	5 až 20 MHz
	AMC1336	9 až 21 MHz

Měření proudu bylo navrženo pomocí měření napětí na snímacím rezistoru. Za účelem výběru nejvhodnějšího převodníku byly vypočteny potřebné velikosti odporu snímacího rezistoru při použití každého ze tří uvedených rozsahů převodníků. Rozsah měřeného proudu je požadován  $\pm 4,7$  A, z důvodu zachování určité rezervy bylo uvažováno, že doporučený rozsah měřeného napětí odpovídá proudu  $\pm 6$  A. Odpor byl vypočten pomocí Ohmova zákona jako

$$R = \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.1)$$

kde  $\Delta U$  je úbytek napětí na rezistoru odpovídající rozsahu převodníku a  $I = 6$  A je proud při tomto úbytku napětí. Výsledné požadované odpory snímacích rezistorů a odpovídající ztrátový výkon při jmenovitém proudu motoru 4,7 A ( $\Delta P = RI^2$ ) jsou uvedeny v tabulce 2.3.

**Tabulka 2.3:** Vypočtené hodnoty odporu snímacího rezistoru a jim příslušné ztrátové výkony pro jednotlivé převodníky.

Převodník	Rozsah	Odpor	Ztrátový výkon
AMC1306x05	$\pm 50$ mV	8 m $\Omega$	0,18 W
AMC1306x25	$\pm 250$ mV	42 m $\Omega$	0,92 W
AMC1336	$\pm 1$ V	167 m $\Omega$	3,18 W

Je zřejmé, že odpor snímacího rezistoru je třeba volit co možná nejmenší, aby na něm docházelo k co nejmenšímu úbytku napětí a ztrátám. Proto je převodník AMC1336 s rozsahem  $\pm 1$  V pro měření proudu zcela nevhodný. Z tohoto pohledu pochopitelně vychází nejlépe převodník s nejmenším rozsahem, v úvahu však bylo nutné vzít i to, jakým způsobem bude měřicí obvod konstruován a sestaven. Bylo zjištěno, že rezistory s hodnotami odporu nižšími než 100 m $\Omega$  jsou dostupné pouze v provedení součástek pro povrchovou montáž (SMD). Tento způsob montáže rezistoru neumožňuje přivedení dvojice vodičů pro měření napětí oddělené od vodičů přivádějících měřený proud. Je tedy nutno uvažovat i úbytky na přechodových odporech mezi SMD rezistorem a vodivým motivem na DPS. Z tohoto pohledu se odpor 8 m $\Omega$  jeví jako příliš nízký, neboť již může být srovnatelný s přechodovými odpory v ručně pájeném spoji mezi rezistorem a DPS. Proto byl nakonec zvolen převodník AMC1306E25<sup>1</sup> s rozsahem  $\pm 250$  mV. Jako snímací rezistor byl zvolen SMD rezistor 40 m $\Omega$  s dovoleným ztrátovým výkonem 2 W.

Pro měření napětí, které se může při provozu pohybovat v rozsahu  $\pm 24$  V, s využitím některé z uvedených součástek je tedy třeba pro snížení hodnoty měřeného napětí použít odporový dělič. Pro měření napětí na výstupu tohoto odporového děliče byl zvolen převodník s rozsahem  $\pm 1$  V. Navržený odporový dělič je popsán v části 2.4.6.

#### 2.4.4 Obvody zpracování signálu snímače otáček

Vzhledem k tomu, že snímač otáček má být napájen napětím 5 V, stejně jako analogová strana měřících izolovaných převodníků, vyvstává potřeba snímač otáček také galvanicky oddělit od řídicí desky. K zajištění galvanicky odděleného přenosu signálů z IRC byl vybrán tříkanálový digitální izolátor ISO7330FC od výrobce Texas Instruments pracující s přenosem signálu přes izolaci na podobném principu, který byl již popsán u izolovaných převodníků. Tento digitální izolátor umožňuje přenos dat rychlostí až 25 Mbit/s [8], pro daný účel tedy naprosto postačuje, neboť při jmenovité rychlosti otáčení  $n_n = 3000$  min<sup>-1</sup>

<sup>1</sup>Písmeno E značí variantu převodníku s výstupem s kódováním Manchester. Varianta bez kódování nebyla v okamžiku objednání součástek skladem. Vyhodnocení datového signálu to však neovlivňuje.

a počtu impulzů na jednu otáčku  $N = 500$  dosahuje signál na výstupu IRC kmitočtu

$$f = N \frac{n_n}{60} = 500 \cdot \frac{3000}{60} \text{ Hz} = 25 \text{ kHz.} \quad (2.2)$$

Výhodou tohoto řešení oproti oddělení pomocí optronů je, že digitální izolátor nevyžaduje použití dalších součástek.

V části 2.4.2 bylo dále uvedeno, že je třeba při připojení vstupu z IRC do hradlového pole zajistit, aby přechod signálu mezi úrovněmi nezpůsobil „přeskakování“ vyhodnocené úrovně, které by generovalo nežádoucí hrany. Pro tvarování signálu bylo navrženo použití Schmittova klopného obvodu. Zvolen byl integrovaný obvod SN74HC14N s 6 Schmittovými klopnými obvody a invertory na výstupu (využity jsou jen 3 kanály). Tvarování signálu je vzhledem k použití digitálního izolátoru, do kterého by měl vstupovat již signál s tvarovanými hranami, vhodné provést ještě na „analogové straně“ desky, tedy v části s napětím 5 V.

## 2.4.5 Napájení

Dalším dílčím úkolem při návrhu hardwaru byla potřeba zajistit napájení snímače otáček (IRC) a obvodů umístěných na navrhované DPS popsáných v částech 2.4.3 a 2.4.4. Na desce je třeba napájet dvě galvanicky oddělené části, které budou dále pro jednoduchost označovány podle použitých měřicích izolovaných převodníků jako „analogová část“ a „číslíková část“, přestože se v analogové části nachází i inkrementální snímač otáček generující číslicové signály. Analogová část musí právě s ohledem na IRC pracovat s napájecím napětím 5 V, zatímco číslicová část připojená ke vstupům hradlového pole musí fungovat na napětí 3,3 V.

Pro prověření možnosti napájení celé navrhované DPS z řídicí desky ZedBoard bylo třeba zjistit spotřebu obvodů, které mají být napájeny. Hodnoty maximálního spotřebovávaného výkonu použitých integrovaných obvodů byly zjištěny z jejich katalogových listů a jsou uvedeny v tabulce. V případě, že nebyla uvedena hodnota při daném napájecím napětí, byla použita hodnota pro nejbližší vyšší napětí, která byla uvedena.

**Tabulka 2.4:** Spotřeba obvodů a zařízení pro návrh napájení.

Obvod/zařízení	Spotř. výkon na straně		Zdroj
	analogové	číslíkové	
AMC1306E25	53,9 mW	37,95 mW	[6]
AMC1336-Q1	57,75 mW	18 mW	[7]
ISO7330FC	20 mW	50 mW	[8]
SN74HC14N	zanedbáno	–	–
snímač otáček	100 mW	–	odhad
celkem	232 mW	106 mW	–

Dle [3] je napájení vývojové desky ZedBoard dimenzováno pro zajištění napájení dalších rozšiřujících modulů připojených k desce s celkovým odběrem až  $I = 3 \text{ A}$  na napětí  $U_{CC} = 3,3 \text{ V}$ . Dostupný výkon je tedy

$$P = U_{CC}I = 9,9 \text{ W} \quad (2.3)$$

a pro napájení navrhovaného hardware je zcela dostatečný.

Pro napájení analogové části navrhované DPS byl zvolen malý oddělovací zvyšovací DC/DC měnič 3,3/5 V, 1 W typu TBA 1-0311. Měnič vyžaduje trvalé zatížení výstupu alespoň 10 % jmenovitého zatížení [9].

## 2.4.6 Návrh desky plošného spoje

Pro samotný návrh desky plošného spoje (DPS) vyplynuly z dříve popsaných zvolených řešení následující požadavky:

1. připojení k využitelným konektorům na desce ZedBoard pro napájení obvodů na navrhované DPS a předávání číslicových signálů (viz část 2.4.2, bod 4),
2. fyzické oddělení obvodů, které od sebe mají být galvanicky odděleny („analogová část“ a „číslicová část“),
3. osazení vidlic konektorů pro připojení k řídicím obvodům měniče a IRC, které jsou kompatibilní se zásuvkami na použitých propojovacích kabelech,
4. dodržení doporučení výrobců použitých součástek a dalších zásad správné praxe.

Ad 1: Každý z pěti konektorů  $2 \times 6$  pinů 2,54 mm na desce ZedBoard má čtyři napájecí piny ( $2 \times 3V3$ ,  $2 \times GND$ ). Dále je třeba zajistit připojení k I/O pinům:

- 2 piny (CLK, DATA) pro převodník měření proudu (AMC1306E25),
- 2 piny (CLK, DATA) pro převodník měření napětí (AMC1336),
- 4 piny pro ovládání měniče (viz část 2.3),
- 3 piny pro signály ze snímače otáček – kanály A, B a I (nulový impuls),

celkem tedy 11 pinů. Dále bylo nutno pamatovat na to, že hodinový a datový signál z převodníků měření proudu a napětí budou mít kmitočet stanovený výrobcem převodníků, tedy 5 až 21 MHz (viz tabulku 2.2). Datový signál o takovém kmitočtu není možné zpracovat procesorem a musí být zpracován obvody v hradlovém poli, musí být tedy přiveden na pin připojený do PL části hradlového pole na řídicí desce. Stejně tak se jeví jako vhodné použít logické obvody hradlového pole ke zpracování signálu z IRC a generování řídicího PWM signálu pro měnič. Z tohoto důvodu odpadá možnost použití konektoru na ZedBoard označeného JE, jehož piny jsou zavedeny přímo do PS části hradlového pole. Jako jediné možné řešení se potom nabízí současné využití konektorů označených JA a JB, které jsou umístěny vedle sebe a dohromady poskytují 16 I/O pinů. Připojení desky k těmto konektorům (zásuvkám) je tedy možné osazením kompatibilních vidlic  $2 \times 6$  pinů 2,54 mm v pravoúhlém provedení ve stejné vzdálenosti, v jaké jsou od sebe umístěny zásuvky na desce ZedBoard. Tyto vidlice budou označeny taktéž JA a JB.

Ad 2: Oddělení obvodů bude řešeno fyzickým rozmístěním těchto obvodů a oddělením jejich napájení a zemí. Zem „analogové části“ bude označena AGND, zem „číslicové části“ spojená se zemí řídicí desky bude označena GND. Fyzické oddělení analogových a číslicových obvodů je vhodné i pro omezení rušení [10].

Ad 4: Doporučeními výrobců součástek a správnou praxí rozumím především:

1. Zajištění blokování napájení číslicových integrovaných obvodů. To je nutné z důvodu, že číslicové obvody vzhledem ke své povaze odebírají proud impulzního charakteru, který není napájecí zdroj schopen dodat, a průchod napájecího proudu deskou plošných spojů je navíc zpoždován parazitní indukčností. Impulzní proud je proto zapotřebí dodat z blokovacích kondenzátorů [10]. Vhodné je také snížit parazitní indukčnost omezením plochy proudové smyčky. Mimo jiné je právě i z tohoto důvodu použit dvouvrstvý plošný spoj, přičemž ve spodní vrstvě jsou plochy vyplněné měď sloužící jako země (odděleně AGND a GND).

Lokální blokovací kondenzátory s kapacitou 100 nF jsou dle doporučení výrobce ([6]–[8]) umístěny u každého přívodu napájení izolovaných analogově-číslicových převodníků a digitálního izolátoru. Dále byl na každou odděleně napájenou stranu umístěn jeden společný filtrační blokovací kondenzátor s kapacitou 10  $\mu$ F.

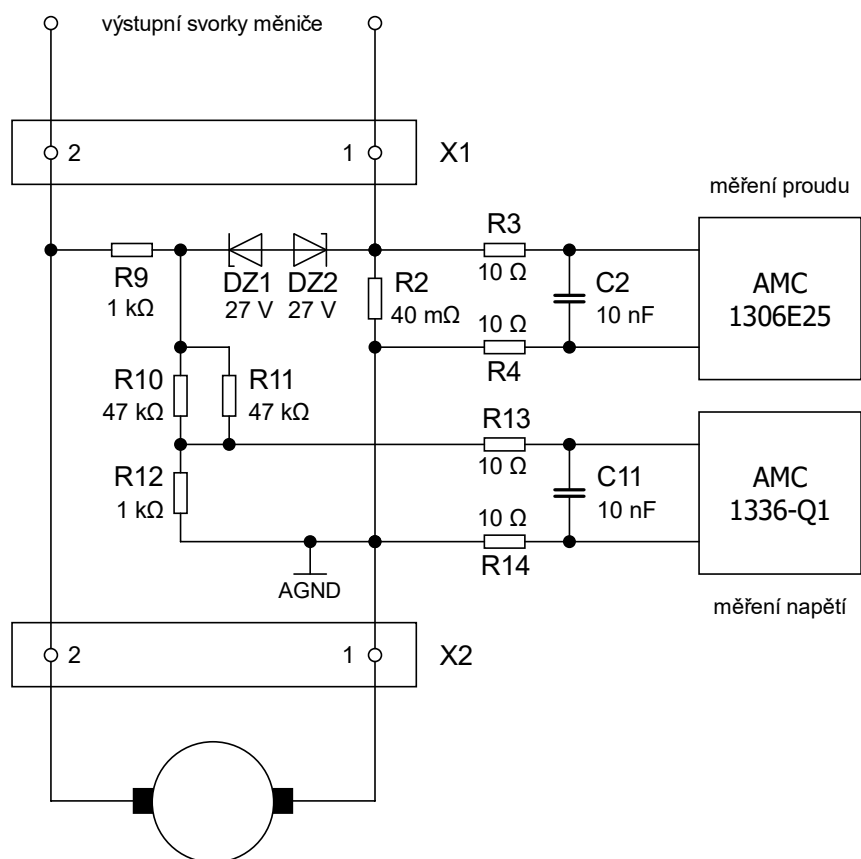
2. Zamezení aliasingu u analogově-číslicových převodníků. Při vzorkování analogových signálů může dojít k tzv. aliasingu, při kterém se signál o vysokém kmitočtu v navzorkovaném průběhu projeví jako falešný signál nižšího kmitočtu [11]. Pro zamezení vzniku těchto falešných signálů musí být vstupní signál před vzorkováním filtrován tak, aby byl vzorkovací kmitočet podle Kotělnikovova teorému alespoň dvojnásobný oproti největšímu kmitočtu, který se v signálu vyskytuje [2, str. 414]. Jako antialiasingový filtr byla použita RC dolní propust dle doporučení výrobce převodníků uvedeného v [6], [7].
3. Použitý izolovaný DC/DC měnič TBA 1-0311 musí být trvale zatížen alespoň z 10 % jeho jmenovitého zatížení (viz část 2.4.5). Číslicové obvody s impulzním odběrem proudu není (ani při použití blokovacích kondenzátorů) možné považovat za trvalé zatížení. Z tohoto důvodu je navrženo zatížení rezistorem a LED, která zároveň svícením indikuje přítomnost napájecího napětí v „analogové části“, a tím – vzhledem k napájení DC/DC měniče z „digitální části“ – vlastně napájení celé desky. Hodnota odporu rezistoru byla navržena tak, aby byl dodržen minimální požadovaný odběr 20 mA (odpovídající spotřebě 100 mW na 5 V, to je 10 % z 1 W) a zároveň maximální proud LED v propustném směru 30 mA, a činí 120  $\Omega$ .
4. Jištění DC/DC měniče. Použita byla pomalá pojistka 800 mA dle doporučení výrobce měniče v [9]. Na desku byl osazen držák, do kterého se pojistka vkládá.

Dále bylo třeba navrhnout analogovou část obvodů: měření proudu a napětí. Pro měření kotevního proudu motoru s použitím snímacího rezistoru je zapotřebí, aby tento proud přímo procházel navrhovanou DPS. Pro připojení přívodu z měniče a vývodu na motor byly použity šroubové svorkovnice. Volba snímacího rezistoru pro měření proudu byla již popsána v části 2.4.3. Na snímacím rezistoru bude při jmenovitém proudu ztrátový výkon přibližně 0,9 W (viz tabulku 2.3). Proto byl jednak zvolen rezistor s větším pouzdrem SMD 2010, a tudíž větší kontaktní plochou, jednak je na obou přívodech součástky navržena úmyslně velká plocha měděného motivu pro lepší přestup tepla do okolí.

