

**KATEDRA ELEKTRICKÝCH PO-  
HONŮ A TRAKCE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**



**REGULACE ELEKTRICKÉHO  
POHONU MIKROKONTRO-  
LÉREM**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**KVĚTEN 2023**

**MAREK  
VLÁČIL**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vláčil** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **503250**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací 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 elektrického pohonu mikrokontrolérem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Microcontroller based Control of Electric Drive**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte hardwarové vybavení mikrokontroléru TMS320F28335 pro řízení pohonů.
2. Navrhněte, postavte a oživte potřebná rozhraní mezi jednotlivými částmi pohonu.
3. Vytvořte vhodný algoritmus pro regulaci zhotoveného pohonu.
4. Měřením ověřte funkčnost regulace.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Balátě, J., Automatické řízení, BEN Praha, 2004.
- [2] Záhlava, V., Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN Praha 2011.
- [3] Texas Instruments. TMS320x2833x, 2823x Technical Reference manual. SPRUI07. March 2020.
- [4] Texas Instruments. Code composer Studio User's Guide. 2020.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Pavel Koblir, 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

---

Chtěl bych podělovat mému vzácnému příteli Miloši Kvasničkoví, za nemalou pomoc s jazykovou stránkou této práce, Davidu Samcovi za pomoc s tvorbou některých schémat a všem mým přátelům za veškerou podporu a trpělivost v průběhu mého studia.

Dále patří mé poděkování všem zaměstnancům katedry, kteří se na vzniku práce podíleli, ať už materiálně nebo radou. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce, Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D., za veškerý čas, který mi věnoval.

Poslední poděkování bych rád věnoval své rodině za veškerou podporu během studia a celého života.

## 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 22. května 2023

.....

## ABSTRAKT

---

Cílem této práce je realizovat funkční elektrický pohon se stejnosměrným motorem s použitím mikrokontroléru od společnosti Texas Instruments TMS320F28335.

V úvodu je proveden popis moderního mikrokontroléru TMS320F28335, který je využit jako řídicí člen. Při popisu je kladen důraz na moduly a funkce typicky využívané pro regulaci elektrických pohonů.

Dále jsou popsány H/W části pohonu. V této práci se jedná o stejnosměrný motor s permanentními magnety a tranzistorový polovodičový měnič.

V práci je dále popsán návrh desky plošného spoje s nezbytnými prvky pro realizaci měření a komunikace mezi částmi pohonu.

Další částí je popis regulace elektrického pohonu. Obsahuje popis matematických modelů jednotlivých částí pohonu, matematický popis PID regulátoru a jejich nastavení a praktickou aplikaci v mikrokontroléru.

Práci uzavírá diskuse nad naměřenými daty na kompletním pohonu.

**Klíčová slova:** elektrický pohon, Texas Instruments, TMS320F28335, návrh desky plošného spoje, mikrokontrolér, PID regulátor

## ABSTRACT

---

The goal of this thesis is to build an electric drive using DC motor using microcontroller designed by Texas Instruments TMS320F28335.

Description of modern microcontroller TMS320F28335 takes place at the beginning of this work. It is focused on modules that are typically used in electric drives control.

Then the H/W parts of electric drives are described. In case of this thesis H/W parts are DC motor with permanent magnets and solid-state converter.

The process of designing printed circuit board with necessary components for measurements and communication between parts of the drive is then described.

Electric drive control is described in next part. The part contains mathematical description of parts of the drive, mathematical description of PID controller, PID controller tuning, and its application in microcontroller.

Last part of this thesis is a discussion of the data gathered from operational drive.

**Keywords:** electric drive, Texas Instruments, TMS320F28335, printed circuit board design, microcontroller, PID controller

**Title translation:** Microcontroller based Control of Electric Drive

## Obsah

<b>KAPITOLA 1: ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>KAPITOLA 2: MIKROKONTROLÉR.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 H/W VYBAVENÍ MIKROKONTROLÉRU .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 ePWM.....	5
2.1.2 A/D převodník .....	7
2.1.3 eQEP .....	8
2.1.4 Systém přerušení .....	9
<b>2.2 S/W POUŽÍVANÝ PŘI VÝVOJI .....</b>	<b>10</b>
2.2.1 <i>Code Composer Studio</i> .....	10
2.2.2 <i>GUI Composer</i> .....	10
2.2.3 <i>C2000WARE</i> .....	10
<b>KAPITOLA 3: H/W ČÁSTI POHONU.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGENTY.....</b>	<b>11</b>
3.1.1 Konstrukce stejnosměrného motoru.....	11
3.1.2 Štítkové hodnoty motoru.....	12
<b>3.2 POLOVODIČOVÝ MĚNIČ.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 DPS S PRVKY MĚŘENÍ A KOMUNIKACE .....</b>	<b>14</b>
<b>KAPITOLA 4: NÁVRH DPS S PRVKY MĚŘENÍ A KOMUNIKACE.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 POŽADOVANÁ FUNKCE .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 PRVKY DPS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 NAPÁJENÍ PRVKŮ DPS .....</b>	<b>16</b>
<b>4.4 NÁVRH DPS.....</b>	<b>17</b>
<b>KAPITOLA 5: REGULACE POHONU.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1 REGULACE POHONŮ SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY .....</b>	<b>21</b>
<b>5.2 MATEMATICKÝ MODEL STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3 MATEMATICKÝ MODEL POLOVODIČOVÉHO MĚNIČE .....</b>	<b>22</b>
<b>5.4 REGULÁTOR.....</b>	<b>23</b>
5.4.1 PID regulátor.....	23
5.4.2 Diskretizace/PSD regulátor .....	23
5.4.3 Přírůstkový tvar PSD regulátoru.....	24
5.4.4 Unášení integračního členu .....	24
<b>5.5 REGULÁTOR PROUDU .....</b>	<b>25</b>
5.5.1 Kalibrace proudového čidla.....	25
5.5.2 Algoritmus proudového regulátoru .....	26
<b>5.6 REGULÁTOR RYCHLOSTI.....</b>	<b>26</b>
5.6.1 Metoda výpočtu rychlosti.....	26
5.6.2 Algoritmus regulátoru rychlosti .....	27
<b>5.7 SYNTÉZA REGULÁTORŮ.....</b>	<b>28</b>
5.7.1 Model regulace.....	28
<b>KAPITOLA 6: OVĚŘENÍ FUNKCE.....</b>	<b>31</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>

<b>PŘÍLOHA A: NOMENKLATURA.....</b>	<b>40</b>
<b>A.1 OBECNÉ ZNAČENÍ.....</b>	<b>40</b>
<b>A.2 SEZNAM VELIČIN A KONSTANT.....</b>	<b>40</b>
<b>A.3 SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>40</b>
<b>PŘÍLOHA B: OBSAH ELEKTRONICKY PŘILOŽENÝCH SOUBORŮ .....</b>	<b>42</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obr. 1-1 Blokové schéma elektrického pohonu [1] .....	1
Obr. 1-2 Blokové schéma regulace [2](upraveno).....	2
Obr. 2-1 Řídicí karta s mikrokontrolérem osazená v dokovací desce.....	3
Obr. 2-2 Blokové schéma vnitřní struktury TMS320F28355 [3].....	4
Obr. 2-3 Zapojení ePWM modulů [6].....	5
Obr. 2-4 Vnitřní struktura ePWM modulu [6].....	5
Obr. 2-5 Funkce PWM chopperu [6] .....	6
Obr. 2-6 Blokové schéma A/D převodníku [6] .....	7
Obr. 2-7 Blokové schéma eQEP [6].....	8
Obr. 2-8 Proces zpracování požadavku na přerušení [6].....	9
Obr. 3-1 Příčný řez stejnosměrným motorem [13] .....	11
Obr. 3-2 Podélný řez stejnosměrným motorem [13].....	11
Obr. 3-3 Motor zvolený pro realizaci pohonu .....	12
Obr. 3-4 Principiální schéma zapojení silové části polovodičového měniče [14](upraveno) .....	13
Obr. 3-5 Fyzická konstrukce měniče.....	14
Obr. 4-1 Elektrické schéma zapojení DPS.....	18
Obr. 4-2 Horní strana DPS.....	18
Obr. 4-3 Dolní strana DPS.....	19
Obr. 4-4 Foto horní strany DPS s osazenými součástkami .....	19
Obr. 5-1 Regulační schéma stejnosměrného motoru.....	21
Obr. 5-2 Reálná regulační smyčka .....	21
Obr. 5-3 Elektrické náhradní schéma stejnosměrného motoru.....	22
Obr. 5-4 Omezení unášení integračního členu metodou „clamping“ [25](upraveno) .....	25
Obr. 5-5 Pracoviště pro kalibraci proudového čidla .....	25
Obr. 5-6 Princip „M/T“ metody pro měření rychlosti otáčení [5] .....	27
Obr. 5-7 Matematický model regulace v prostředí <i>MATLAB-Simulink</i> .....	30
Obr. 6-1 Běh motoru v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem 0,21 .....	31
Obr. 6-2 Běh motoru naprázdno v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem 0,63.....	32
Obr. 6-3 Běh motoru naprázdno v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem -0,63 .....	32
Obr. 6-4 Reakce regulátoru proudu na skokové zatížení a odlehčení hřídele.....	34
Obr. 6-5 Reakce regulátoru rychlosti na skokové změny požadované hodnoty .....	34
Obr. 6-6 Reakce regulátoru rychlosti na skokovou změnu požadované hodnoty do záporné polarity.....	35
Obr. 6-7 Reakce regulátoru rychlosti na skokové zatížení a odlehčení hřídele motoru .....	35
Obr. 6-8 Uživatelské rozhraní.....	36