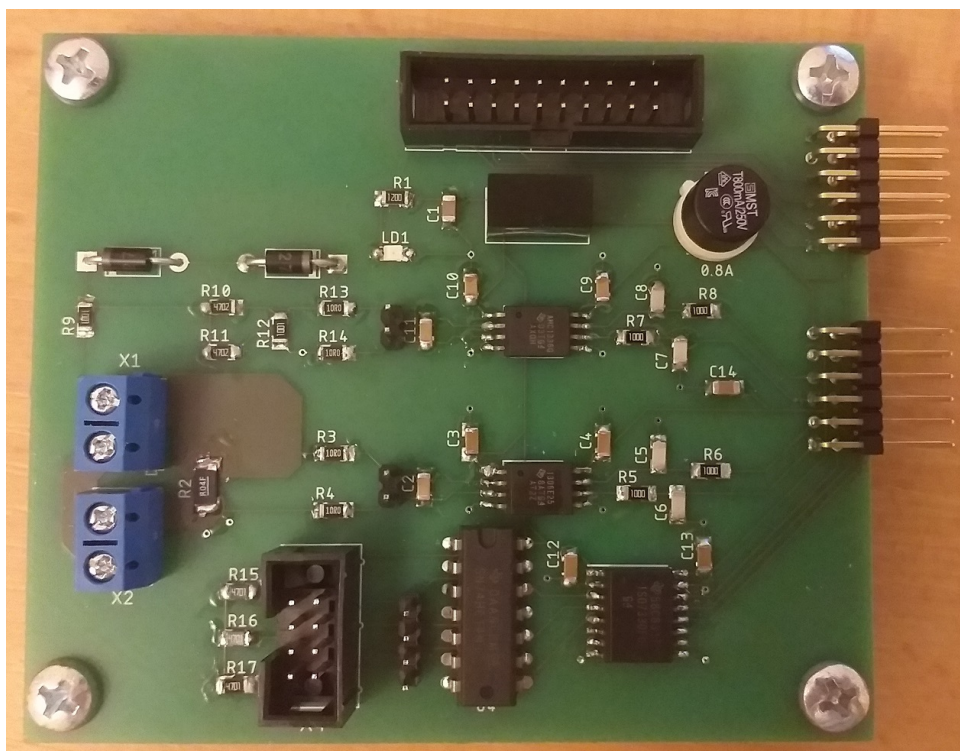
Pro měření napětí na kotvě motoru byl navržen odporový dělič s dělicím poměrem 25,5 : 1. Z důvodu ochrany měřicího převodníku proti přepětí jsou paralelně k části děliče připojeny antisériově zapojené Zenerovy diody. Schéma navržených měřicích obvodů je na obrázku 2.5. Výrobce převodníků doporučuje, aby byly se zemí napájení „analogové části“ spojeny body, ke kterým je připojen záporný měřicí vstup [6], [7]. Proto je svorka X2.1 zároveň zemí napájení AGND. Z toho vyplývá nutnost zapojení převodníku pro měření napětí tak, že při chodu motoru je při kladném smyslu proudu měřeno záporné napětí. Tato skutečnost je zohledněna a měřené hodnoty jsou zobrazovány tak, aby byla dodržena spotřebičová orientace proudu a napětí.

Na základě nabídky výrobce DPS byl zvolen dvouvrstvý plošný spoj s tloušťkou vrstvy mědi 18  $\mu\text{m}$ . Obecně byla použita šířka vodivých cest 200  $\mu\text{m}$ , vybrané cesty pro napájení mají šířku 254  $\mu\text{m}$ . Cesty, které vedou kotevní proud motoru, byly navrženy s šířkou 4 mm, při které by podle [10, obr. 4.12] nemělo oteplení při průchodu jmenovitého proudu přesáhnout 40 K, reálně je však oteplení výrazně menší.

Navržená deska plošného spoje byla zadána k výrobě, ruční osazení a pájení provedl, stejně jako návrh, autor této práce. Schémata, seznam použitých součástek a popis pinů konektorů jsou přílohou této práce.



Obrázek 2.5: Obvody pro měření proudu kotvy a napětí na kotvě.



Obrázek 2.6: Hotová osazená deska plošného spoje.



## Kapitola 3

# Regulátory a ovládání pohonu

### 3.1 PID regulátor

PID regulátor je jedním z často používaných nástrojů pro automatické řízení a regulaci. Regulátor obecné veličiny  $x$  reaguje na regulační odchylku  $u$ , která se vypočte jako rozdíl požadované hodnoty této veličiny  $x_r$  a skutečné aktuální hodnoty  $x_m$ , která se získá jejím měřením:

$$u = x_r - x_m. \quad (3.1)$$

Regulační odchylka je vstupem regulátoru, výstupem regulátoru je pak veličina  $y$ , na jejíž hodnotu reaguje akční člen, čímž za určitých podmínek dojde k ovlivnění hodnoty regulované veličiny  $x$ .<sup>1</sup>

Spojité PID regulátor je člen, který na základě regulační odchylky svému výstupu přiřadí hodnotu podle matematického předpisu [11]

$$y(t) = K_p \left( u(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t u(\tau) d\tau + T_d \frac{du(t)}{dt} \right). \quad (3.2)$$

Konstantu  $K_p$  nazýváme proporcionalní konstantou,  $T_i$  integrační časovou konstantou a  $T_d$  derivační časovou konstantou.<sup>2</sup> Provedením Laplaceovy transformace získáme přenos tohoto regulátoru v operátorové oblasti

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (3.3)$$

Chceme-li realizovat regulaci s použitím číslicové techniky, je třeba vzít ohled na určité odlišnosti spojitých a diskretních systémů. Nejvýraznější odlišností je, že číslicová technika (ať už jde o mikroprocesor nebo například logické obvody realizované v hradlovém poli) pracuje po krocích s určitou periodou. U regulátorů je tato perioda spjata s periodou vzorkování při měření regulované veličiny, jelikož měřená hodnota – a tedy i regulační odchylka – je dostupná pouze v určitých diskretních časových okamžicích [11]. Integrační a derivační člen PID regulátoru je tedy nutno aproximovat. Pro integrál byla zvolena lichoběžníková aproximace, derivace byla aproximována směrnicí úsečky mezi daným bodem a bodem předchozím. Provedením těchto aproximací přechází předpis zadaný rovnicí 3.2 na předpis

$$y(k) = K_p \left[ u(k) + \frac{T}{2T_i} \sum_{i=1}^k (u(i) + u(i-1)) + \frac{T_d}{T} (u(k) - u(k-1)) \right], \quad (3.4)$$

<sup>1</sup>Označení veličin, které je v této části použito, bylo zvoleno pro popis z pohledu regulátoru, pro který je vstupem regulační odchylka  $u$  a výstupem veličina  $y$ . V operátorové oblasti pak platí  $Y(s) = G(s)U(s)$ , kde  $G(s)$  je přenos regulátoru. Toto označení je následně použito i v samotném programu. V literatuře však můžeme nalézt i označení  $e$  pro regulační odchylku,  $u$  pro výstup regulátoru a  $y$  pro regulovanou veličinu [2], [11].

<sup>2</sup>V literatuře, např. [1], lze nalézt stejné označení i pro konstanty definované odlišně. V této práci však bude dodržován význam konstant určený rovnicí 3.2.

kde  $k$  je pořadí vzorku<sup>3</sup> a  $T$  je vzorkovací perioda (vzorek  $k$  byl tedy pořízen v čase  $t = kT$ ). Tato rovnice je jedním z možných předpisů diskrétního PID regulátoru [11], nazývaného též proporcionálně-sumačně-diferenčním (PSD) regulátorem [2].

Proporcionální člen sám o sobě nastavuje hodnotu výstupu přímo úměrnou regulační odchylce a je základním členem starajícím se o dosažení nulové regulační odchylky, sám o sobě k tomu však nepostačuje a v ustáleném stavu regulační smyčky je stále nenulová regulační odchylka. K odstranění trvalé regulační odchylky slouží integrační člen. Účelem derivačního členu je zlepšení stability regulační smyčky: derivační člen „předvídá“ budoucí vývoj regulační odchylky, a může tak reagovat účinněji než proporcionální člen [11].

### 3.1.1 Unášení integračního členu (windup) a jeho potlačení

Reálný akční člen obvykle nedokáže reagovat na libovolný výstup regulátoru vypočtený dle rovnice 3.4, ale pouze v rozsahu omezeném jeho technickými možnostmi, parametry dalších prvků regulované soustavy nebo dalšími vlivy. Příkladem může být použitý H-můstek (viz část 2.3), jehož výstupní napětí nemůže být v absolutní hodnotě vyšší než napětí vstupní, i kdyby bylo vyšší napětí regulátorem požadováno. V takovém případě se z uzavřené regulační smyčky stává smyčka otevřená, protože zásah akčního členu neodpovídá výstupu regulátoru vypočtenému dle rovnice 3.4, ale je omezen na maximální možný [11]. Integrační člen tak již nemůže zásah akčního členu zvětšovat, ale regulační odchylka je nadále integrována a výstup integračního členu tak může dosáhnout velkých hodnot (odtud anglické pojmenování windup). Po dosažení žádané hodnoty pak nedojde ke změně znaménka výstupu regulátoru, dokud regulační odchylka s opačným znaménkem netrvá dostatečně dlouhou dobu na to, aby se předtím naintegrovaná odchylka odintegrovala. Výsledkem je opožděná reakce a velké přeregulování [11].

Unášení integračního členu je možné zamezit několika metodami. Pro příklad uvedme dvě takové metody.

1. **Zastavení integrace při dosažení omezení výstupu** dokud regulační odchylka nezmění své znaménko. Do té doby zůstává integrační člen konstantní [11].
2. Metoda **vysledování (back-calculation)**, při které je v integračním členu před integrací od regulační odchylky odečten člen úměrný rozdílu výstupu regulátoru před a po omezení [11]. Uvažujme hodnotu výstupu regulátoru  $y_r$ , která je následně omezena na hodnotu  $y_c$ . Pro takto upravený spojitý PID regulátor potom namísto rovnice 3.2 platí

$$y_r(t) = K_p \left[ u(t) + \int_0^t \left( \frac{1}{T_i} u(\tau) - \frac{1}{K_p T_t} (y_r(\tau) - y_c(\tau)) \right) d\tau + T_d \frac{du(t)}{dt} \right]. \quad (3.5)$$

Konstanta  $T_t$  určuje míru vlivu rozdílu výstupu před a po jeho omezení, aby byl windup integračního členu potlačen, musí platit  $T_t < T_i$  [11].

Pro diskrétní PID regulátor pak bylo odvozeno

$$\begin{aligned} y_r(k) = & K_p u(k) + \frac{T}{2} \sum_{i=1}^k \frac{K_p}{T_i} (u(i) + u(i-1)) + \\ & + \frac{T}{2} \sum_{i=2}^k \frac{1}{T_t} (y_c(i-1) - y_r(i-1) + y_c(i-2) - y_r(i-2)) + \\ & + \frac{K_p T_d}{T} (u(k) - u(k-1)). \quad (3.6) \end{aligned}$$

<sup>3</sup>Člen  $y(k)$  a podobné mají skutečně význam jen pro přirozená  $k$ , z matematického hlediska jde o posloupnost. Zápis se závorkami je použit z důvodu pozdějšího využití dolních indexů pro jiné účely.

Pro realizaci regulace v rámci této práce byla zvolena metoda vysledování, jelikož při ověření chování regulační smyčky simulací s použitím matematického modelu (viz část 4.1) vykazovala kvalitnější regulační děj.

### 3.1.2 Odvození přírůstkového tvaru regulátoru

Předpis v rovnici 3.6 je pro svoji složitost pro softwarovou implementaci diskrétního regulátoru nevhodný. Proto byl z této rovnice odvozen vhodnější přírůstkový tvar. Pro přehlednost označme

$$r(k) = y_r(k) - y_c(k). \quad (3.7)$$

Potom

$$\begin{aligned} \Delta y_r &= y_r(k) - y_r(k-1) = \\ &= K_p \left( 1 + \frac{T}{2T_1} + \frac{T_d}{T} \right) u(k) - K_p \left( 1 - \frac{T}{2T_1} + \frac{2T_d}{T} \right) u(k-1) + \\ &+ K_p \frac{T_d}{T} u(k-2) + \frac{T}{2T_t} (r(k-1) + r(k-2)) = \\ &= a_0 u(k) + a_1 u(k-1) + a_2 u(k-2) + b_0 (r(k-1) + r(k-2)), \end{aligned} \quad (3.8)$$

kde

$$a_0 = K_p \left( 1 + \frac{T}{2T_1} + \frac{T_d}{T} \right), \quad (3.9)$$

$$a_1 = -K_p \left( 1 - \frac{T}{2T_1} + \frac{2T_d}{T} \right), \quad (3.10)$$

$$a_2 = K_p \frac{T_d}{T}, \quad (3.11)$$

$$b_0 = \frac{T}{2T_t}. \quad (3.12)$$

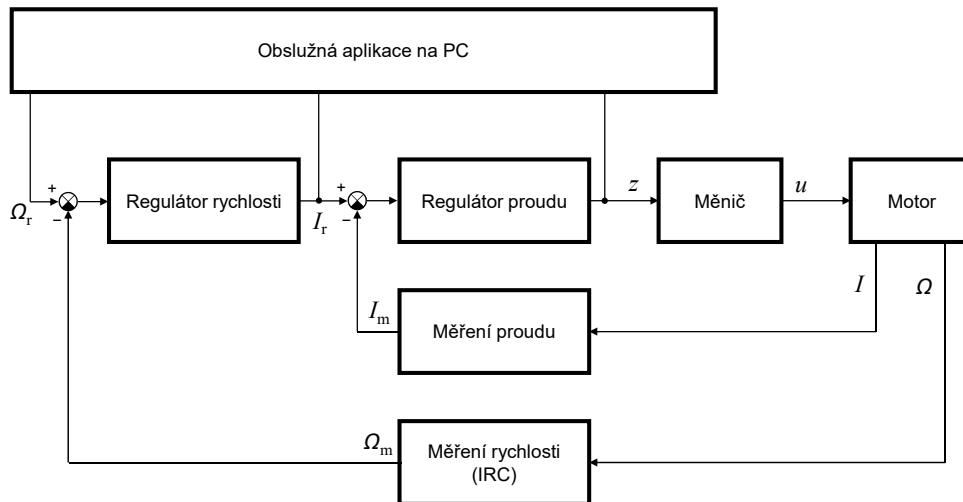
Regulátory proudu a rychlosti jsou v této práci navrhovány jako regulátory proporci-onálně-integrační (PI) bez derivačního členu, platí tedy  $T_d = 0$ . Potom je možné hodnotu výstupu regulátoru vypočítat jako

$$y_r(k) = y_r(k-1) + a_0 u(k) + a_1 u(k-1) + b_0 (r(k-1) + r(k-2)). \quad (3.13)$$

## 3.2 Regulační obvod

Pro regulaci pohonu jsou navrženy regulační smyčka proudová a jí nadřazená regulační smyčka rychlostní. Pohon tedy bude možné regulovat na požadovanou otáčivou rychlost.

Vstupem regulátoru proudu je měřená hodnota proudu a žádaná hodnota proudu regulátorem rychlosti, výstupem do měniče je zatěžovatel. Hodnota zatěžovatele bude omezena na rozsah, který měnič umožňuje. Vstupem regulátoru rychlosti jsou měřené a žádané otáčky, výstupem je žádaná hodnota proudu předávaná do regulátoru proudu. Tato hodnota bude omezena na jmenovitý proud motoru 4,7 A. Řízení bude navrženo tak, aby bylo možné oba regulátory vyřadit a zadávat požadovaného zatěžovatele ručně nebo vyřadit regulátor rychlosti a ručně zadávat žádanou hodnotu kotevního proudu. Zadání žádaných hodnot se bude uskutečňovat z osobního počítače pomocí obslužné aplikace. Uspořádání regulačních smyček je znázorněno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Navržený regulační obvod.

### 3.3 Implementace v hradlovém poli

Dalším důležitým krokem pro sestavení pohonu byla samotná realizace navržených regulátorů proudu a rychlosti. Pro řízení pohonu je využito hradlové pole na vývojové desce ZedBoard, regulátory jsou tedy řešeny jako diskrétní. Při tom bylo využito možností použitého hradlového pole řady Zynq-7000 SoC, které v sobě integruje klasické programovatelné logické obvody (část PL) a mikroprocesor (část PS). Navrhovaná funkce byla mezi tyto části rozdělena takto:

- Programovatelné logické obvody (PL) zajistí vhodné zpracování vstupních dat z izolovaných analogově-číslicových převodníků pro měření proudu a napětí. Data musí být přenášena vysokou rychlostí (dle specifikace výrobce 5 až 21 MHz [6], [7]) a procesor by je bez předzpracování k tomu určenými obvody nezvládl zpracovat. V PL tedy budou navrženy obvody, které přijmou sériově přenášená data z převodníků, provedou jejich filtraci a předají procesoru naměřené hodnoty jako číselný údaj.

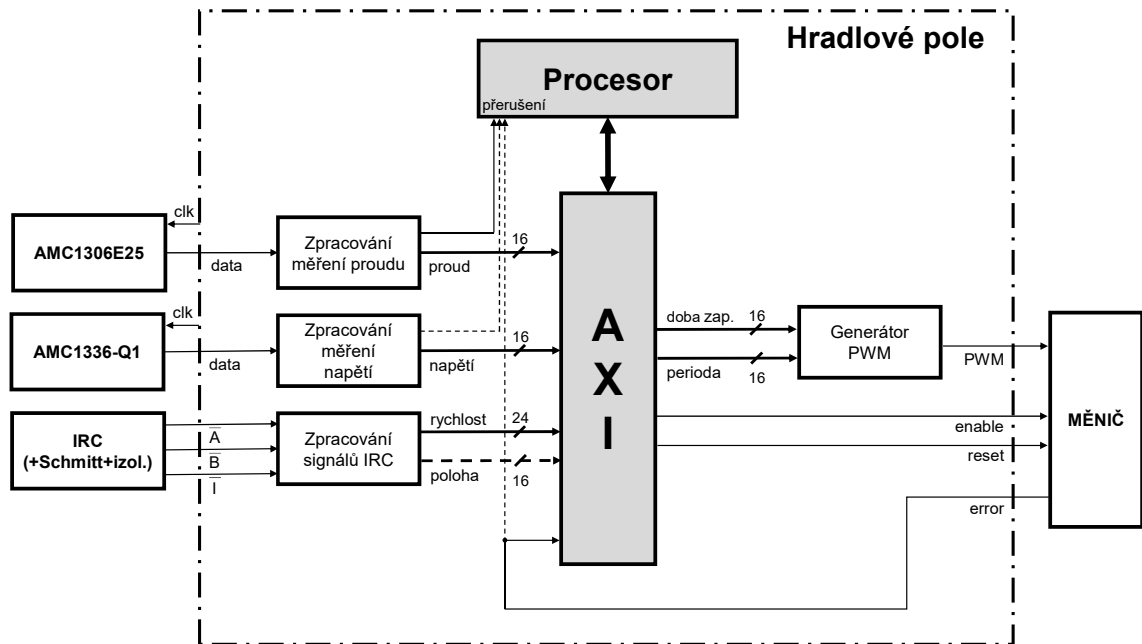
Stejným způsobem bude v PL řešeno i zpracování signálu z IRC, jehož kmitočet je sice nižší, nicméně tento přístup umožňuje výrazným způsobem snížit využití strojového času procesoru. IRC generuje na jednom kanálu 500 impulzů za otáčku, to je 2000 hran na obou kanálech dohromady, což při jmenovité rychlosti motoru  $n_n = 3000 \text{ min}^{-1}$  znamená hranu – událost, kterou by bylo nutné obsloužit, každých  $10 \mu\text{s}$ . Jiné možnosti, jak pomocí procesoru vyhodnotit signál z IRC, by byly z hlediska implementace oproti využití PL obtížnější. Obvody v PL tedy signál z IRC také převedou na číselný údaj, který bude procesorem dále zpracován.

PL budou využity také ke generování řídicího PWM signálu pro měnič. Cílem je umožnit generování PWM, a tedy i spínání výkonových tranzistorů měniče s co největším kmitočtem (měnič umožňuje spínání s kmitočtem až 40 kHz). PS bude moci ovlivnit parametry signálu předáním číselných údajů do PL.

Vzhledem k tomu, že všechny použité I/O jsou zavedeny do PL, budou PL zajišťovat i předávání ostatních signálů (např. *enable* měniče) z/do PS. PL budou také vytvářet rozhraní k OLED displeji umístěnému na desce ZedBoard, na kterém budou při provozu zobrazovány základní údaje. Hardware a software nutné k ovládání displeje jsou implementovány využitím volně dostupné knihovny *ZedboardOLED Display Controller IP v1.0*.

- Mikroprocesorová část (PS) zajistí plnění ostatních úkolů. Jedná se zejména o samotné algoritmy diskretních regulátorů, záznam průběhů sledovaných veličin pro možnost jejich vyhodnocení a komunikaci s obslužnou aplikací na osobním počítači. Realizace těchto funkcí v PL hradlového pole by byla složitá a zdlouhavá, zejména z důvodu omezených možností ladění implementovaných obvodů.

Je využito možnosti použitého vývojového prostředí pro návrh, syntézu a implementaci obvodů Vivado od společnosti Xilinx připojit navržený logický obvod k PS jako periférii. Tato periférie a PS si budou vyměňovat údaje pomocí sběrnice AXI, přičemž PS tuto sběrnici řídí (*master*). Pro návrh logických obvodů v hradlovém poli byl použit popisovací jazyk VHDL. Přehledové schéma logických obvodů je na obrázku 3.2. Kmitočet hodinového signálu (*clk*) pro tyto obvody je 10 MHz, není-li uvedeno jinak. Tento signál je z důvodu synchronizace se sběrnici AXI získáván dělením kmitočtu hodinového signálu 100 MHz této sběrnice. Ze sběrnice je také přebírán signál *reset* využitý k nulování registrů. Obvody pro reset a související s přechodnými stavy po resetu nemají vliv na regulační funkci a nejsou pro přehlednost dále uváděny ani zakresleny.

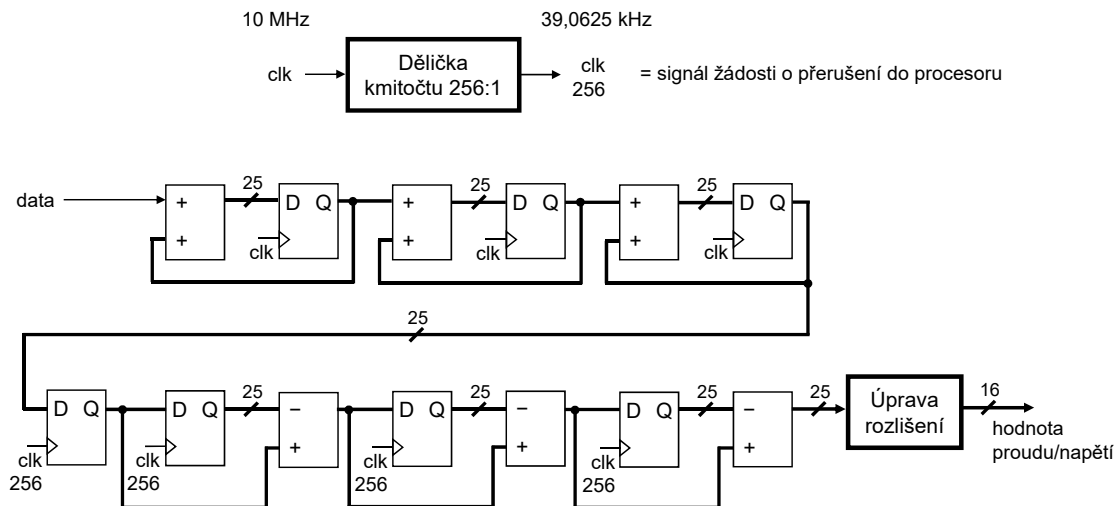


**Obrázek 3.2:** Přehledové schéma obvodů realizovaných v hradlovém poli. Přerušované vyznačené signály jsou implementovány, ale nejsou využity.

Obvody pro zpracování měření proudu a napětí jsou zcela shodné. Tvoří je především digitální filtr  $\text{Sinc}^3$  doporučený výrobcem analogově-číslicových převodníků pro zpracování výstupního signálu jejich Delta-Sigma modulátoru. Byla převzata a použita doporučená implementace tohoto filtru logickými obvody FPGA uvedená v [12]. Filtr tvoří tři za sebe zapojené integrátory, k jejichž výstupu jsou připojeny tři za sebe zapojené derivační členy, které pracují s delším krokem odpovídající rychlosti přenosu dat z převodníku (10 Mb/s) dělené 256 (pro oba obvody je použita společná dělička kmitočtu hodinového signálu). Z toho vyplývá perioda obnovování naměřené hodnoty 25,6  $\mu\text{s}$ , která může být pro další použití naměřených hodnot považována za periodu vzorkování. Proto je tento dělený hodinový signál s kmitočtem 39,0625 Hz zároveň zaveden do řadiče přerušení PS, kde je využit pro vyvolávání přerušení pro regulátor proudu.

Přenos použitého diskretního filtru  $\text{Sinc}^3$  s dělením 256:1 je dle [12]

$$H(z) = \left( \frac{1}{256} \cdot \frac{1 - z^{-256}}{1 - z^{-1}} \right)^3. \quad (3.14)$$



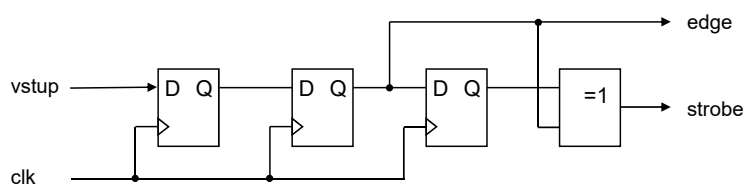
**Obrázek 3.3:** Obvod zpracování signálu převodníku pro měření proudu/napětí s číslicovým filtrem.

Obvod pro zpracování signálů z IRC sestává z těchto hlavních částí:

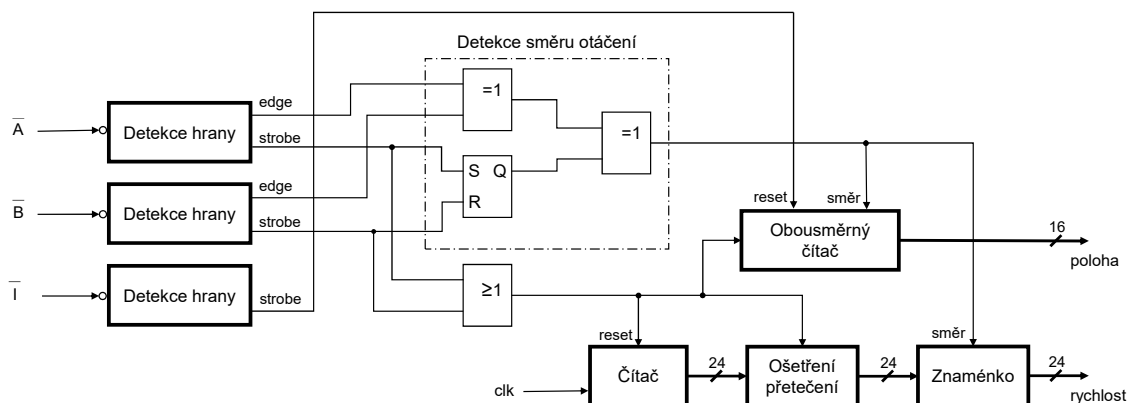
1. Obvod detekce hrany signálu. Signál z IRC z navržené DPS je vzhledem k invertujícímu Schmittově klopnému obvodu tvarujícímu tento signál před vstupem do tohoto obvodu invertován „zpět“ (spíše z formálních důvodů, pro funkci to není nutné). Výstupem obvodu jsou signály *edge* zachycující typ poslední hrany (náběžná nebo sestupná) a *strobe*, který krátkým impulzem indikuje přichozí hranu. Schéma obvodu je na obrázku 3.4.
2. Obvod detekce směru otáčení, který je vyhodnocen na základě posloupnosti hran na kanálech A a B.
3. Čítač pro měření délky časového úseku mezi dvěma hranami (na obou kanálech dohromady) vybavený obvodem ošetření přetečení čítače, ke kterému dojde, pokud se motor neotáčí.
4. Obousměrný čítač pro měření polohy (natočení) hřídele. Toto měření není využito.

Uspořádání uvedených částí obvodu zpracování signálů IRC je na obrázku 3.5.

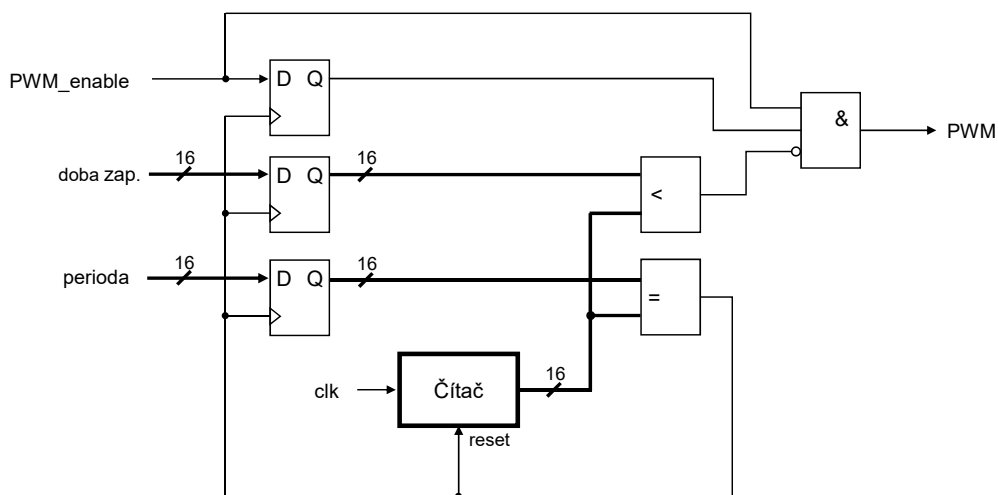
Poslední důležitou částí je generátor signálu s pulzně-šířkovou modulací (PWM) pro řízení měniče. Vstupem tohoto obvodu jsou číselné údaje odpovídající době zapnutí a periodě a signál pro zapnutí výstupu, výstupem je řídicí PWM signál s požadovanými parametry. Doba zapnutí a perioda signálu je udávána v násobcích periody hodin (100 ns). Jádrem tohoto obvodu je čítač sloužící k měření času, hodnota vstupních signálů je porovnávána se stavem čítače. Vstupní údaje jsou přebírány vždy na začátku periody signálu PWM, aby nedocházelo k nežádoucímu průběhu výstupu při jejich změně v průběhu periody. Obvod je znázorněn na obrázku 3.6.



**Obrázek 3.4:** Obvod detekce hrany signálu IRC.



Obrázek 3.5: Obvod zpracování signálů IRC.



Obrázek 3.6: Obvod generování řídicího PWM signálu.

### 3.4 Softwarové řešení regulátorů

Program procesoru integrovaného v hradlovém poli byl napsán v programovacím jazyce C. Program implementuje řízení motoru s regulací proudu a rychlosti se zadáváním žádaných hodnot pomocí obslužné aplikace pro osobní počítač. Na základě pokynů z této aplikace je také možné zaznamenat a stáhnout průběhy měřených a žádaných veličin a měnit konstanty regulátorů.

Program umožňuje řízení pohonu ve čtyřech režimech:

- **STOP.** V tomto režimu je zablokováno spínání měniče a pohon stojí.
- **Ruční režim.** V tomto režimu není prováděna regulace, měnič je řízen ručně zadáním hodnoty zatěživatele v obslužné aplikaci.
- **Regulace proudu.** V tomto režimu je aktivní regulátor proudu, který reguluje na zadanou žádanou hodnotu proudu.
- **Regulace rychlosti.** V tomto režimu jsou aktivní oba regulátory, v obslužné aplikaci se zadávají žádané otáčky.

Program je rozdělen na tři funkční části:

1. Obsluha přerušení vyvolávaného navrženou periferií při obnovování hodnoty proudu s periodou 25,6  $\mu$ s. V této části programu jsou řešeny regulátor proudu a řízení měniče.
2. Obsluha přerušení vyvolávaného časovačem s periodou 0,5 ms. V této části programu jsou řešeny regulátor rychlosti a zbývající řídicí logika. Za podmínky, že bylo z obslužné aplikace aktivováno, je zde také prováděno ukládání průběhů řídicích veličin (měřené a žádané hodnoty).
3. Hlavní program zajišťující především komunikaci s obslužnou aplikací přes sběrnici UART a vypisování aktivního režimu a naměřených hodnot na OLED displej.