## SEZNAM TABULEK

---

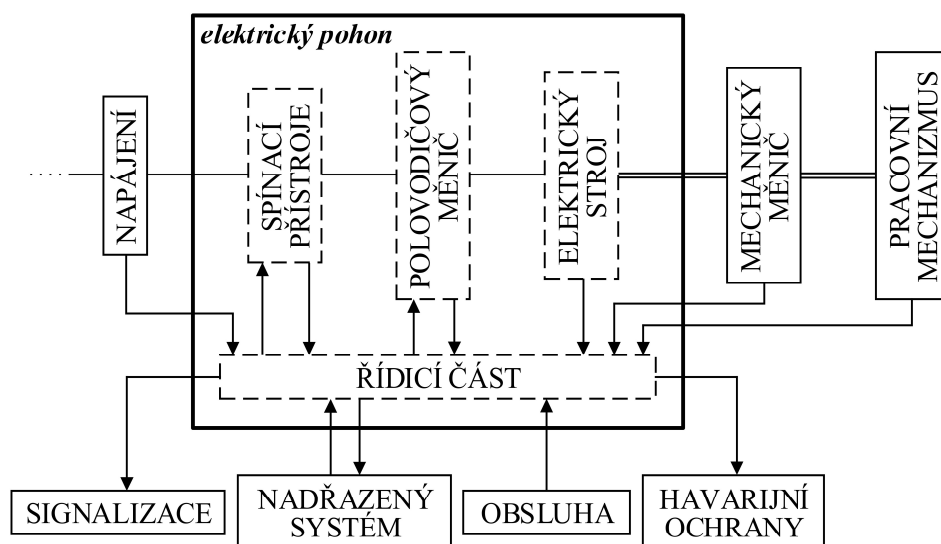
Tab. 3-1 Štítkové hodnoty motoru .....	13
Tab. 4-1 Hlavní prvky DPS.....	16
Tab. 4-2 Popis prvků DPS.....	20
Tab. 5-1 Parametry matematického modelu .....	29
Tab. 5-2 Konstanty regulátorů.....	29

## KAPITOLA 1: ÚVOD

Jedním z hlavních způsobů využití elektrické energie v dnešní době je její přeměna na energii mechanickou. S touto přeměnou se setkáváme jak u výkonů v řádech zlomků wattů, například u ručičkových hodinek, tak u megawattových výkonů, jakými jsou těžební stroje a elektrické lokomotivy.

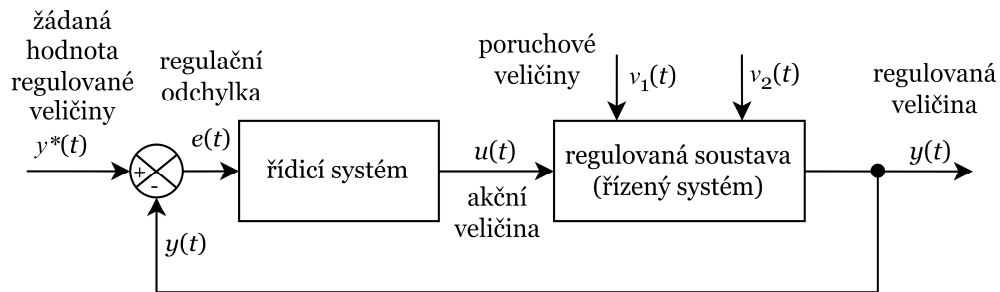
Systém sloužící pro přeměnu elektrické energie na mechanickou energii definovaných parametrů nazýváme elektrický pohon. Moderní elektrický pohon definujeme jako „soustavu, vytvořenou z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů řídicích 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.

Výše zmíněné vhodné elektrotechnické prvky bychom mohli rozdělit do několika základních skupin. Jsou to spínací prvky, které zajišťují připojení pohonu k napájení, odpojení pohonu od napájení nebo jeho vypnutí v případě poruchového stavu. Dalším prvkem je polovodičový měnič, zajišťující přeměnu formy a parametrů elektrické energie pro elektrický stroj (motor). Celý proces je řízen z vhodného řídicího prvku, kterým je typicky mikrokontrolér, který byl zvolen jako řídicí systém pro tuto práci, programovatelný logický automat (PLC), nebo programovatelné hradlové pole (FPGA). Strukturální schéma elektrického pohonu je na obr. 1-1.



Obr. 1-1 Blokové schéma elektrického pohonu [1]

Proces, který udržuje žádané parametry mechanického pohybu na výstupu pohonu, se nazývá regulace. Blokové schéma regulace je zobrazeno na obr. 1-2.



Obr. 1-2 Blokové schéma regulace [2](upraveno)

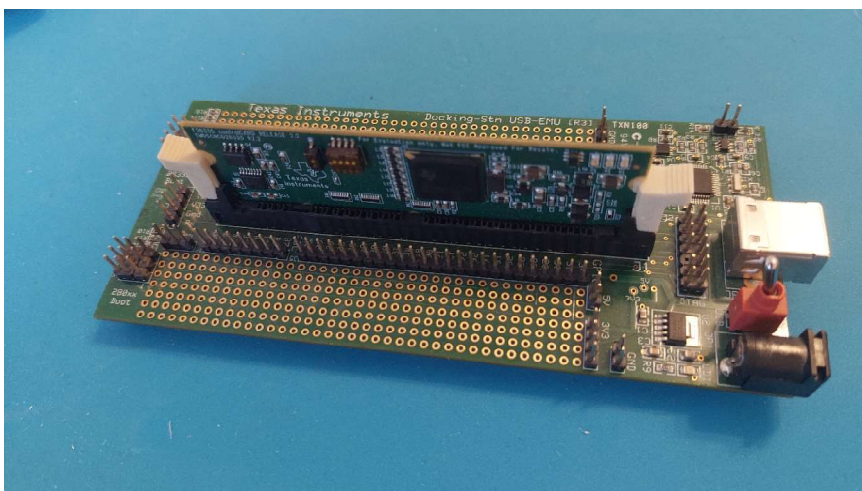
Řídicí systém je tvořen v případě elektrického pohonu kombinací regulátoru implementovaného v řídicím prvku a akčního členu, přičemž akčním členem je polovodičový měnič. Řízený systém tvoří v případě elektrického pohonu elektrický stroj. Regulátor, v závislosti na měření získané regulační odchylce, předává řídicí signál polovodičovému měniči, který na základě řídicího signálu působí na elektrický stroj tak, aby byla minimalizována regulační odchylka.[1],[2]

## KAPITOLA 2: MIKROKONTROLÉR

### 2.1 H/W vybavení mikrokontroléru

Pro realizaci této práce byl jako řídicí prvek zvolen mikrokontrolér TMS320F28335 od společnosti Texas Instruments. Jedná se o 32bitový mikrokontrolér z řady Delfino, která je součástí rodiny mikrokontrolérů C2000. Mikrokontroléry rodiny C2000 jsou rychlé mikrokontroléry určené především pro řízení aplikací v reálném čase.[3] Pro řízení elektrického pohonu je tedy tento kontrolér vhodnou volbou. Samotný mikrokontrolér je osazen na řídicí kartě, jež je usazena v dokovací desce TXN 100, též od společnosti TI. Celá tato sestava je na obr. 2-1.