### 3.4.1 Regulátor proudu a řízení měniče

Pro implementaci funkce regulátoru proudu a řízení měniče je v rámci obsluhy přerušení každých 25,6  $\mu$ s prováděno následující:

1. Z navrženého obvodu zpracování měření proudu je po sběrnici AXI vyčten údaj odpovídající naměřené hodnotě proudu. Tento údaj je přepočten na hodnotu v ampérech uloženou ve formátu čísla s plovoucí řádovou čárkou.
2. Z měřené a žádané hodnoty je vypočtena regulační odchylka. Zároveň jsou v paměti posunuty uložené hodnoty regulační odchylky a výstupu regulátoru z předchozích kroků. Uchovávají se jedna předchozí hodnota regulační odchylky a po dvou předchozích hodnotách výstupu regulátoru před a po omezení, aby bylo možno vypočíst aktuální výstup regulátoru dle rovnice 3.13.
3. Je proveden výpočet nového výstupu regulátoru dle rovnice 3.13. Výstupem regulátoru proudu je hodnota zatěživatele výstupního napětí z měniče.
4. Tento výstup je omezen do rozsahu  $\langle -0,84, 0,84 \rangle$  z důvodu minimální dovolené doby zapnutí a vypnutí tranzistorů měniče 2  $\mu$ s. Pro účely potlačení windupu je pro další kroky zapamatována jak hodnota výstupu před omezením, tak po omezení.
5. Je provedena kontrola měřené hodnoty proudu pro realizaci proudového omezení. Pokud tato přesahuje povolené meze, je hodnota zatěživatele omezena pouze na opačnou polaritu.
6. Z hodnoty zatěživatele je vypočtena doba zapnutí PWM řídicího signálu pro měnič a tato je po sběrnici AXI zapsána do generátoru PWM.

Perioda spínání je držena konstantní, zvolena byla perioda stejná, jako je perioda „vzorkování“ proudu, tedy 25,6  $\mu$ s, tomu odpovídá spínací kmitočet 39,0625 kHz.

Není-li uvedeno jinak, jsou všechny výpočty prováděny s čísly ve formátu plovoucí řádové čárky. Toto řešení je umožněno díky vybavení procesoru výkonnou jednotkou pro provádění operací s čísly v tomto formátu (FPU) a zjednodušuje práci při ladění programu.

Výše uvedené úkony jsou prováděny bez ohledu na to, zda je regulátor proudu využit, nebo je hodnota zatěživatele zadávána ručně, v takovém případě je pouze použita tato hodnota a nikoli výstup regulátoru. Toto řešení částečně umožňuje sledování chování regulátoru i bez jeho vlivu na skutečný chod pohonu. Z uvedeného také vyplývá, že funkce proudového omezení je zajištěna i při ručním zadání zatěživatele.



### 3.4.2 Regulátor rychlosti a ostatní řídicí logika

Program regulátoru rychlosti je spouštěn časovačem, který vyvolává přerušení každých  $T = 0,5$  ms. Časovač čítá s poloviční frekvencí oproti taktu procesoru [13], při použitím taktovacím kmitočtu  $666,6$  MHz je tedy nastaven na

$$N = \frac{f_{\text{CPU}} \cdot T}{2} = \frac{666,6 \text{ MHz} \cdot 500 \mu\text{s}}{2} = 166\,666 \quad (3.15)$$

period (zaokrouhлено dolů).

Samotná funkce je obdobná jako u regulátoru proudu s následujícími odchylkami:

- Naměřené hodnoty rychlosti jsou vzhledem k velkému rozptylu průměrovány. Příčina tohoto rozptylu je dále diskutována v části 4.3 a kapitole 5. Průběžný součet průměrovaných hodnot je prováděn v celočíselném formátu pro eliminaci vlivu zaokrouhlovacích chyb. Program umožňuje nastavení počtu průměrovaných vzorků z obslužné aplikace.
- Výstupem regulátoru je žádaná hodnota proudu pro regulátor proudu, tato je omezoována na maximální dovolenou hodnotu proudu  $4,7$  A. Tato hodnota je zapisována do proměnné.
- V případě, že jsou žádány nulové otáčky a měřená hodnota otáček v absolutní hodnotě klesne pod určitou mez (nastaveno  $50 \text{ min}^{-1}$ ), je regulátor rychlosti vyřazen a je nastaven nulový žádaný proud. Důvodem je, že při nízké rychlosti vykazuje z podstaty své činnosti snímač otáček velké časové zpoždění, a pokud by byl regulátor rychlosti ponechán v činnosti, došlo by po zastavení motoru k jeho rozběhu na opačnou stranu. Tímto opatřením je také určena minimální rychlost, na kterou lze regulovat.
- Omezení rychlosti není použito vzhledem k tomu, že se při napájení měniče ze zdroje napětí  $24$  V nemůže kvůli vlivu indukovaného napětí dostat mimo dovolenou oblast.

Do obsluhy přerušení pro regulátor rychlosti je také zařazena zbývající řídicí logika, zejména řešení přepínání provozních režimů, povolování a blokování pulzů měniče a vyslání impulsu pro reset měniče po spuštění programu a na vyžádání z obslužné aplikace.

### 3.4.3 Záznam průběhů a komunikace s obslužnou aplikací

Jak již bylo zmíněno, regulátor (regulátorem je zde myšlen mikroprocesor integrovaný v hradlovém poli) je vybaven funkcí záznamu průběhů vybraných veličin. Těmito veličinami jsou:

1. měřené napětí a měřený proud,
2. měřené a žádané otáčky (na vstupu do regulátoru rychlosti),
3. zatěžovatel a žádaný proud (na vstupu do regulátoru proudu).

Záznam neběží trvale, je nutné jej spustit z obslužné aplikace. Aktuální hodnoty veličin jsou pak zapisovány každých  $0,5$  ms (v rámci přerušení pro regulaci rychlosti) do RAM na desce ZedBoard. S ohledem na dobu trvání následného přenosu záznamu do počítače je možné zvolit po výše uvedených skupinách, které veličiny budou zaznamenávány. Záznam je možné ukončit a zaznamenané průběhy stáhnout z obslužné aplikace, záznam je také automaticky ukončen při vyčerpání přidělené kapacity paměti. Spuštěním dalšího záznamu je předchozí záznam v paměti přepsán.

Komunikace s obslužnou aplikací běžící na osobní počítači probíhá po sběrnici UART s využitím převodníku USB–UART na desce ZedBoard, deska je tedy k počítači připojena USB kabelem. Pro zajištění komunikace byl vytvořen vlastní jednoduchý protokol. Obslužná aplikace je jednotkou řídicí (*master*), regulátor je jednotkou podřízenou (*slave*). Obslužná aplikace může vyslat tři druhy požadavků:

- Požadavek na čtení hodnoty některé z proměnných, jejichž čtení regulátor umožňuje. Požadavek obsahuje komunikační adresu proměnné, tedy číslo určené k její identifikaci pro účely komunikace. Regulátor požadavek po jeho přijetí opakuje a připojí hodnotu proměnné. Tímto způsobem jsou z regulátoru vyčítány aktuální hodnoty proměnných zobrazované v obslužné aplikaci.
- Požadavek na zápis hodnoty některé z proměnných. Požadavek obsahuje komunikační adresu proměnné a hodnotu, která má být zapsána. Regulátor provede zápis a potvrdí provedení požadavku. Tímto způsobem jsou zadávány žádané hodnoty, volen provozní režim, měněny konstanty regulátorů a spouštění a zastavování záznam průběhů veličin. Zápis do proměnných, které jsou určeny jen ke čtení, není blokován, neboť takovým zápisem není možné ovlivnit fungování regulátoru.
- Požadavek na přenos záznamu průběhů sledovaných veličin. Regulátor potvrdí příjem požadavku, připojí údaje nutné k dalšímu zpracování přenášených dat (perioda ukládání hodnot, identifikace zaznamenaných veličin a velikost dat) a data uložená v paměti odešle.

Každá komunikační proměnná má rozsah 32 bitů. Vzhledem k množství přenášených dat, zejména při přenosu záznamu průběhů, jsou však hodnoty přenášeny v takovém formátu, aby byl přenos po sběrnici UART s rychlostí 115 200 Bd co nejefektivnější. Proto jsou například měřená a žádaná hodnota otáček přenášeny společně v rámci jedné proměnné. Formát pro přenos byl pro každou z komunikačních proměnných zvolen individuálně.

### 3.5 Obslužná aplikace pro osobní počítač

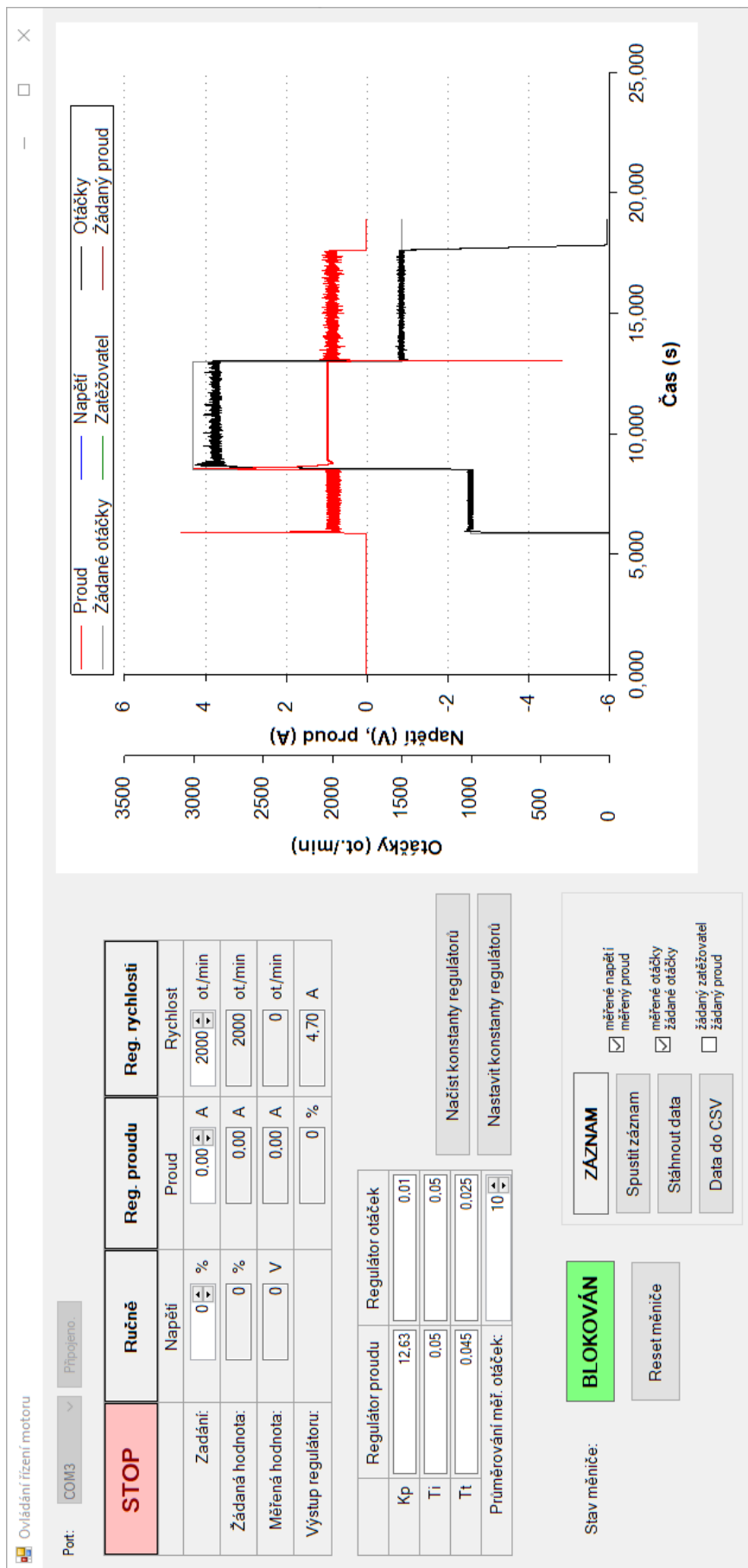
Pro účely ovládání pohonu, ladění regulátorů a stahování záznamů průběhů sledovaných veličin byla vytvořena obslužná aplikace pro osobní počítače s operačním systémem Windows. Aplikace je naprogramována v programovacím jazyce C# a využívá platformu .NET Framework 4.0.

Aplikace po připojení k regulátoru periodicky každých 200 ms vyčítá a zobrazuje aktuální měřené a žádané hodnoty a hodnoty na výstupu regulátorů. Hodnoty jsou uváděny v takovém smyslu, aby při kladném měřeném napětí protékal kotevním obvodem kladný proud a hodnota otáček byla kladná. Z toho důvodu je hodnota napětí zobrazována s opačným znaménkem, než je ve skutečnosti měřena (viz část 2.4.6). V aplikaci lze zadávat žádané hodnoty a přepínat režimy řízení (viz část 3.4). Dále aplikace umožňuje provedení změny konstant regulátorů a počtu průměrovaných naměřených hodnot otáček, zobrazuje stav měniče a umožňuje vyslání povelu k jeho resetu. Pomocí aplikace se také spouští a ukončuje záznam průběhů veličin a volí se, které skupiny veličin budou zaznamenávány. Po ukončení záznamu jej lze přenést do počítače, kde se v obslužné aplikaci vykreslí grafy průběhů veličin. Ke zobrazení grafu je použito volně dostupné knihovny ZedGraph<sup>4</sup>. Data průběhů lze pro další zpracování uložit do souboru.

Návod k obslužné aplikaci je přílohou této práce.

---

<sup>4</sup>Podobnost názvu s názvem použité vývojové desky ZedBoard je náhodná.



Obrázek 3.7: Okno obslužné aplikace.

## Kapitola 4

# Ladění regulátorů a provoz

### 4.1 Matematický model pohonu

Pro simulaci chování regulačního obvodu byl vytvořen matematický model pohonu v prostředí Matlab-Simulink. Pro model motoru se vyšlo ze základních zjednodušených poznatků o stejnosměrných strojích. Napětí na kotvě je dáno vztahem

$$u = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_M \Omega, \quad (4.1)$$

kde  $i$  je kotevní proud,  $\Omega$  je mechanická rychlost otáčení rotoru,  $R_a, L_a$  jsou odpor a indukčnost kotevního obvodu a  $k_M$  je vzhledem k tomu, že jde o stroj s cizím buzením permanentními magnety, konstanta. Dále platí

$$M = k_M i, \quad (4.2)$$

$$M - M_z = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (4.3)$$

kde  $M$  je hnací moment stroje,  $M_z$  je zátěžný moment a  $J$  je moment setrvačnosti rotoru [1]. Převedeme-li člen vyjadřující indukované napětí na druhou stranu a provedeme-li Laplaceovu transformaci rovnice 4.1, dostaneme

$$U(s) - k_M \Omega(s) = R_a I(s) + s L_a I(s), \quad (4.4)$$

úpravou a použitím vztahu pro časovou konstantu RL obvodu

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.5)$$

získáme

$$G_a = \frac{I(s)}{U(s) - k_M \Omega(s)} = \frac{1}{R_a I(s) + s L_a} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + s \tau_a}. \quad (4.6)$$

Dále dosadíme z 4.2 do 4.3 a provedeme Laplaceovu transformaci:

$$k_M I(s) - M_z(s) = s J \Omega(s), \quad (4.7)$$

odtud

$$\Omega(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{k_M I(s) - M_z(s)}{J}. \quad (4.8)$$

Vztahy 4.6 a 4.8 byly použity pro modelování stejnosměrného motoru.

Pro model měniče vycházíme z toho, že pro střední hodnotu výstupního napětí měniče platí

$$U = zU_m, \quad (4.9)$$

kde  $z$  je zatěžovatel a  $U_m$  je konstantní stejnosměrné vstupní napětí. Z hlediska řízení pohonu je vstupem měniče zatěžovatel  $z$  a výstupem střední hodnota napětí  $U$ . Měnič zároveň při své funkci vykazuje časové zpoždění, jelikož na změnu zatěžovatele nereaguje ihned, ale až při další periodě spínání. Jelikož byl krok regulátoru zvolen shodný s periodou spínání měniče (popsáno v části 3.4.1) a regulátor i generátor řídicího PWM signálu pro měnič jsou řízeny stejným hodinovým signálem, zpoždění reakce měniče na změnu výstupu regulátoru proudu se v rámci regulace nemění. Uvažováno je zpoždění o celou periodu spínání  $\tau_s = 25,6 \mu\text{s}$ . Přenos měniče je tedy

$$G_s(s) = \frac{U(s)}{Z(s)} = \frac{U_m}{1 + s\tau_s}. \quad (4.10)$$

Dalším prvkem regulačního obvodu je měření proudu ve zpětné vazbě. Zesílení tohoto bloku je 1, jelikož do regulátoru vstupuje přímo naměřená hodnota v ampérech. Při měření však dochází ke zpoždění, protože signál nesoucí měřenou hodnotu prochází dvěma filtry. Vliv analogového antialiasingového RC filtru před vstupem do analogově-číslíkového převodníku je zanedbatelný, protože je naladěn na vysoký zlomový kmitočet v řádu stovek MHz. Pro model regulačního obvodu je ale uvažován číslicový filtr implementovaný v logických obvodech hradlového pole. Tento filtr je diskrétní a vyššího řádu, pro účely matematického modelu bylo provedeno zjednodušení a filtr byl dle [12] nahrazen zpožďujícím členem 1. řádu s časovou konstantou  $\tau_m = 98 \mu\text{s}$ . Přenos bloku měření proudu je proto

$$G_m(s) = \frac{I_m(s)}{I(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_m}. \quad (4.11)$$

Při měření rychlosti pomocí IRC dochází k časovému zpoždění přenosu měřené hodnoty závislému na aktuální rychlosti, protože je měřena délka impulsu, která je nepřímo úměrná rychlosti otáčení. Časové zpoždění činí

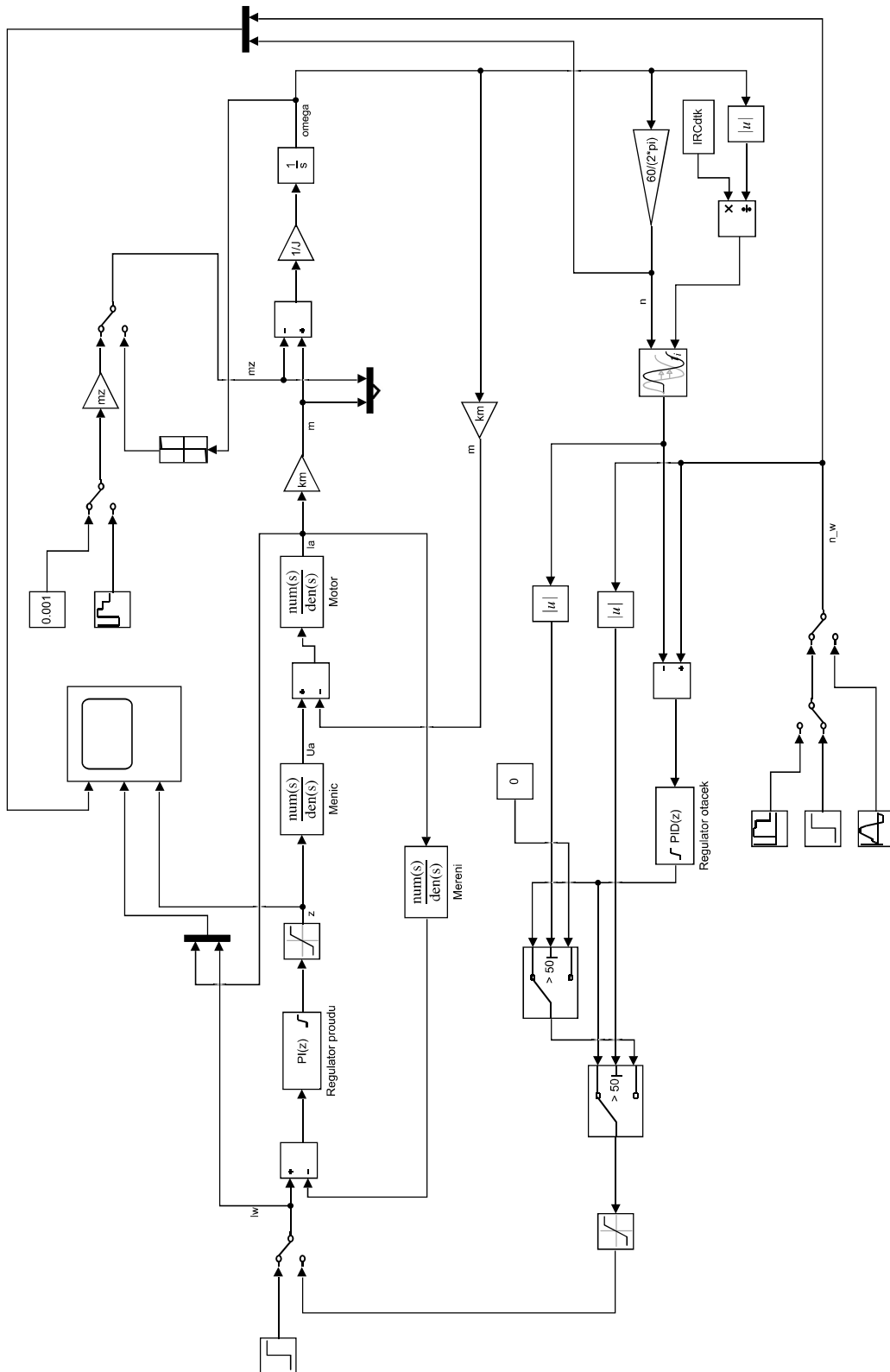
$$\tau_\Omega = \frac{2\pi}{N} \cdot \frac{1}{|\Omega|}, \quad (4.12)$$

kde  $N = 2000$  je počet hran na jednu otáčku na obou kanálech IRC dohromady. Toto zpoždění je v modelu v prostředí Matlab-Simulink zohledněno blokem proměnného časového zpoždění. Protože regulátor rychlosti pracuje s hodnotami v otáčkách za minutu, je měřená mechanická rychlost ještě přepočítávána na otáčky podle vztahu

$$n = \frac{60}{2\pi} \Omega. \quad (4.13)$$

Regulátory jsou v modelu v prostředí Matlab-Simulink reprezentovány blokem diskrétního PID regulátoru, a to včetně omezení výstupu a implementace metody vysledování pro potlačení unášení integračního členu. Kroky regulátorů byly zadány podle skutečnosti. V modelu bylo dále zohledněno chování regulátoru rychlosti při nízkých otáčkách, které bylo zavedeno do softwaru a je popsáno v části 3.4.2.

Model pohonu v prostředí Matlab-Simulink je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Model pohonu v prostředí Matlab-Simulink.

### 4.1.1 Určení konstant pro simulaci

Jedinými známými parametry použitého motoru byly jeho štítkové hodnoty. Konstanty v matematickém modelu pro simulaci pohonu proto byly určeny následujícími způsoby:

- Odpor obvodu kotvy  $R_a$  byl změřen a činí  $1,0\ \Omega$  bez použití vyhlazovací tlumivky a  $1,5\ \Omega$  s tlumivkou.
- Indukčnost obvodu kotvy  $L_a$  byla zjištěna měřením odezvy motoru na skok napětí, odečtením časové konstanty a následným přepočtením časové konstanty na indukčnost podle vztahu 4.5. Takto zjištěné hodnoty indukčnosti činí  $1,2\ \text{mH}$  bez použití vyhlazovací tlumivky a  $75\ \text{mH}$  s tlumivkou.<sup>1</sup>
- Konstanta  $k_M$  byla zvolena tak, aby byly v ustáleném stavu při jmenovitém napětí na kotvě a bez zatížení otáčky motoru mírně vyšší než jmenovité.
- Zbývající konstanty byly odhadnuty.

## 4.2 Ladění regulátorů

Laděním regulátoru nazýváme proces nalezení vhodných konstant regulátoru tak, aby regulační děj co nejlépe odpovídal požadavkům. Pro nalezení konstant regulátorů existuje celá řada metod, můžeme však rozlišit tři hlavní přístupy:

- **Experimentální, též heuristické metody** ladění regulátorů spočívají v nalezení vyhovujících konstant regulátoru postupným zkoušením různých variant. Jde tedy v podstatě o metody pokus-omyl. Po provedení pokusu se lze do jisté míry řídit získaným průběhem regulačního děje a podle toho navrhnout změnu konstant pro další pokusy.
- **Empirické metody** ladění regulátorů vyžadují znalost nebo zjištění určitých parametrů regulované soustavy, nevyžadují však její model. Na základě těchto parametrů jsou pak dle empiricky nalezených pravidel navrhovány konstanty regulátoru. Příkladem může být jedna z metod označovaných jako Ziegler-Nicholsovy metody, při které se konstanty regulátoru určují na základě tzv. kritického zesílení, tedy hraničního zesílení P regulátoru, při kterém začne soustava v reakci na jednotkový skok netlumeně oscilovat, a periody těchto oscilací [1], [2], [11].
- **Analytické a optimalizační metody** ladění regulátorů předpokládají existenci matematického modelu regulované soustavy a konstanty regulátoru určují na základě znalosti přenosu soustavy. Mezi tyto metody patří například metody optimálního modulu a symetrického optima [1], [2], [11].

Pro proudovou regulační smyčku byl určen přenos soustavy, aby bylo možné použít některou z analytických a optimalizačních metod ladění regulátoru proudou. Jak bylo znázorněno na obrázku 3.1, proudovou regulační smyčku tvoří regulátor proudu, měnič, motor a blok měření proudu. Regulovanou soustavu tedy tvoří všechny vyjmenované bloky mimo samotného regulátoru, které jsou zařazeny za sebe. Při regulaci proudu stejnosměrného motoru se obvykle předpokládá, že elektromechanická časová konstanta je výrazně větší než časová konstanta obvodu kotvy  $\tau_a$  [1], a proto můžeme při regulačním ději vliv změny indukovaného napětí zanedbat. Vyjdeme z rovnice 4.6 a použijeme toto zjednodušení:

$$G_{a2} = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + s\tau_a}. \quad (4.14)$$

---

<sup>1</sup>Takto zjištěná indukčnost neodpovídá hodnotě indukčnosti  $92\ \text{mH}$  uvedené na tlumivce (viz část 2.3).

Celkový přenos regulované soustavy je tedy

$$G(s) = G_s(s)G_{a2}G_m(s) = \frac{U_m}{R_a} \cdot \frac{1}{(1 + s\tau_s)(1 + s\tau_a)(1 + s\tau_m)} \quad (4.15)$$

a jelikož platí  $\tau_s, \tau_m \ll \tau_a$ , můžeme pro další zjednodušení tyto konstanty sloučit do jedné. Označíme  $K = U_m/R_a$ ,  $\tau_1 = \tau_a$  a  $\tau_2 = \tau_s + \tau_m$  a získáme přenos soustavy

$$G(s) = \frac{K}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}, \tau_1 \gg \tau_2. \quad (4.16)$$

Pro ladění regulátoru proudu byla zvolena metoda optimálního modulu. Tato metoda vychází z požadavků na modul kmitočtového přenosu uzavřeného regulačního obvodu  $G_w(j\omega)$ . Dle [2] je požadováno, aby pro  $\omega \rightarrow 0$  platilo

$$|G_w(j\omega)| \rightarrow 1 \quad (4.17)$$

a zároveň se na modulové kmitočtové charakteristice nevyskytovala maxima, která znamenají rezonanční jev, „tj. náchylnost uzavřeného regulačního obvodu k málo tlumeným kmitům“ [2, str. 260]. Proto je kladen požadavek

$$\frac{d|G_w(j\omega)|}{d\omega} \leq 0. \quad (4.18)$$

V literatuře je možné pro různé tvary přenosu regulované soustavy nalézt vztahy pro výpočet konstant regulátoru v souladu s uvedenými požadavky. V [11, str. 171] jsou uvedeny následující vztahy pro konstanty PI regulátoru při tvaru přenosu jako ve vztahu 4.16:

$$K_p = \frac{\tau_1}{2K\tau_2}, \quad (4.19)$$

$$T_i = \tau_1. \quad (4.20)$$

Proporcionální zesílení  $K_p$  a integrační časová konstanta  $T_i$  byly vypočteny dle těchto vztahů, a to ve variantě pro kotevní obvod bez použití vyhlazovací tlumivky a ve variantě s tlumivkou. Konstanta pro metodu výsledování (potlačení windupu)  $T_t$  byla určena experimentálně na základě výsledků simulací v prostředí Matlab-Simulink.

Vzhledem ke složitějšímu matematickému popisu rychlostní regulační smyčky byly vyhovující konstanty regulátoru rychlosti nalezeny experimentálně pomocí simulací v prostředí Matlab-Simulink. Experimentováno bylo i s derivační složkou, nakonec však nebyla využita i s ohledem na to, že změny zatížení se u tohoto pohonu nepředpokládají. Regulátor rychlosti byl tedy také implementován jako PI regulátor. Průměrování měřené hodnoty otáček bylo nastaveno na 10 vzorků tak, aby byl rozptyl hodnot přijatelný, ale zároveň nebylo průměrováním způsobeno příliš velké zpoždění reakce na změnu rychlosti otáčení.

Získané konstanty regulátorů jsou uvedeny v tabulce 4.1.

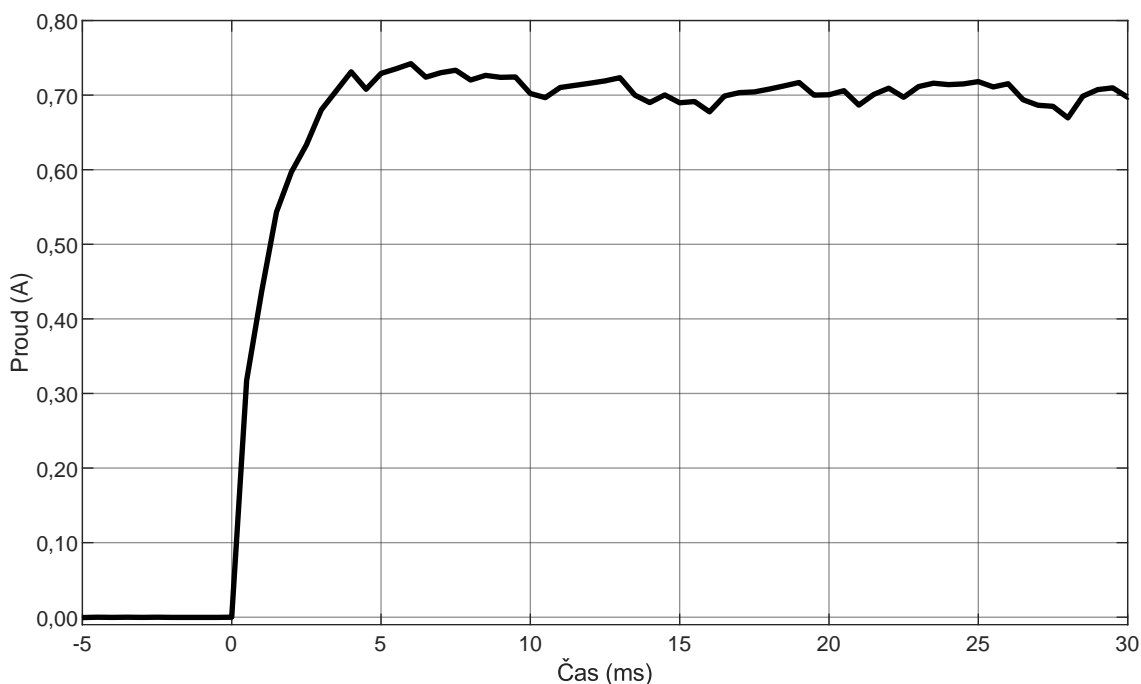
**Tabulka 4.1:** Přehled použitých konstant regulátorů.