Dokovací deska, kromě toho že slouží k připojování externích periférií, obsahuje JTAG rozhraní pro nahrávání kódu a debugging za běhu programu. Připojení k počítači nabízí dokovací deska pomocí USB-A portu. Kromě napájení přímo z USB-A portu je možné též připojit DC napájecí konektor 5,5/2,1 mm. Deska je napájena napětím 5 VDC. Je však potřeba dbát toho, že mikrokontrolér je na svých vstupech a výstupech schopen pracovat pouze s napětíovou hladinou 3,3 VDC. Vyšší přivedené napětí by mohlo vést k trvalému poškození mikrokontroléru.[3]



Obr. 2-1 Řídicí karta s mikrokontrolérem osazená v dokovací desce

Architektura centrální procesorové jednotky C28x je typu Harvard. Paměť pro program je tedy oddělená od paměti pro data. 32bitová struktura centrální procesorové jednotky je doplněna o FPU jednotku pro výpočty ve standardu IEEE 754, tedy s plovoucí řádovou čárkou.[3], [4]

Maximální dosažitelná hodinová frekvence běhu procesoru je 150 MHz. Zdroj hodinového signálu může být jak *on chip* oscilátor, tak externí oscilátor.

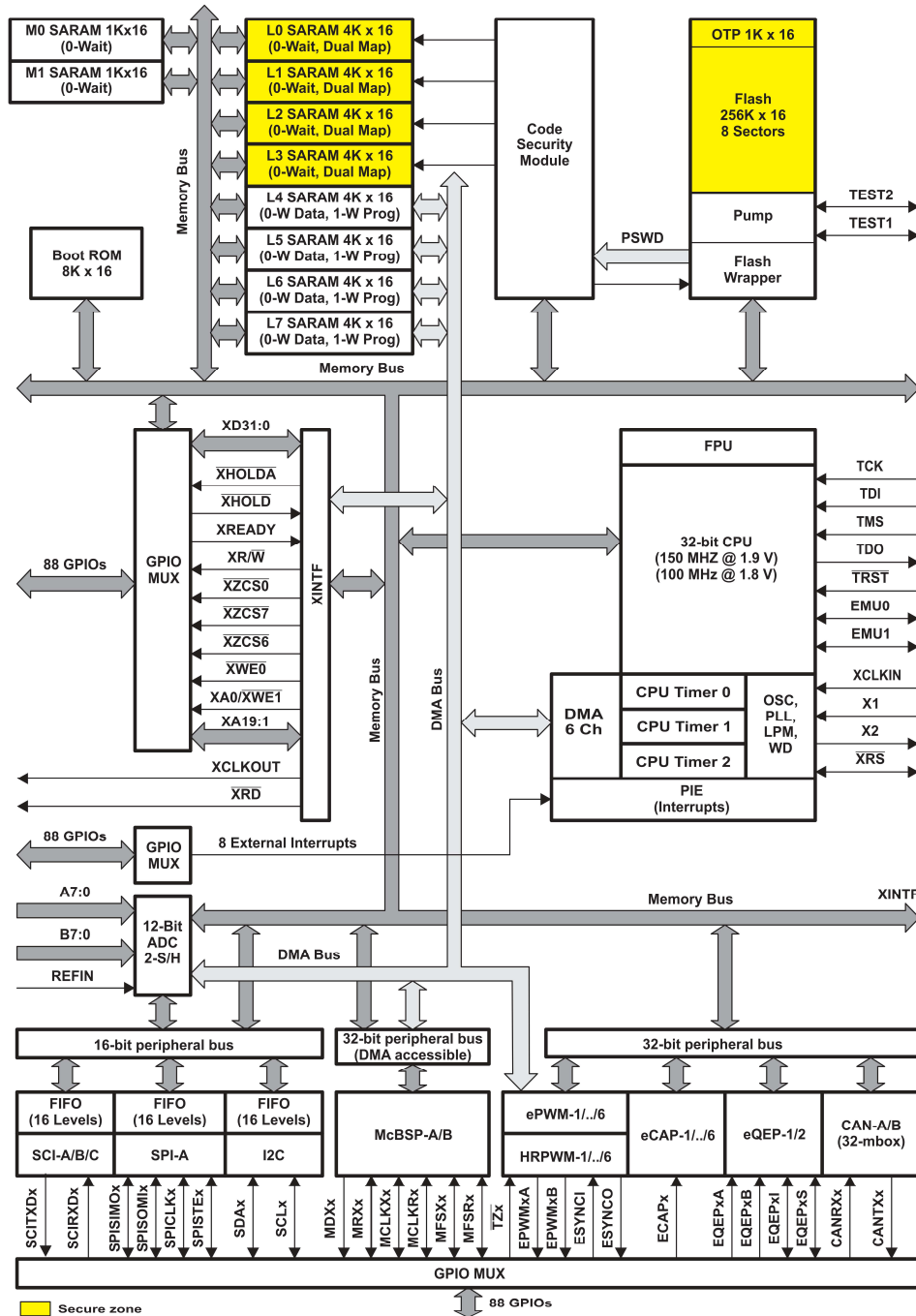
Mikrokontrolér disponuje 256K × 16 bity flash paměti pro program a 34K × 16 bity SARAM (*Single Access Random Access Memory*) pro data. Dále obsahuje 8K × 16 bity ROM (*Read Only Memory*), ve které je od výroby uložen software pro různé způsoby bootování spolu s předdefinovanými tabulkami vybraných matematických funkcí.[3], [5]

Mikrokontrolér je schopný komunikovat pomocí několika sériových komunikačních rozhraní. Jedná se o dva CAN (*Controller Area Network*) moduly, tři UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) moduly, dva McBSP (*Multichannel Buffered Serial Port*) moduly konfigurovatelné jako SPI (*Serial Peripheral Circuit*), jeden samostatný SPI modul a jeden I2C (*Inter-Integrated Circuit*) modul. Dále je procesor kompatibilní s rozhraním JTAG (*Join Test Action Group*) podle standardu IEEE Standard 1149.1-1990, který je spolu s rozhraním umístěným na dokovací desce používán k nahrávání programu a debugingu v reálném čase.[3]

Pro interakci s okolním světem je určeno 88 GPIO (*General-Purpose Input/Output*). Funkce těchto pinů je programovatelná pomocí multiplexorů, přičemž mnoho pinů nemusí sloužit pouze jako vstup nebo výstup, ale i jako prvek některé z vnitřních periférií kontrolérů.[3]

Dále jsou součástí vybavení 32bitové časovače, ePWM (*enhanced pulse width modulation*), eCAP (*enhanced capture*), eQEP (*enhanced quadrature encoder pulse*) a dvanácti bitové analogové digitální převodníky. Kromě toho je v tomto přehledu zcela relevantní zmínit blok PIE (*peripheral interrupt expansion*), což je blok sloužící k multiplexování až 96 možných zdrojů přerušení do menších skupin.[3],[5]

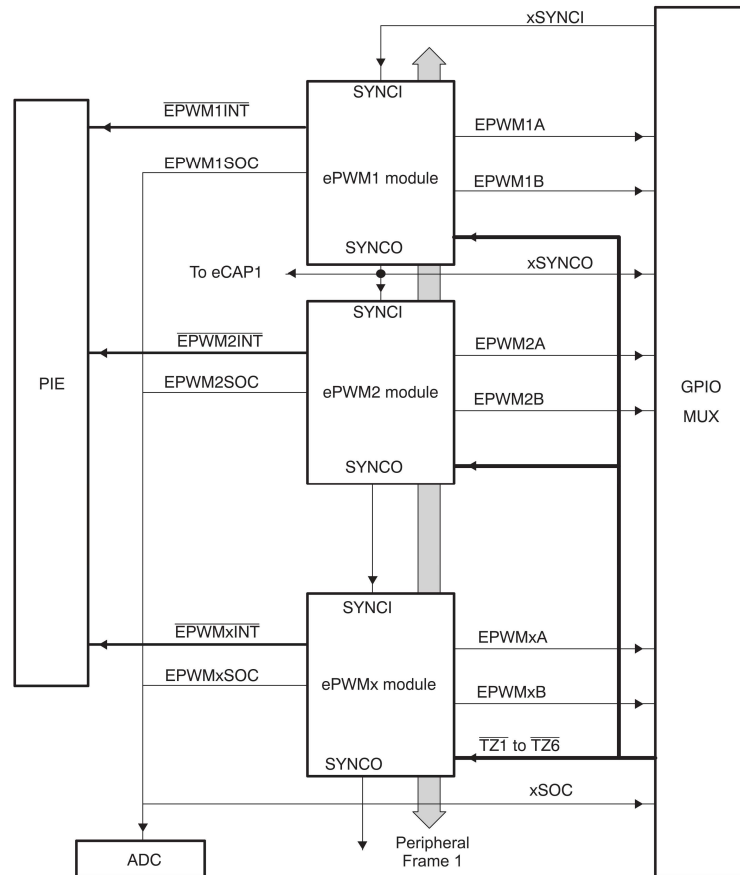
Blokové schéma vnitřní struktury kontroléru je znázorněno na obr. 2-2.