	Regulátor proudu		Regulátor rychlosti
	bez tlumivky	s tlumivkou	
$K_p$	0,2021 A <sup>-1</sup>	12,63 A <sup>-1</sup>	0,01 A · min
$T_i$	0,0012 s	0,05 s	0,05 s
$T_t$	0,0011 s	0,045 s	0,025 s

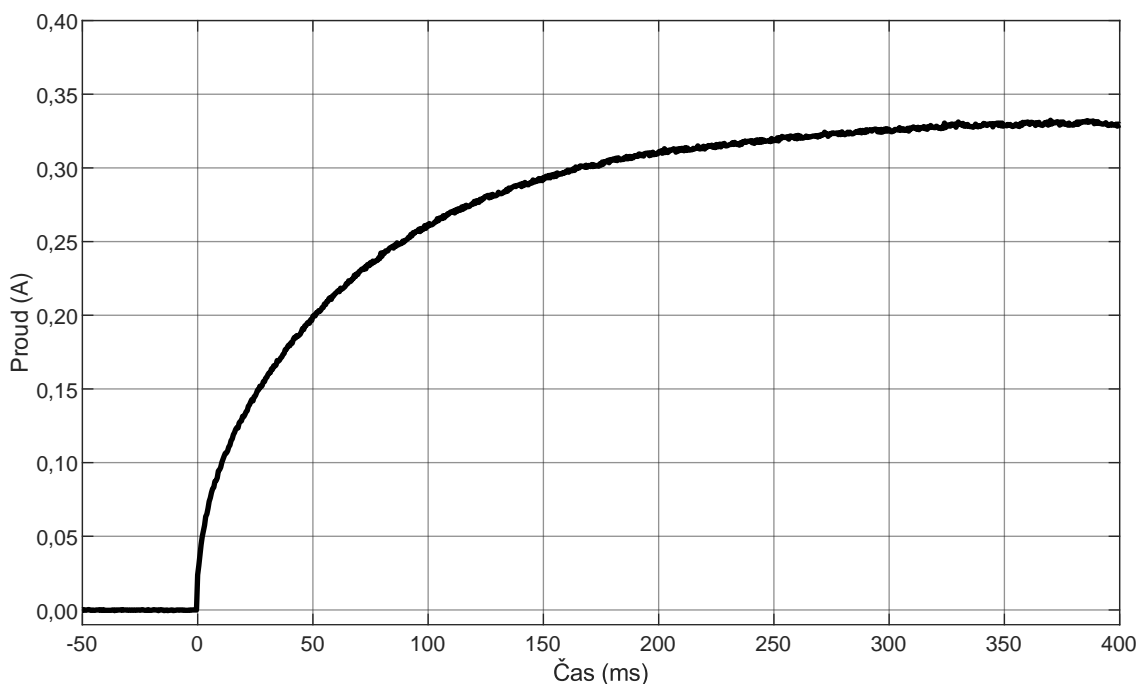


### 4.3 Ověření funkce regulace simulací a v provozu

Při ověření funkce pohonu v provozu byly nejprve sledovány reakce motoru na skok střední hodnoty napájecího napětí. Pro zjištění odezvy proudu bylo voleno takové napětí (prostřednictvím změny zatěživatele), aby rotor nepřekonal suché tření a neroztočil se, čímž byl vyloučen vliv indukovaného napětí. Měření bylo opakováno několikrát s použitím sériově zapojené vyhlazovací tlumivky i bez tlumivky. Vybrané odezvy proudu na skok napětí jsou na obrázcích 4.2 a 4.3.

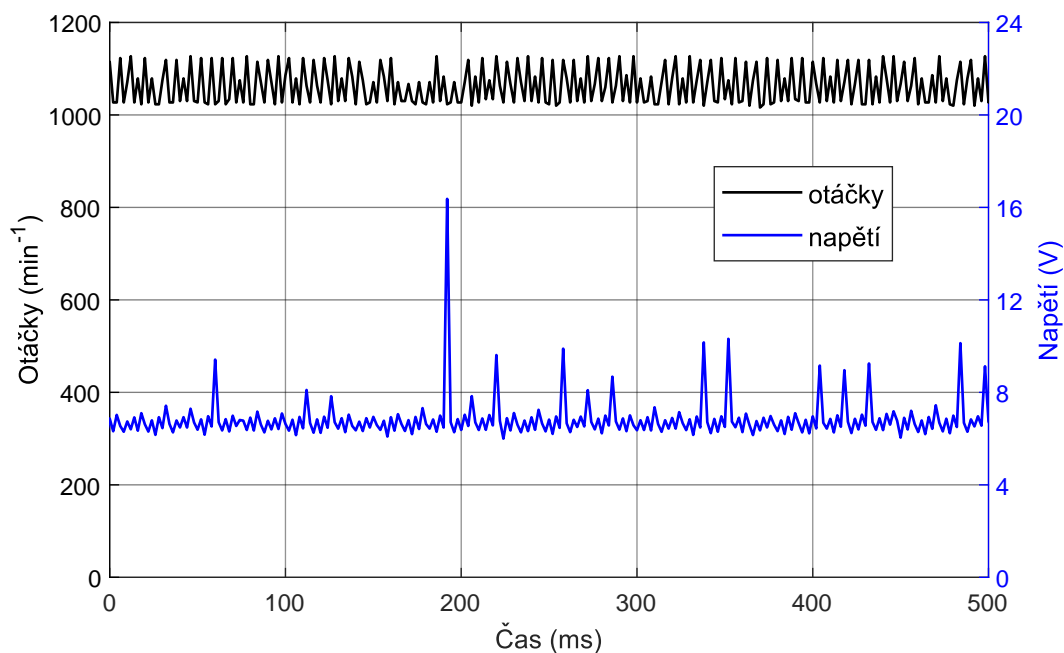


Obrázek 4.2: Odezva proudu na skok střední hodnoty napětí – bez tlumivky.

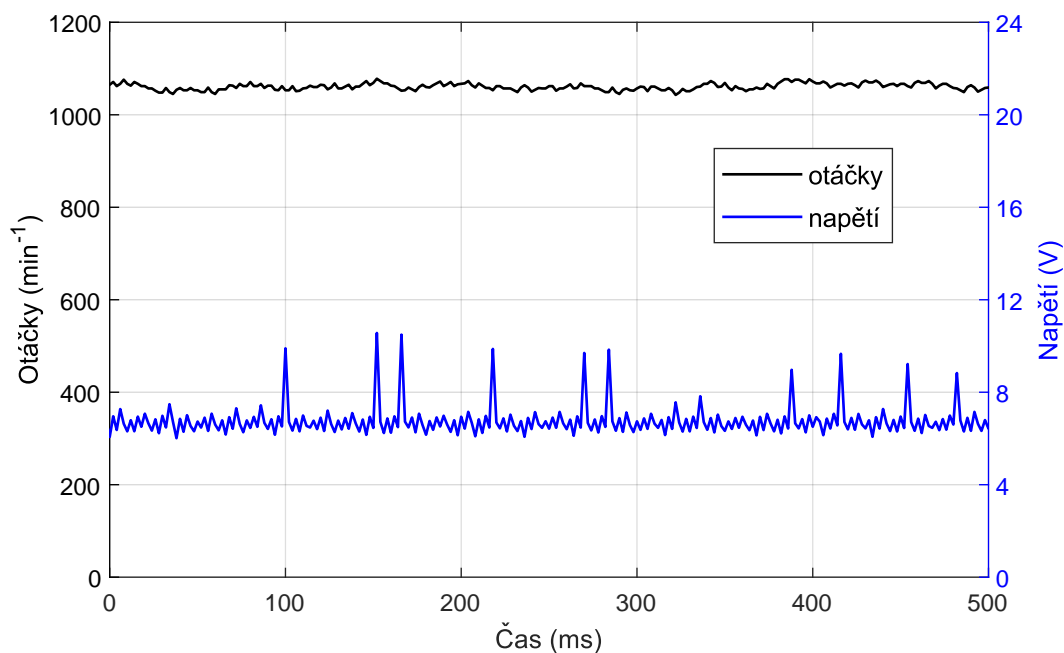


Obrázek 4.3: Odezva proudu na skok střední hodnoty napětí – s tlumivkou.

Dále byl sledován chod motoru při nastaveném konstantním zatěžovateli, přitom byly měřeny otáčky a napětí na kotvě. Účelem tohoto měření bylo mj. zjištění vhodného počtu průměrovaných vzorků otáček. Graf na obrázku 4.4 zobrazuje průběh měřených otáček při vypnutém průměrování. Patrné jsou velké a časté odchylky měřených hodnot (v rozmezí přibližně 10 %). Předpokládanou příčinou těchto odchylek je velmi malá setrvačnost rotoru, a tedy náchylnost k nerovnoměrnému chodu. Průběh s průměrováním 10 posledních vzorků otáček je na obrázku 4.5. Za povšimnutí stojí též špičky napětí patrné na obou průbězích. Předpokládá se, že důvodem jejich vzniku je přechodné zvýšení přechodového odporu mezi komutátorem a kartáči.



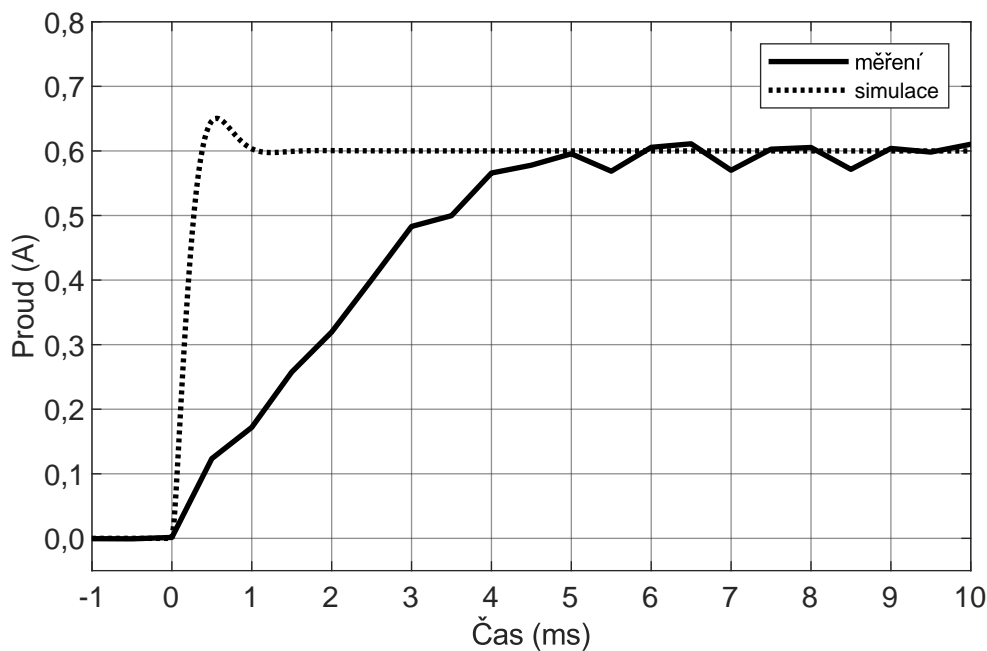
**Obrázek 4.4:** Průběh otáček a napětí na kotvě při konstantním zatěžovateli – bez průměrování otáček.



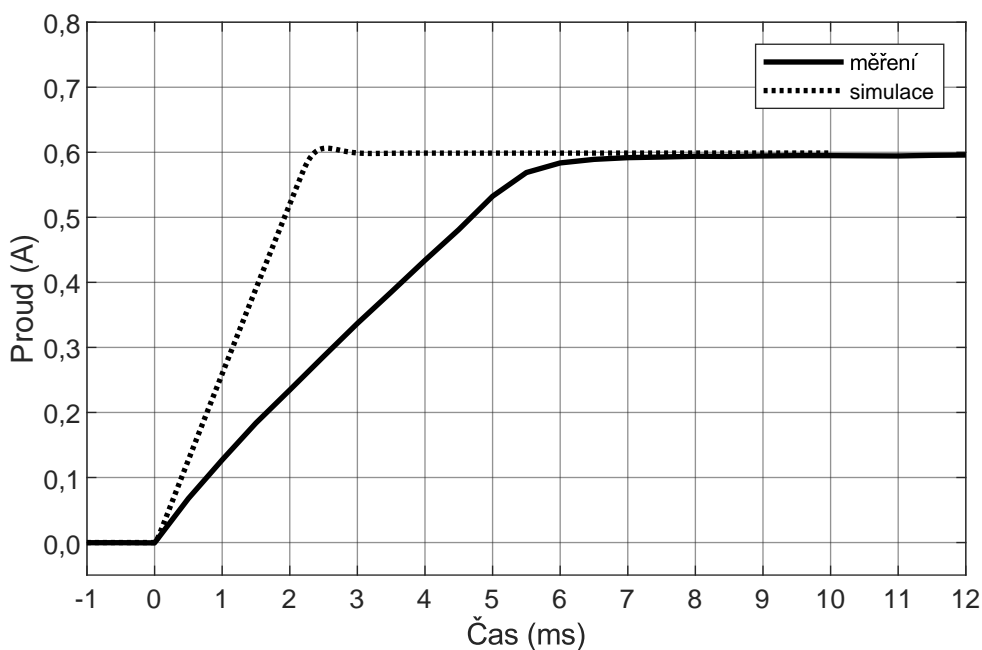
**Obrázek 4.5:** Průběh otáček a napětí na kotvě při konstantním zatěžovateli – průměrování 10 vzorků otáček.

Následující obrázky zachycují simulovaný a skutečně změřený průběh regulačního děje při regulaci proudu bez vyhlazovací tlumivky a s tlumivkou. Podnětem tohoto děje bylo zvýšení žádané hodnoty proudu z 0 A na 0,6 A v čase  $t = 0$ , ke kterému byly průběhy vztaheny. Proud 0,6 A byl zvolen proto, aby nedošlo k překonání suchého tření a roztočení motoru, čímž by bylo měření ovlivněno indukovaným napětím. Na obou grafech je patrné, že skutečný regulační děj je pomalejší oproti výsledkům simulace v prostředí Matlab-Simulink.

Možné příčiny tohoto rozdílu jsou diskutovány v závěru.

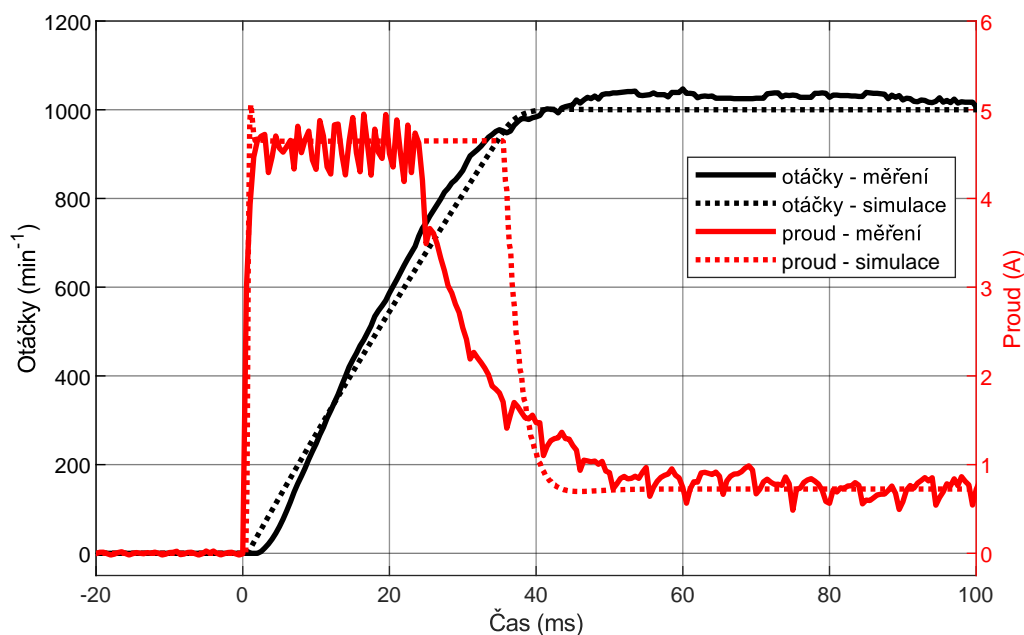


Obrázek 4.6: Regulační děj regulátoru proudu – bez tlumivky.

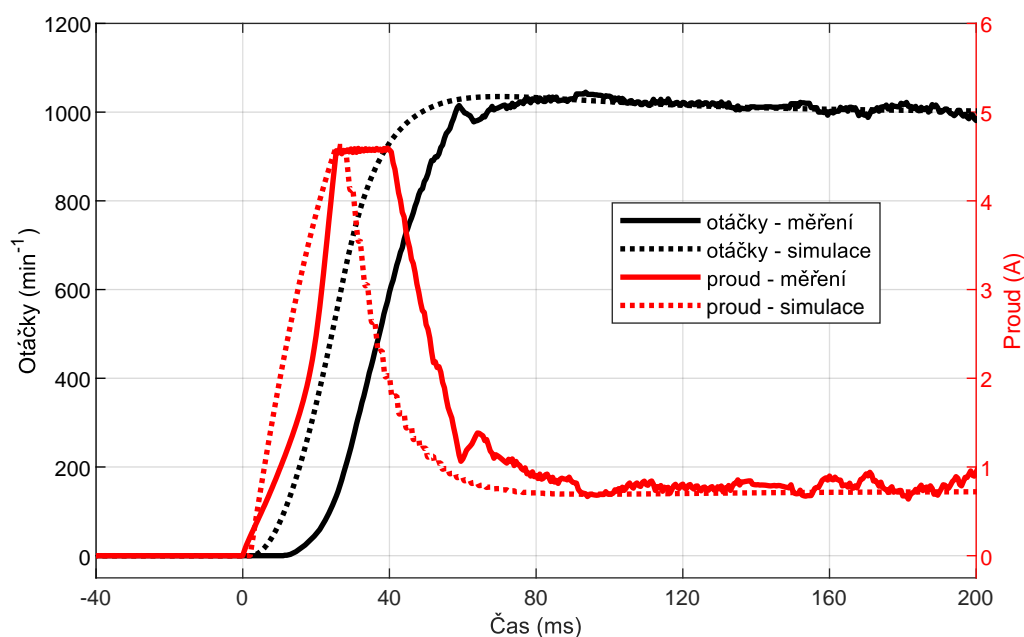


Obrázek 4.7: Regulační děj regulátoru proudu – s tlumivkou.

Dále byl v simulaci i měření na hotovém pohonu sledován průběh regulačního děje při regulaci rychlosti. Podnětem bylo zvýšení žádané hodnoty otáček z nulových na  $1000 \text{ min}^{-1}$  v čase  $t = 0$ , ke kterému byly průběhy vztaženy. Při porovnání simulovaných a měřených průběhů lze konstatovat, že skutečný regulační děj odpovídá na modelu provedené simulaci. Za odchylku lze považovat pouze pomalejší skutečný nárůst proudu oproti simulaci při použití vyhlazovací tlumivky na obrázku 4.9. V jeho důsledku pak dochází i k opožděnému nárůstu otáček. Je také na místě poznamenat, že měřený průběh otáček je mírně ovlivněn také průměrováním, které je v tomto případě zapnuté.



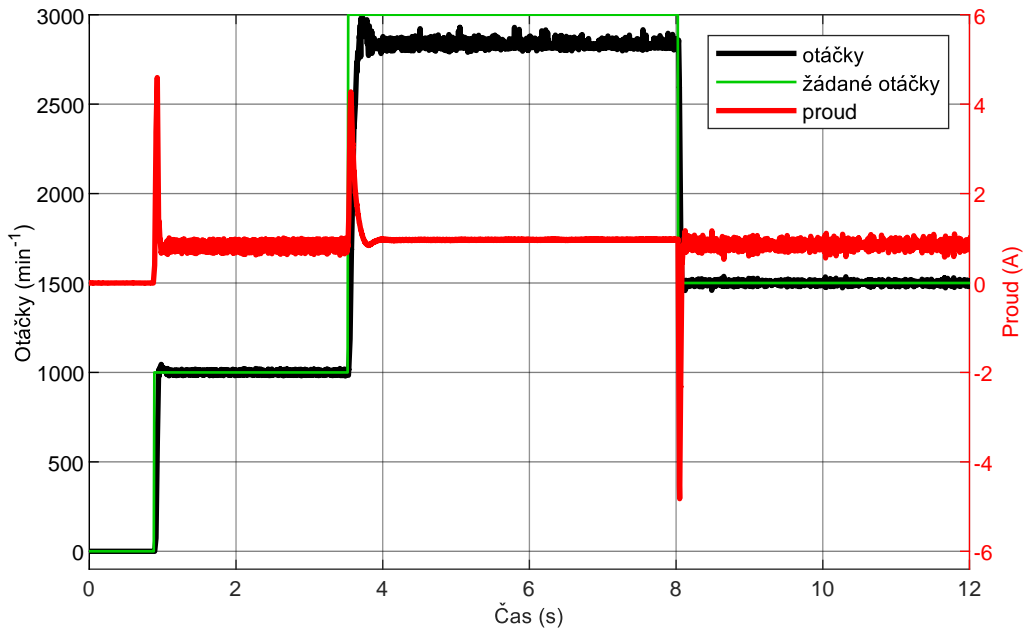
Obrázek 4.8: Regulační děj regulátoru rychlosti – bez tlumivky.



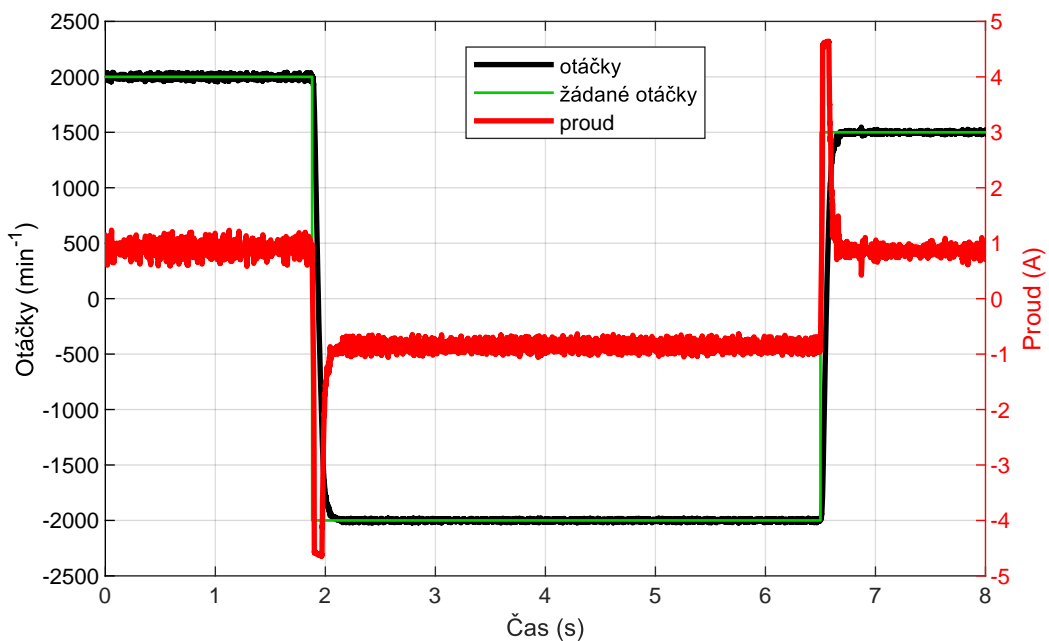
Obrázek 4.9: Regulační děj regulátoru rychlosti – s tlumivkou.

Práce celého pohonu v provozu, zejména pak obou regulátorů, byla ověřena chodem se změnami požadované hodnoty otáček včetně změny směru otáčení. Pohon byl vzhledem k nemožnosti připojení vhodné zátěže provozován pouze bez zatížení. Chod pohonu byl z vizuálního a akustického hlediska klidný a bez nadměrných vibrací. Průběhy otáček a proudu pohonu v provozu jsou na následujících obrázcích.

Z grafu na obrázku 4.10 vidíme, že pohon nebyl schopen dosáhnout jmenovité rychlosti  $n_n = 3000 \text{ min}^{-1}$ . To je způsobeno úbytky napájecího napětí na spínacích prvcích měniče, přechodových odporech a zejména na vinutí vyhlazovací tlumivky, která byla v tomto případě použita. Na samotné kotvě motoru pak není napětí dostatečné k dosažení jmenovité rychlosti.



Obrázek 4.10: Práce regulace rychlosti: změny žádané hodnoty.



Obrázek 4.11: Práce regulace rychlosti: změny směru otáčení.

## Kapitola 5

# Zhodnocení

Při uvedení pohonu do provozu bylo ověřeno, že sestavený elektrický pohon pracuje správně, regulace dobře udržuje regulované veličiny na žádaných hodnotách, pokud je to technicky možné; chod pohonu je při vyšších otáčkách klidný bez viditelných nebo slyšitelných nepravidelností v chodu nebo vibrací.

Při nižších otáčkách je i při konstantním zatěžovateli měniče, a tedy konstantní střední hodnotě napětí na kotvě motoru, viditelné kolísání rychlosti otáčení. Toto kolísání je částečně patrné i na zaznamenaném průběhu otáček na obrázku 4.5. Z tohoto důvodu se předpokládá, že použitý stejnosměrný motor vykazuje nerovnoměrný hnací nebo zátěžný moment závislý na úhlu natočení hřídele. Zátěžným momentem jsou zde myšleny mechanické ztráty, neboť motor pracuje vzhledem k absenci vhodné zátěže bez zatížení. Průběh otáček na obrázku 4.4 bez průměrování ukazuje, že otáčky zároveň kolísají i s mnohem kratší periodou. Nabízí se vysvětlení, že v tomto případě může jít o samotný vliv spínání tranzistorů měniče, tedy reakci otáčivé rychlosti na průběh napětí na výstupu měniče, které má střídavou složku. Vynesený průběh otáček je potom ovlivněn aliasingem, jelikož spínací perioda je kratší než perioda ukládání vzorků průběhu otáček. Lze konstatovat, že ke kolísání rychlosti otáčení v obou případech přispívá malý moment setrvačnosti rotoru.

Zachycené průběhy skutečných regulačních dějů byly porovnány se simulací regulace na matematickém modelu pohonu. Zatímco v případě regulace rychlosti měřené průběhy otáček poměrně dobře odpovídají průběhům získaným simulací, regulace proudu je ve skutečnosti oproti simulaci pomalejší, a to jak při použití vyhlazovací tlumivky, tak především v situaci, kdy je tato tlumivka překlenuta. Tento rozdíl by bylo možné vysvětlit použitím nepřesně určených parametrů obvodu nebo zanedbáním některých vlivů v matematickém modelu. Mohlo by se jednat například o zanedbání přechodových odporů na svorkách, kterých bylo při ověření funkce pohonu v provozu zapojeno v obvodu mezi výstupem měniče (za tlumivkou) a přívodními vodiči do motoru celkem 14. Dále byly v matematickém modelu zanedbány úbytky napětí na spínacích součástkách a byl uvažován ideální průběh napětí na výstupu měniče. Ve skutečnosti není tento průběh ideálně obdélníkový, ale zejména při použití tlumivky je značně zkraslený vlivem přechodných dějů.

Lze si též povšimnout, že průběh regulačního děje se zapojenou tlumivkou i bez tlumivky je velmi podobný (obrázky 4.6 a 4.7). Byť by nešlo o jedinou příčinu odchylky, nelze vzhledem k této podobnosti vyloučit ani omyl nebo chybu spočívající v nepřenastavení konstant regulátoru při změně parametrů kotevního obvodu vyřazením tlumivky. Tomu nasvědčuje i fakt, že při regulačním ději zachyceném na obrázku 4.8 je nárůst proudu oproti ději na obrázku 4.6 zřejmě podstatně rychlejší. Opravu konstant regulátoru je ale možné v takovém případě snadno provést přímo v obslužné aplikaci, což je nespornou výhodou vytvořeného softwaru pro řízení pohonu.

Software pro řízení pohonu byl nastaven na řízení měniče s konstantním spínacím kmitočtem přibližně 39 kHz. Není tedy možné říci, zda a jak by se funkce pohonu změnila při volbě jiného spínacího kmitočtu, přestože lze na základě výše uvedených závěrů

předpokládat, že kolísání hodnot proudu a rychlosti by se při snížení spínacího kmitočtu vzhledem k malé setrvačnosti, a to jak z mechanického hlediska, tak z hlediska elektrického (malá indukčnost kotevního vinutí), stalo výraznějším. Vliv volby spínacího kmitočtu na chod pohonu a jeho parametry by však v každém případě mohl být tématem dalšího zkoumání.

Při sestavování pohonu a řešení jeho řízení se nevyskytly žádné podstatnější komplikace. Celkově lze tedy i přes výše uvedené nedostatky považovat sestavený pohon včetně regulace za plně funkční.

# Bibliografie

- [1] P. Koblík a J. Pavelka, *Elektrické pohony a jejich řízení*, 3. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016, ISBN: 978-80-01-06007-0.
- [2] J. Balátě, *Automatické řízení*, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2003, ISBN: 80-730-0020-2.
- [3] *ZedBoard Hardware User's Guide*, ver. 2.2, Avnet, Inc., led. 2014. (cit. 04.05.2022), dostupné online: [https://files.digilent.com/resources/programmable-logic/zedboard/ZedBoard\\_HW\\_UG\\_v2\\_2.pdf](https://files.digilent.com/resources/programmable-logic/zedboard/ZedBoard_HW_UG_v2_2.pdf).
- [4] *Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview (DS190)*, ver. 1.11.1, Xilinx, Inc., 2. čvc. 2018. (cit. 04.05.2022), dostupné online: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds190-Zynq-7000-Overview>.
- [5] *AMC1200/B Fully-Differential Isolation Amplifier*, ver. D, Texas Instruments, Inc., čvc. 2015. (cit. 05.05.2022), dostupné online: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1200.pdf>.
- [6] *AMC1306x Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators With High CMTI*, ver. C, Texas Instruments, Inc., led. 2020. (cit. 05.05.2022), dostupné online: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1306m25.pdf>.
- [7] *AMC1336-Q1 Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulator for Voltage Sensing Applications*, Texas Instruments, Inc., květ. 2020. (cit. 05.05.2022), dostupné online: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1336-q1.pdf>.
- [8] *ISO733x Robust EMC, Low Power, Triple-Channel Digital Isolators*, ver. B, Texas Instruments, Inc., dub. 2015. (cit. 05.05.2022), dostupné online: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7330-q1.pdf>.
- [9] *DC/DC Converter TBA 1 Series, 1 Watt*, Traco Electronic AG, 7. led. 2022. (cit. 05.05.2022), dostupné online: [https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tba1\\_datasheet.pdf](https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tba1_datasheet.pdf).
- [10] V. Záhlava, *Návrh a konstrukce desek plošných spojů, principy a pravidla praktického návrhu*, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2010, ISBN: 978-80-7300-266-4.
- [11] K. J. Åström a T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995, ISBN: 1-55617-516-7.
- [12] M. Oljaca a T. Hendrick, „Combining the ADS1202 with an FPGA Digital Filter for Current Measurement in Motor Control Applications“, čvn. 2003. (cit. 09.05.2022), dostupné online: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa094/sbaa094.pdf>.
- [13] *Zynq-7000 SoC Technical Reference Manual (UG585)*, ver. 1.13, Xilinx, Inc., 2. dub. 2021. (cit. 10.05.2022), dostupné online: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug585-Zynq-7000-TRM>.