Obr. 2-2 Blokové schéma vnitřní struktury TMS320F28355 [3]

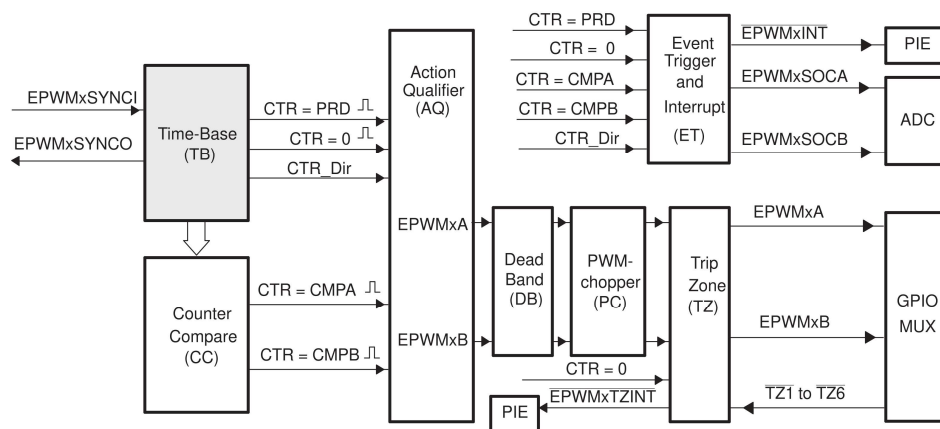
### 2.1.1 ePWM

Mikrokontrolér je vybaven šesti moduly pro generování pulzního šířkově modulovaného signálu. Výrobce jsou tyto moduly označeny jako *enhanced* neboli vylepšené.[6] Zapojení těchto modulů je zobrazeno na obr. 2-3.



Obr. 2-3 Zapojení ePWM modulů [6]

Každý z modulů je schopen generovat dva nezávislé PWM signály označené EPWMxA a EPWMxB.[6] Na obr. 2-4 je zobrazena vnitřní struktura jednoho ePWM bloku.



Obr. 2-4 Vnitřní struktura ePWM modulu [6]

Dále budou popsány jednotlivé bloky struktury ePWM modulu.

### 2.1.1.1 Blok *TIME BASE*(TB)

Tento blok realizuje časování celého modulu. Umožňuje nastavit předděličku vstupního řídicího kmitočtu. Na obr. 2-3 a obr. 2-4 je vidět, že pokud je to vhodné, je možné mezi sebou jednotlivé ePWM moduly synchronizovat. Tuto synchronizaci a následné fázové posuvy bloků mezi sebou realizují právě TB bloky.[6]

Zároveň tento blok ovládá také čítač TBCTR (*time-based counter*). Ovládá směr čítání tohoto čítače (vzestupné, sestupné, obousměrné) a je schopen generovat události, pokud se hodnota v čítači rovná nulové hodnotě nebo pokud dojde k přetečení čítače.[6]

### 2.1.1.2 Blok *COUNTER COMPARE*(CC)

Tento blok neustále porovnává hodnotu čítače TBCTR s hodnotami nastavenými v příslušných komparačních registrech pro jednotlivé stopy PWM signálu. Pokud dojde ke shodě, je vygenerována událost. Zároveň také umožňuje nahrání nových hodnot do komparačních registrů z takzvaných stínových registrů.[6] Využitím stínových registrů se zabraňuje jevu, kdy se do komparačních registrů zapíše hodnota, se kterou jiná část programu právě pracuje a nemusí tak být platná.

### 2.1.1.3 Blok *ACTION QUALIFIER*(AQ)

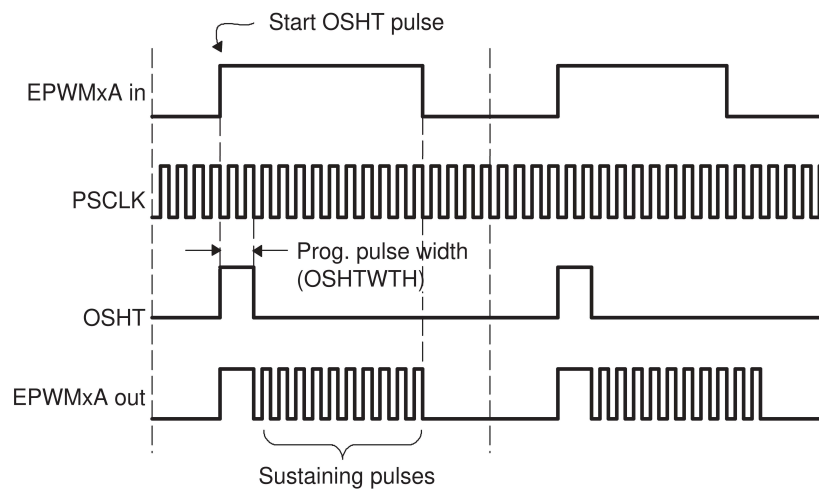
Pokud je TB blokem nebo CC blokem generována událost, AQ blok zajišťuje klasifikaci této události a generování nastavené akce (logická úroveň „1“, logická úroveň „0“, změna logické úrovně, zachování stavu) na příslušném pinu. Tyto akce se mohou lišit v závislosti na tom, jestli čítač TBCTR čítá vzestupně, nebo sestupně. Zároveň tento modul funguje jako prioritní kodér v případě, že dojde k více událostem najednou.[6]

### 2.1.1.4 Blok *DEAD BAND*(DB)

*Dead band* je blok, který může sloužit ke generování komplementárního signálu stop A a B. Zároveň, pokud je to vhodné, umožňuje nastavení tzv. mrtvých dob. To jsou krátké ochranné doby mezi přechodem jedné stopy do logické úrovně „0“ a přechodem druhé stopy do logické úrovně „1“. Pokud není blok používán, je možné signál přemostit mimo tento blok.[6]

### 2.1.1.5 Blok *PWM CHOPPER*(PC)

Pomocí tohoto bloku je možné jednotlivé stopy modulovat vysokofrekvenčním signálem. Frekvence modulačního signálu je nastavitelná. Zároveň tento blok umožňuje nastavit rozdílnou šířku prvního pulzu výstupního signálu. Grafické znázornění funkce toho bloku je zobrazeno na obr. 2-5. Pokud není blok používán, je možné signál přemostit mimo tento blok.[6],[7]



Obr. 2-5 Funkce PWM chopperu [6]



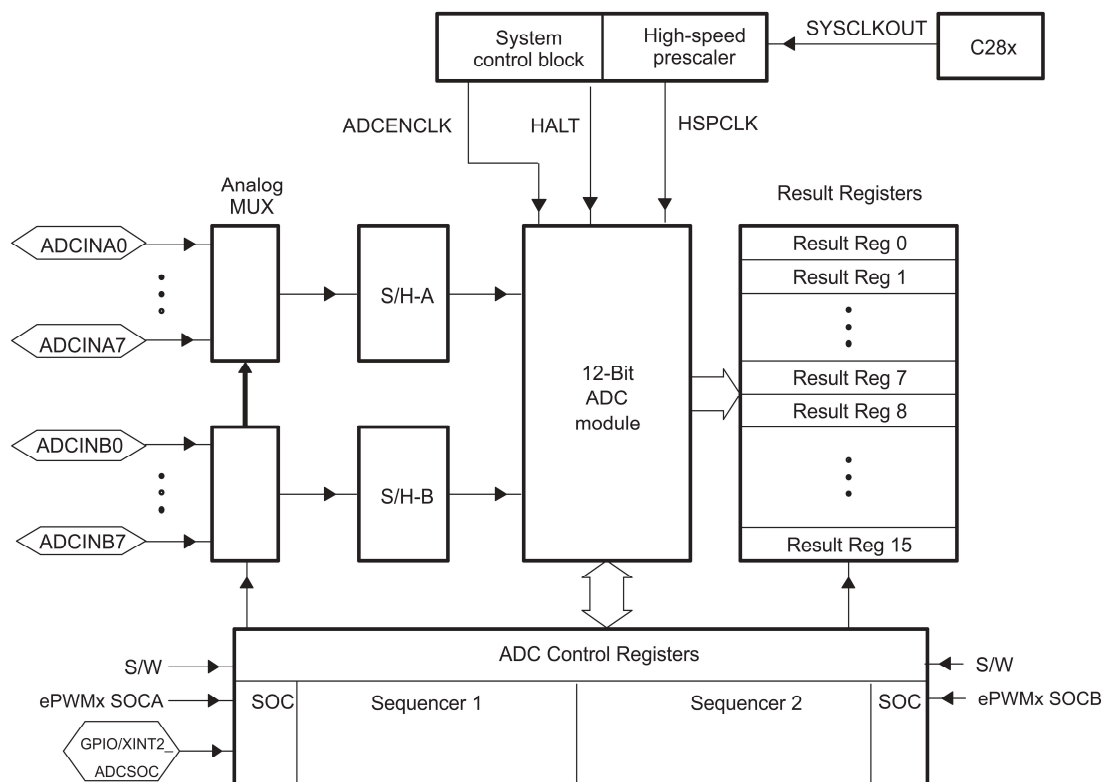
### 2.1.1.6 Blok *TRIP ZONE*(TZ)

Mikrokontrolér je vybaven šesti TZn piny, které slouží k detekci chybových stavů vzniklých mimo mikrokontrolér. Tyto piny je možno přiřadit jednotlivým PWM modulům, přičemž jeden pin je možno přiřadit i několika modulům zároveň. Pomocí TZ bloku lze programovat reakce na tyto chybové stavy na výstupních PWM pinech nebo generovat požadavek na přerušení. Pokud není blok používán, je možné ho vyřadit.[6]

### 2.1.1.7 Blok *EVENT TRIGGER AND INTERRUPT*(ET)

ET blok přijímá signál z TB bloku a CC bloku. Je-li některým z nich generována událost, ET blok je schopen podle svého nastavení generovat požadavek na přerušení nebo vyslat signál pro spuštění konverze A/D převodníku.[6]

## 2.1.2 A/D převodník



Obr. 2-6 Blokové schéma A/D převodníku [6]

Jak je vidět na obr. 2-6, mikrokontrolér je vybaven 12bitovým A/D převodníkem. Převodníku jsou předřazeny dva vzorkovací (*sample/hold*) obvody označené jako A a B, je tedy schopen převádět dva signály zároveň. Pomocí vstupních multiplexorů je možno přepínat mezi osmi vstupními piny pro každý vzorkovací obvod. Výstup převodu je pak ukládán do jednoho z šestnácti výstupních registrů.[6]

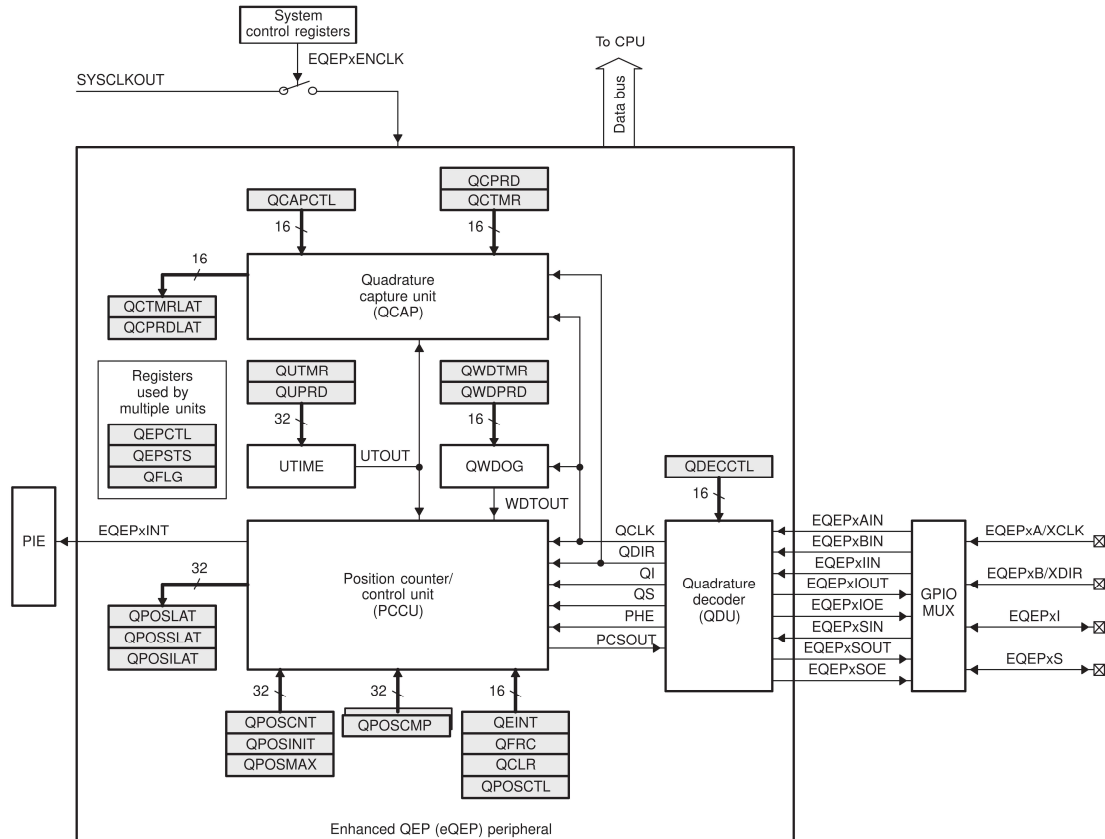
Možný rozsah převáděného signálu je 0-3 V. Pokud se vstupní hodnota nachází v pásmu 3-3,3 V, výsledek převodu je maximální digitální hodnota. Rozlišení A/D převodníku je 732  $\mu$ V. Pomocí komplexního systému předděliček je možno dosáhnout širokého pásma řídicích kmitočtů modulu A/D převodníku.[6]

Spuštění A/D převodníku je možné třemi způsoby. Jak už je zmíněno výše, jednou možností je signál z ET bloku ePWM modulů. Dále je A/D převod možno spouštět příkazem v programu nahráném do mikrokontroléru nebo pomocí vnějšího přerušení signálem na pinu XINT2.[6]

A/D převodník umožňuje nastavit sekvenční převod. Po spuštění převodu se provede přednastavená sekvence převodů. Jak je vidět na obr. 2-6, součástí pomocných bloků A/D převodníku jsou dva sekvencery. Jedná se o osmistavové sekvencery, které je možno používat jako nezávislé, nebo je kaskádně spojit a používat je jako šestnáctistavový sekvencer. Během jedné sekvence je možno převádět signál jednoho pinu víckrát, což může vést ke zpřesnění výstupní digitální hodnoty.[6],[8]

### 2.1.3 eQEP

Další z periférií, která od výrobce nese označení *enhanced* neboli vylepšená je eQEP. Její hlavní využití leží ve zpracování signálu z optických inkrementálních čidel. Vnitřní struktura této periférie je znázorněna na obr. 2-7.[6]



Obr. 2-7 Blokové schéma eQEP [6]

Jak je vidět na obr. 2-7, eQEP modulu jsou přiřazeny čtyři piny. Piny EQEPxA/XCLK a EQEPxB/XDIR mění svou funkci v závislosti na použitém snímači. Často je totiž možné se setkat s dvěma typy snímačů. První typ, tzv. kvadrurní signál, předává dva vůči sobě o čtvrt periody posunuté obdélníkové signály (EQEPxA, EQEPxB), ze kterých se pak počítá rychlost a směr otáčení. Druhý typ předává už přepočítané informace o rychlosti a směru (XCLK, XDIR). Čidla také často bývají vybavena třetím výstupem pro detekci nulové polohy hřídele. K přijetí tohoto signálu je určen další pin, označený EQEPxI. Poslední pin EQEPxS je tzv. strobovací vstup. Pokud na tomto vstupu dojde k definované akci, může dojít k inicializaci čítače, nebo naopak k zadržení hodnoty v čítači. Tento pin je nejčastěji využíván pro signály z koncových spínačů.[6],[9].