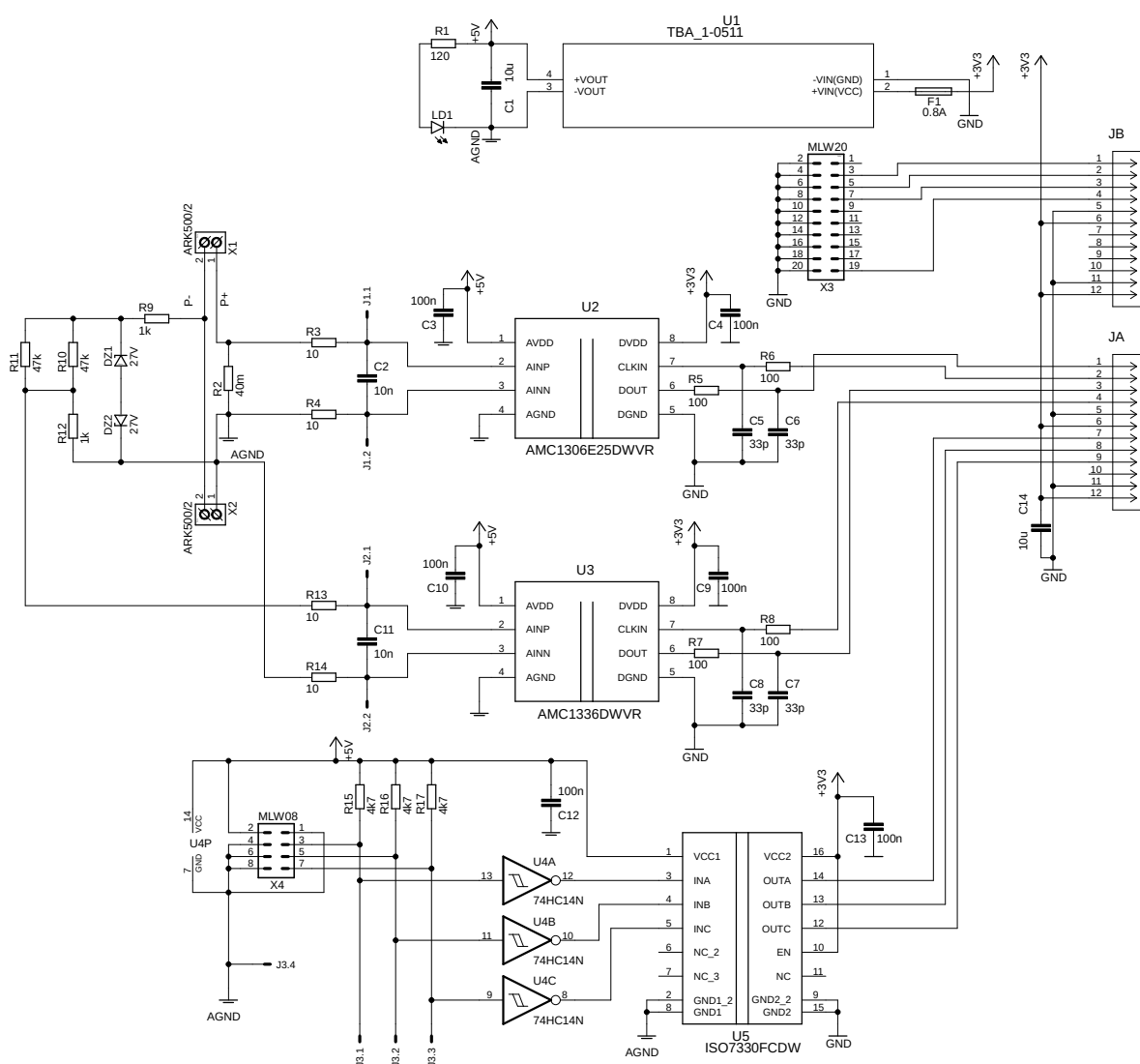




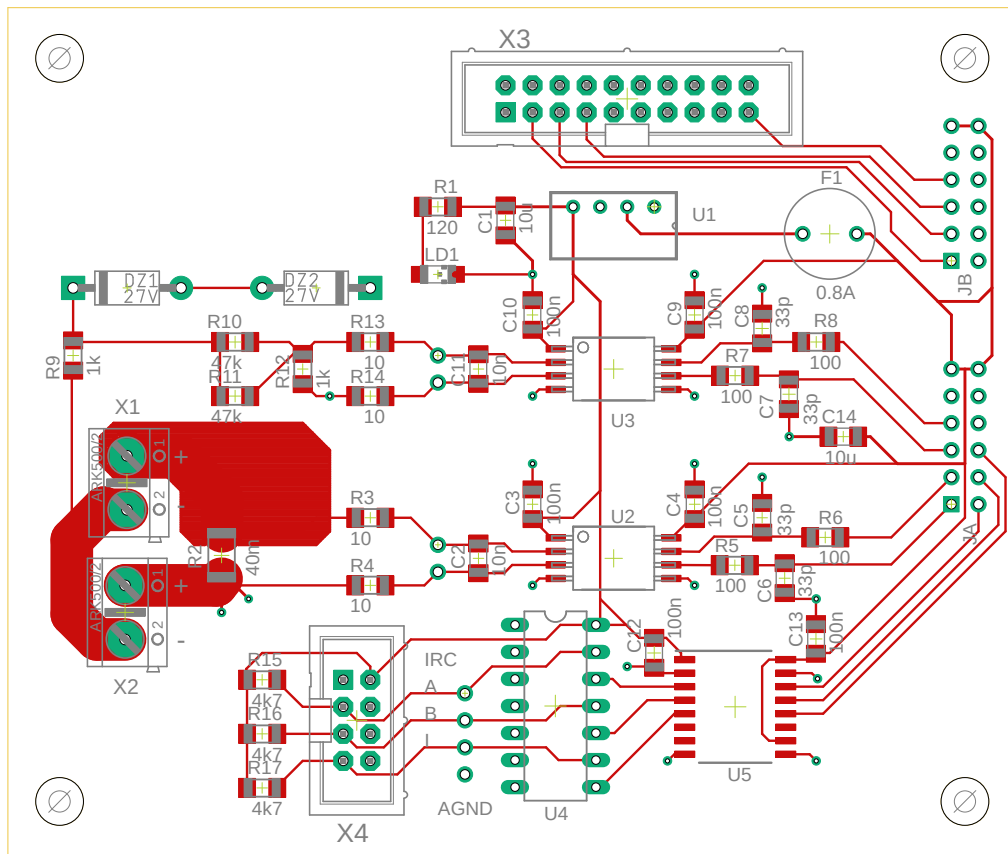
# Přílohy

Přiložena je dokumentace navržené desky plošných spojů (schémata a popis součástek a pinů konektorů) a návod k používání obslužné aplikace pro osobní počítač. Samostatnými elektronickými přílohami jsou projekt desky plošných spojů v programu Eagle, projekt s návrhem obvodů hradlového pole v prostředí Vivado 2014.1 a software regulátoru v procesoru včetně zdrojových kódů, projekt obslužné aplikace v prostředí Visual Studio 2015 včetně zdrojových kódů a spustitelného programu a matematický model pohonu v prostředí Matlab-Simulink.

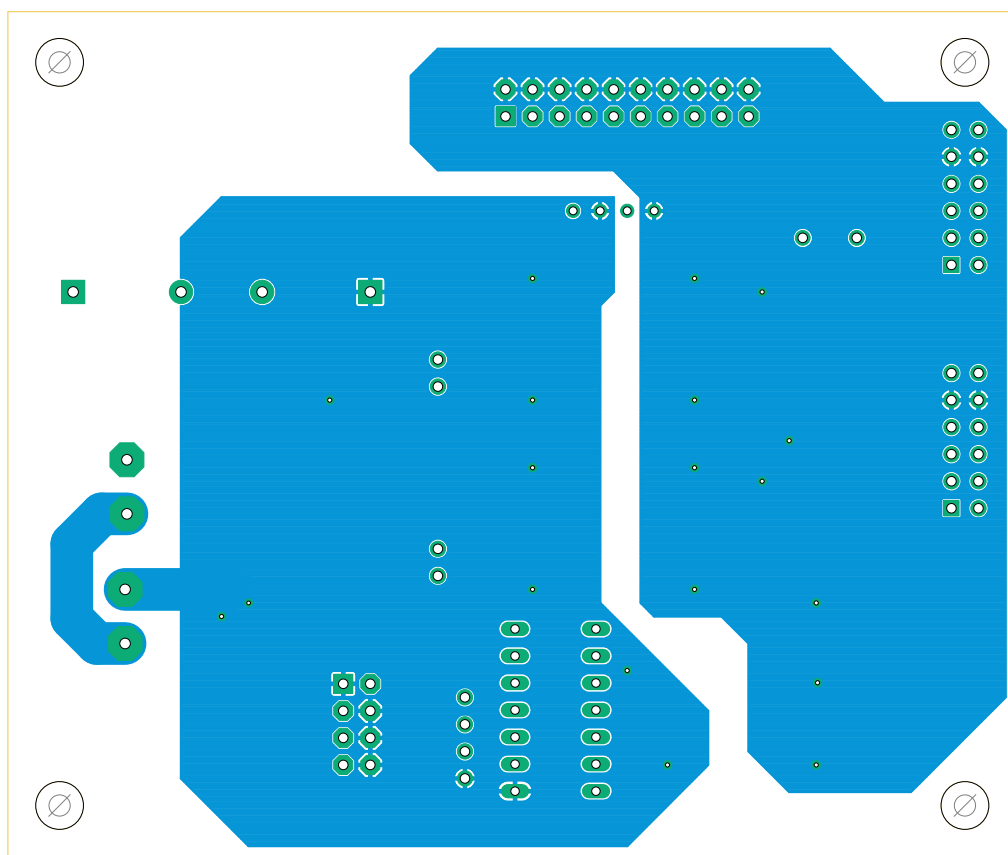
## A Dokumentace navržené desky plošných spojů



Obrázek A.1: Obvodové schéma navržené desky plošných spojů.



Obrázek A.2: Vrchní strana navržené desky plošných spojů.



Obrázek A.3: Spodní strana navržené desky plošných spojů.

**Tabulka A.1:** Seznam součástek osazených na desce plošných spojů.

Ozn.	Typ	Hodnota	Účel
C1	kondenzátor SMD1206	10 $\mu$ F	blokování napájení
C2	kondenzátor SMD1206	10 nF	filtr
C3	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U2
C4	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U2
C5	kondenzátor SMD1206	33 pF	filtr
C6	kondenzátor SMD1206	33 pF	filtr
C7	kondenzátor SMD1206	33 pF	filtr
C8	kondenzátor SMD1206	33 pF	filtr
C9	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U3
C10	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U3
C11	kondenzátor SMD1206	10 nF	filtr
C12	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U5
C13	kondenzátor SMD1206	100 nF	blokování napájení U5
C14	kondenzátor SMD1206	10 $\mu$ F	blokování napájení
DZ1	Zenerova dioda BZY027	27 V	omezení přepětí
DZ2	Zenerova dioda BZY027	27 V	omezení přepětí
F1	pojistka MST 250	0,8 A	jištění U1
J1	vidlice 2p 2,54 mm		měřicí bod
J2	vidlice 2p 2,54 mm		měřicí bod
J3	vidlice 4p 2,54 mm		měřicí bod
JA	vidlice 2 $\times$ 6p 2,54 mm		připojení k ZedBoard
JB	vidlice 2 $\times$ 6p 2,54 mm		připojení k ZedBoard
LD1	LED SMD1206		signalizace napájení
R1	rezistor SMD1206	120 $\Omega$	min. zátěž U1
R2	rezistor SMD2010	40 m $\Omega$	snímání proudu
R3	rezistor SMD1206	10 $\Omega$	filtr
R4	rezistor SMD1206	10 $\Omega$	filtr
R5	rezistor SMD1206	100 $\Omega$	filtr
R6	rezistor SMD1206	100 $\Omega$	filtr
R7	rezistor SMD1206	100 $\Omega$	filtr
R8	rezistor SMD1206	100 $\Omega$	filtr
R9	rezistor SMD1206	1 k $\Omega$	dělič měř. napětí
R10	rezistor SMD1206	47 k $\Omega$	dělič měř. napětí
R11	rezistor SMD1206	47 k $\Omega$	dělič měř. napětí
R12	rezistor SMD1206	1 k $\Omega$	dělič měř. napětí
R13	rezistor SMD1206	10 $\Omega$	filtr

Tabulka A.1 – pokračování

Ozn.	Typ	Hodnota	Účel
R14	rezistor SMD1206	10 $\Omega$	filtr
R15	rezistor SMD1206	4,7 k $\Omega$	pull-up pro IRC, kanál A
R16	rezistor SMD1206	4,7 k $\Omega$	pull-up pro IRC, kanál B
R17	rezistor SMD1206	4,7 k $\Omega$	pull-up pro IRC, kanál C
U1	TBA 1-0311		izolované napájení
U2	AMC1306E25		měření proudu
U3	AMC1336-Q1		měření napětí
U4	74HC14N		tvarování impulzů IRC
U5	ISO7330FC		galv. oddělení kanálů IRC
X1	svorkovnice šroub. 2 sv.		přívod z měniče
X2	svorkovnice šroub. 2 sv.		vývod na motor
X3	vidlice MLW20		propojení s řízením měniče
X4	vidlice MLW08		připojení IRC

Tabulka A.2: Popis pinů konektorů.

Konektor	Pin	Popis
JA	1	měření proudu – DATA
JA	2	měření proudu – CLK
JA	3	měření napětí – DATA
JA	4	měření napětí – CLK
JA	5	GND
JA	6	3V3
JA	7	IRC – kanál A
JA	8	IRC – kanál B
JA	9	IRC – kanál I
JA	10	nepoužito
JA	11	GND
JA	12	3V3
JB	1	měnič – reset
JB	2	měnič – enable
JB	3	měnič – PWM
JB	4	měnič – error
JB	5	GND
JB	6	3V3
JB	7–12	IRC – nepoužito
JB	11	GND

Tabulka A.2 – pokračování

Konektor	Pin	Popis
JB	12	3V3
X3	3	měnič – reset
X3	5	měnič – enable
X3	7	měnič – PWM
X3	9	měnič – error
X3	sudé	GND
X3	ostatní	nepoužito
X4	1	AGND
X4	2	5V0
X4	3	IRC – kanál A
X4	5	IRC – kanál B
X4	7	IRC – kanál I
X4	sudé	AGND

## B Návod k obslužné aplikaci

Obslužná aplikace umožňuje ovládání pohonu sestaveného v rámci této práce, sledování hodnot veličin důležitých pro řízení pohonu, zaznamenávání, stahování a zobrazování jejich průběhů a změnu konstant regulátorů.

Po spuštění aplikace je třeba zvolit sériový port, ke kterému je připojeno rozhraní UART řídicí desky ZedBoard. Po připojení k tomuto portu je zahájeno periodické vyčítání a zobrazování aktuálních hodnot. Vyčítání probíhá s periodou 200 ms.

V levé části okna aplikace se nacházejí do tabulky uspořádaná pole pro zobrazování aktuálních hodnot a ruční zadávání žádaných hodnot. Nad nimi se nacházejí čtyři tlačítka pro přepínání režimu řízení. Tlačítko aktivního režimu je zvýrazněno. Stisknutím tlačítka „**STOP**“ dojde k odpojení regulátorů a zablokování pulzů měniče. Lze jej tedy použít k okamžitému odstavení pohonu. Stisknutím některého z tlačítek „**Ručně**“, „**Reg. proudu**“ nebo „**Reg. rychlosti**“ dojde k aktivaci příslušného režimu a odblokování pulzů měniče.

Do polí v prvním řádku označeném „Zadání“ je možno zadat žádanou hodnotu příslušné veličiny. Hodnota je odeslána do regulátoru při použití šipek pro zvýšení/snížení hodnoty v poli okamžitě, při zadání nové hodnoty z klávesnice po opuštění pole. Pole označená „Žádaná hodnota“ obsahují žádanou hodnotu, se kterou pracují řídicí algoritmy. Tato hodnota odpovídá:

1. žádané hodnotě zadané uživatelem do pole v řádku „Zadání“, případně omezené do dovolených mezí, nebo
2. žádané hodnotě, která je převzata z výstupu regulátoru v případě, že je tento regulátor aktivní. Jedná se o hodnotu zatěžovatele při aktivní regulaci proudu a o hodnotu žádaného proudu při aktivní regulaci otáček.

V řádku označeném „Měřená hodnota“ jsou uvedeny aktuální měřené hodnoty napětí na kotvě, kotevního proudu a otáček. Hodnota otáček je uváděna po provedení nastaveného

průměrování. V řádku „Výstup regulátoru“ je možno sledovat hodnotu na výstupu příslušného regulátoru, a to i v případě, že daný regulátor není aktivní. Hodnota výstupu regulátoru je totiž počítána i v tomto případě, výstup je pouze odpojen. Toto řešení částečně umožňuje sledování chování regulátoru i bez jeho vlivu na skutečný chod pohonu. O případném trvajícím zásahu funkce omezení proudu je uživatel informován zobrazovacím upozorněním.

Pod touto tabulkou se nachází tabulka s konstantami regulátorů. Konstanty nejsou na rozdíl od aktuálních hodnot čteny trvale, ale pouze jednou po připojení a případně na vyžádání stisknutím tlačítka „Načíst konstanty regulátorů“. Zobrazené konstanty je možno změnit a do regulátoru hromadně zapsat stisknutím tlačítka „Nastavit konstanty regulátorů“. To platí i o počtu průměrovaných vzorků otáček.

Vlevo dole je zobrazován stav měniče. V případě havárie měniče je možné provést jeho reset ručně stisknutím tlačítka.

Vedle stavu měniče se nacházejí ovládací prvky pro funkci záznamu průběhů veličin. Před spuštěním záznamu je třeba zaškrtnutím zvolit, které průběhy mají být zaznamenávány. Stisknutím tlačítka „Spustit záznam“ se záznam spouští, stisknutím téhož tlačítka „Ukončit záznam“ se záznam zastavuje. O probíhajícím záznamu informuje zeleně podbarvená indikace. Po ukončení záznamu je možné zaznamenané průběhy stáhnout stisknutím tlačítka „Stáhnout data“. Po stažení jsou průběhy zobrazeny v grafu v pravé části okna. Detail části grafu je možné přiblížit přetažením myši přes danou část grafu. Opětovné oddálení grafu se provede z nabídky po stisknutí pravého tlačítka myši na grafu. Zobrazené průběhy lze skrýt pomocí zaškrtačkových polí. Při použití této možnosti je třeba pamatovat na to, že při spuštění dalšího záznamu nebudou nezaškrtnuté průběhy zaznamenány. Zobrazené průběhy lze uložit do souboru ve formátu CSV po stisknutí tlačítka „Data do CSV“. Při spuštění dalšího záznamu jsou data předchozího záznamu v paměti regulátoru přepsána.