Hlavními bloky eQEP modulu jsou čítač pozice/řídící jednotka (PCCU), kvadrurní dekodér (QDU) a jednotka pro měření při nízkých otáčivých rychlostech (QCAP), časová základna pro přepočet rychlosti (UTIME) a *watch dog* pro detekci stojícího čidla (QWDOG).[6]

Při využití pro měření rychlosti je hlavním úkolem QDU předat dále informace o rychlosti a směru otáčení, ty jsou následně zpracovány blokem PCCU, který zařídí inkrementaci nebo dekrementaci v registru QPOSCTN. Blok UTIME při uplynutí nastavené doby periody vygeneruje pokyn pro uložení do přídržných registrů. Data z těchto registrů pak mohou být programem zpracována na údaj o otáčivé rychlosti, resp. otáčkách.[5],[6]

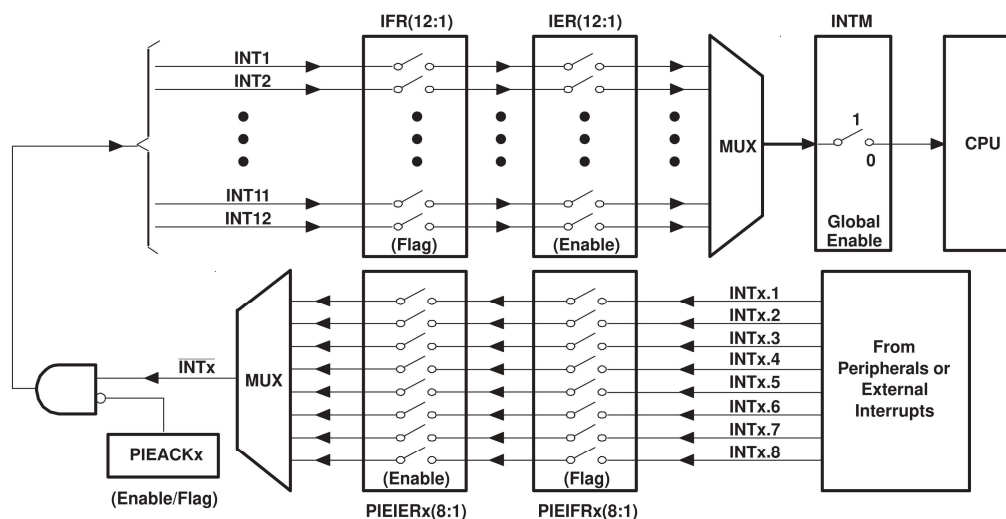
Široká škála dalších možných využití eQEP modulu je popsána v [6].

### 2.1.4 Systém přerušení

Mikrokontrolér podporuje 96 různých zdrojů přerušení. 58 možných zdrojů přerušení tvoří periferie mikrokontroléru.[3]

Každý ze zdrojů přerušení je reprezentován v příslušné části paměti svým vektorem. Zároveň je možné v PIE bloku každý z možných zdrojů přerušení zakázat.[6]

Proces příjmu žádosti o přerušení až po jeho obsluhu je znázorněn na obr. 2-8. Tento proces je členěn na tři podprocesy.



Obr. 2-8 Proces zpracování požadavku na přerušení [6]

#### 2.1.4.1 Periferní úroveň

Pokud v periférii dojde k akci, při které se má generovat přerušení, nastaví se v příslušném registru této akci odpovídající příznak. Pokud není přerušení povoleno v řídicím registru dané periferie, zůstává příznak nastaven, dokud není programem nulován. Pokud dojde v průběhu této doby k povolení generování přerušení od této periferie, je generován požadavek na přerušení. Všechny příznaky pro generování přerušení je třeba nulovat programově.[6]

#### 2.1.4.2 PIE úroveň

PIE blok zpracovává osm skupin přerušení od periférií a další externí přerušení z GPIO pinů. Jednotlivé zdroje přerušení jsou v PIE bloku rozřazeny do dvanácti podskupin po osmi. Každá podskupina má svůj osmibitový povolovací a příznakový registr. Při obdržení žádosti o přerušení se v patřičném registru nastaví příznakový bit. Pokud je přerušení z tohoto zdroje v povolovacím registru povoleno, provede se kontrola, že je CPU schopna přerušení z dané skupiny obsloužit, pomocí bitu PIEACK. Pokud ano, žádost je dále předána do CPU úrovně.[6]

#### 2.1.4.3 CPU úroveň

Stejně jako PIE úrovni i v CPU úrovni jsou používány dva osmi bitové registry, jeden příznakový a druhý povolovací. Když CPU úroveň přijme žádost o přerušení, nastaví se příslušný bit

v příznakovém registru. Pokud je tento zdroj přerušeni povolen v povolovacím registru, požadavek se předává dál. Pokud je dále v CPU globálně povolen přerušovací systém, CPU spustí proces obsluhy přerušeni. Při obsluze přerušeni jsou automaticky nulovány příznaky v registrech PIE a CPU úrovně. PIEACK bit je však třeba resetovat manuálně, aby bylo možno obsluhovat další přerušeni ze stejné skupiny.[6]

## **2.2 S/W používaný při vývoji**

### **2.2.1 Code Composer Studio**

*Code Composer Studio* je integrované vývojové prostředí (IDE) od společnosti *Texas Instruments*. Podporuje širokou škálu mikrokontrolérů a *embedded* procesorů společnosti TI, mezi které se řadí i mikrokontroléry z rodiny C2000.[10]

Disponuje standartním vybavením pro organizaci projektů, kde jsou uchovány jednotlivé části kódů, které vytvářejí programovanou aplikaci. Dále pak umožňuje psaní kódu v jazyce C/C++ s kontrolou syntaxe, obsahuje kompilátor jazyka C/C++ a umožňuje nahrávání programu do paměti mikrokontroléru. Další velice užitečnou funkcí je možnost ladění programu v reálném čase.[10]

Kromě výše zmíněných klíčových vlastností vývojového prostředí obsahuje *Code Composer Studio* spoustu dalších funkcí, které jsou popsány v [10].

### **2.2.2 GUI Composer**

*GUI Composer* je on-line aplikace od společnosti TI, která umožňuje vytvářet rozhraní pro komunikaci mezi člověkem a mikrokontrolérem. Umožňuje tak sledovat hodnoty vybraných proměnných nebo v reálném čase při běhu programu upravovat hodnoty v definovaných proměnných.

Aplikaci uživatelského rozhraní je možno vytvářet pomocí *drag and drop* grafického editoru a následně pak upravovat vlastnosti jednotlivých prvků aplikace pomocí připravených formulářů.

Pro správnou komunikaci mezi aplikací uživatelského rozhraní je třeba do prohlížeče instalovat rozšíření *TI Cloud Agent*, které je dostupné z [11].

### **2.2.3 C2000WARE**

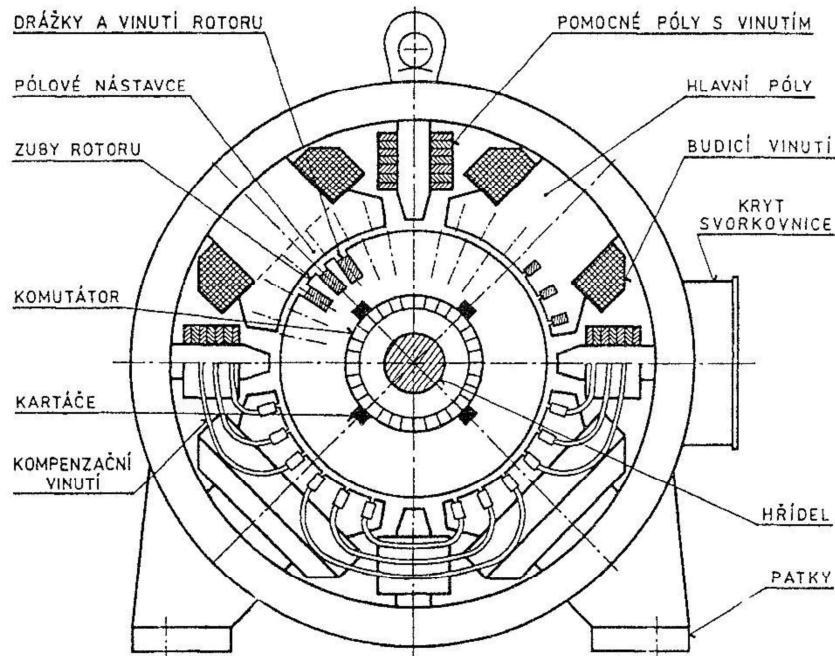
*C2000WARE* dostupný z [12] je balík speciálně vydaný pro mikrokontroléry rodiny C2000. Obsahuje velké množství předdefinovaných inicializací periférií, dokumentace mikrokontrolérů a jejich periférií a také spoustu ukázkových částí kódu pro obsluhu jednotlivých periférií. Stává se tak nepostradatelnou součástí a nemalou časovou úsporou při vývoji aplikací na mikrokontrolérech rodiny C2000.

## KAPITOLA 3: H/W ČÁSTI POHONU

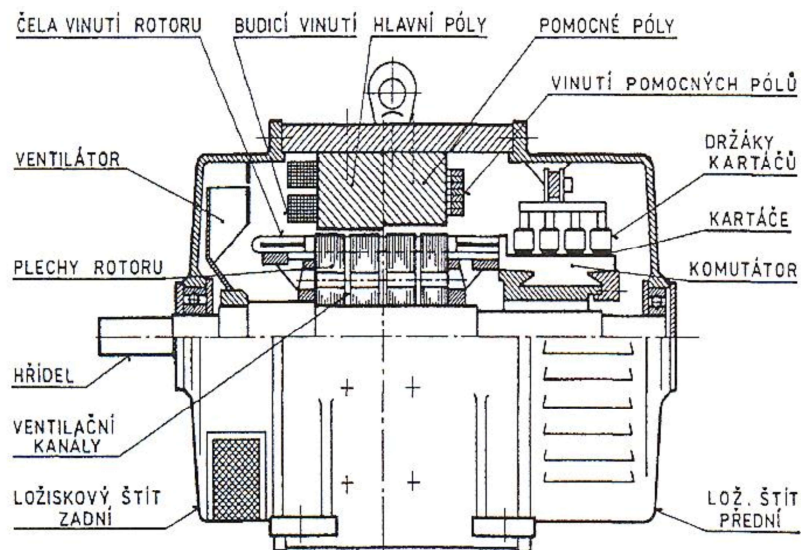
### 3.1 Stejnosměrný motor s permanentními magnety

#### 3.1.1 Konstrukce stejnosměrného motoru

Stejnosměrným motorem se rozumí motor pracující se stejnosměrným magnetickým tokem. Jeho konstrukce je oproti klasickým typům střídavých motorů poměrně složitá, především kvůli přítomnosti komutátoru. Příčný řez a podélný řez stejnosměrným motorem středního až vyššího výkonu jsou zobrazeny na obr. 3-1 a obr. 3-2.



Obr. 3-1 Příčný řez stejnosměrným motorem [13]



Obr. 3-2 Podélný řez stejnosměrným motorem [13]

Tato práce se ovšem věnuje realizaci pohonu se stejnosměrným motorem malého výkonu a s permanentními magnety. Rozdíl oproti výše vyobrazeným režům je především v konstrukci statoru. Ten neobsahuje pomocné póly a hlavní póly jsou nahrazeny permanentními magnety. Stator tedy nemá žádné elektrické vinutí a není třeba ho napájet. V důsledku toho je možné moment regulovat pouze pomocí proudu rotorem (kotvou), resp. otáčivou rychlost pomocí napětí přivedeného na kotvu.

### 3.1.2 Štítkové hodnoty motoru



Obr. 3-3 Motor zvolený pro realizaci pohonu

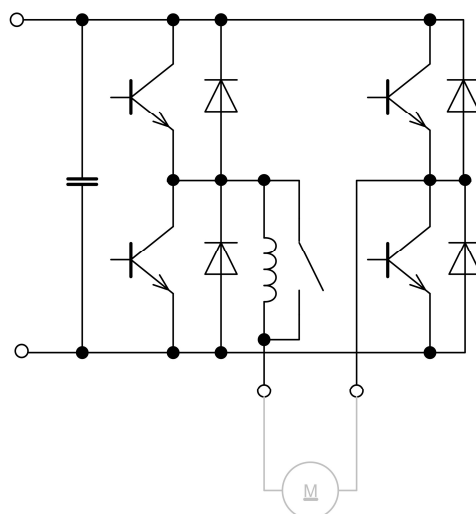
Foto motoru vybraného pro realizaci pohonu je vyobrazeno na obr. 3-3. Štítkové hodnoty tohoto motoru jsou uvedeny v tab. 3-1.

Tab. 3-1 Štítkové hodnoty motoru

Jmenovité napětí	24 V
Jmenovitý proud	4,7 A
Jmenovitá rychlost	3000 min <sup>-1</sup>
Druh zatížení	S2
Třída izolace	F
Jmenovitý výkon	70 W

### 3.2 Polovodičový měnič

Samotný motor je napájen z polovodičového měniče. Principiální schéma zapojení silové části měniče, který je použit pro realizaci pohonu, je na obr. 3-4.



Obr. 3-4 Principiální schéma zapojení silové části polovodičového měniče [14](upraveno)

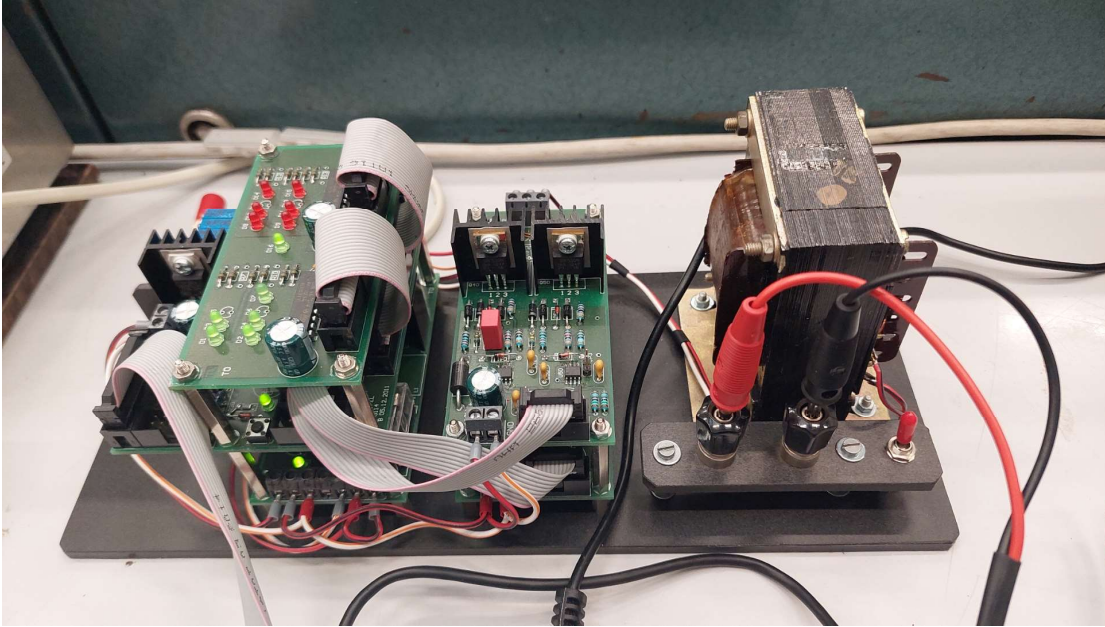
Z obrázku je patrné, že se jedná o jednofázový střídač napětíového typu. Taková topologie měniče umožňuje práci s oběma polaritami napětí i proudu a v důsledku toho i s oběma polaritami úhlové rychlosti  $\Omega$ .

Na výstup měniče je zapojen vyhlazovací tlumivka, jejíž účelem je omezení proudových rázů a snížení zvlnění výstupního proudu. Je patrné, že tuto tlumivku je možno přepínačem z obvodu vyřadit. Hodnota indukčnosti tlumivky je 90 mH.[14]

Komunikace s měničem je z H/W hlediska realizována pomocí plochého kabelu s dvaceti piny a příslušným konektorem. Signály předávané měniči a přijímané od měniče jsou na napětíové hladině 3,3 VDC. Mikrokontrolér si s měničem vyměňuje 4 signály. Logický signál *enable*, kterým je z mikrokontroléru povolen chod měniče, logický signál *reset*, kterým je z mikrokontroléru kvitován poruchový stav, a řídicí PWM signál. Frekvence řídicího signálu určuje spínací frekvenci tranzistorů měniče. Zatěžovatel určuje velikost střední hodnoty výstupního napětí měniče. Při zatěžovateli 0,5 je střední hodnota výstupního napětí nulová. Se zvyšujícím se, resp. snižujícím se zatěžovatelem řídicího signálu pak roste, resp. se snižuje střední hodnota výstupního napětí měniče. Posledním signálem je logický signál *error*, jímž měnič předává mikrokontroléru hlášení o poruchovém stavu.[14]

Maximální spínací frekvence měniče je 40 kHz. Jmenovité napájecí napětí je 24 VDC. Výstupní napětí se pak pohybuje v rozsahu  $\pm 24$  VDC.[14]

Fyzická konstrukce měniče je na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Fyzická konstrukce měniče

### 3.3 DPS s prvky měření a komunikace

Jak je popsáno na straně 1, nedílnou součástí regulace je i zpětná vazba, tedy měření. Návrh měřících prvků a jejich realizace na DPS je jedním z úkolů této práce a je popsán v další kapitole.

Protože mikrokontrolér a měnič nemají konektory, které by umožňovaly jejich přímé propojení, je také nezbytné, aby se DPS zajistila propojení komunikace mezi měničem a mikrokontrolérem.



## KAPITOLA 4: NÁVRH DPS S PRVKY MĚŘENÍ A KOMUNIKACE

Prvním krokem návrhu této části H/W je ujasnit si požadovanou funkci, následně vybrat prvky, které budou použity, a zajistit jejich napájení. Teprve poté je možné provést samotný návrh DPS.

### 4.1 Požadovaná funkce

Regulační schéma elektrického pohonu je zobrazeno na obr. 5-1. Z něj vyplývá, že pro realizaci regulační smyčky je nezbytné získávat informace o okamžité skutečné hodnotě proudu a rychlosti.

Pro zjišťování skutečné okamžité hodnoty rychlosti je s hřídelí motoru spojen optický kvadrturní enkodér s třemi stopami. Enkodér je však určen pro práci na napěťové hladině 5 VDC, takže kromě vhodného konektoru pro plochý kabel s osmi piny je pro toto čidlo nezbytné realizovat napájení a zároveň převod výstupního signálu na napěťovou hladinu 3,3 VDC, se kterou pracuje mikrokontrolér. Dále je vhodné zajistit na vstupu mikrokontroléru skutečně obdélníkový signál, což je možné realizovat například pomocí tvarovacího klopného obvodu s hysterezí, tzv. Schmittova klopného obvodu. Vzhledem k tomu, že výstupy enkodéru jsou zapojeny přes *pull-up*<sup>1</sup> rezistory, je vhodné též výstupní signál logicky invertovat.

Pro měření proudu je vhodné využít integrovaného obvodu (IO) určeného k tomuto účelu. Snímače proudu v podobě IO jsou v dnešní době nabízeny v zásadě ve třech variantách. Tyto varianty se liší způsobem měření hodnoty proudu a typem výstupního signálu. Informaci o velikosti proudu čidla získávají buď pomocí Hallovy sondy, nebo je využito odporového bočnicku, na kterém vzniká úbytek napětí úměrný velikosti proudu a vyhodnocována je velikost tohoto úbytku napětí. Snímače s odporovým bočníkem se vyznačují nižší pořizovací cenou a vyšší přesností. Jejich hlavní nevýhodou je přítomnost odporu v proudové cestě, na kterém vzniká výkonová ztráta. Výkonová ztráta má navíc za důsledek zvýšení teploty odporového bočnicku, což může vést ke změně skutečné hodnoty odporu a tím pádem ovlivnění měření.

Podle typu výstupního signálu rozlišujeme snímače proudu na snímače s analogovým výstupem nebo snímače s digitálním výstupem, které jsou v rámci integrovaného obvodu doplněny vlastním A/D převodníkem, který digitalizaci zajišťuje. To se pak odráží jednak ve vyšší spotřebě čidla a také ve vyšší pořizovací ceně.

Je zřejmé, že pro měření proudu za pomoci odporového bočnicku s analogovým výstupem není nabízen integrovaný obvod, protože tuto funkci realizuje už samotný odporový bočník.

Vzhledem k tomu, že mikrokontrolér využívaný jako řídicí systém pohonu disponuje vlastním A/D převodníkem, je pro tuto práci vhodnější volit pro měření proudu levnější variantu s analogovým výstupem. V této práci je použitý IO měřící proud na základě Hallova jevu, který zároveň zajišťuje galvanické oddělení silové části od signálové a zvyšuje tak bezpečnost mikrokontroléru.

### 4.2 Prvky DPS

Požadavky vypsané v podkapitole 4.1 splní čtyři aktivní prvky společně s dvěma kabelovými konektory. Společně s údajem, jakou funkci plní, jsou uvedeny v tab. 4-1. Při výběru prvků byla zohledněna především tato kritéria: okamžitá dostupnost, možnost ručního pájení, dostupnost a přehlednost datasheetu a dostupnost modelů pro návrh DPS.

<sup>1</sup> V češtině též zdvihací, nebo upínací rezistory.

Tab. 4-1 Hlavní prvky DPS

Označení prvku	Datasheet	Funkce
TMCS1108A2BQDT	[15]	U/I převodník využívající Hallova jevu s maximálním měřicím rozsahem $\pm 20$ A
75869-332LF	[16]	8pinový konektor pro ploché kabely určený pro komunikaci s optickým enkodérem
70246-2002	[17]	20pinový konektor pro ploché kabely určený pro komunikaci s měničem
TBA 1-0311	[18]	DC/DC měnič s izolovaným výstupem pro převod 3,3 VDC na 5 VDC
SN74HC14N	[19]	IO s 6 tvarovacími klopnými obvody s invertovaným výstupem
ISO7330FCDW	[20]	IO s 3 převodníky napětových hladin logického signálu

Dále plošný spoj obsahuje pomocné prvky nebo obvody, převážně vycházející z datasheetů jednotlivých prvků a také piny pro propojovací kabely s mikrokontrolérem.

Výrobce Texas Instruments doporučuje u použitých prvků, v případě této práce tedy TMCS1108A2BQDT, SN74HC14N a ISO7330FCDW, co možná nejbližší k napájecímu pinu umístit blokovací kondenzátor o hodnotě 100 nF [15], [19], [20]. IO totiž často odebírají proud impulzního charakteru. Pokud je použit lokální blokovací kondenzátor, je proudový impulz dodán z tohoto blokovacího kondenzátoru, a nikoliv ze zdroje desky, což vede k větší spolehlivosti zařízení.[21]

Kanály optického enkodéru jsou zapojeny přes zvedací odpory o hodnotě 10 k $\Omega$ .

Výrobce doporučuje u DC/DC měniče TBA 1-0311 zajistit trvalé zatížení. To by mělo odpovídat deseti procentům maximálního možného zatížení. Při nedodržení tohoto minimálního trvalého zatížení výrobce negarantuje vlastnosti dané datasheetem [18]. Aby bylo toto trvalé minimální zatížení dodrženo, je na výstup DC/DC měniče připojena LED s rezistorem o jmenovité hodnotě 150  $\Omega$ . Tímto obvodem by měl trvale protékat proud 20 mA, což odpovídá přesně 10 % maximálního odebíraného proudu, čímž je splněna podmínka minimálního zatížení DC/DC měniče. LED ovšem také umožňuje snadnou vizuální kontrolu přítomnosti napětí 5 V na výstupu DC/DC měniče. Měnič je na napájecí straně, tedy straně s napětím 3,3 V, jištěn pojistkou T 0,8 A, jak je doporučeno v [18].

Z důvodu vizuální kontroly přítomnosti napájecího napětí je LED s předřadným rezistorem umístěna i u přívodu napětí 3,3 V z dokovací desky mikrokontroléru. Předřadný odpor pro napětí 3,3 V má jmenovitou hodnotu 60  $\Omega$ .

Pro připojení kabelů se silovým proudem je využito konektoru se šroubovými svorkami, určenými pro připojení vodiče zakončeného kabelovou dutinkou.

### 4.3 Napájení prvků DPS

Dokovací deska mikrokontroléru umožňuje napájení jeho vnějších periférií. Výrobce v [22] neuvádí žádné výkonové omezení na tento zdroj. Protože dokovací deska s mikrokontrolérem

je napájena z počítačového USB portu, bude jako maximální možný odebraný výkon aplikace brán maximální odebraný výkon počítačového USB portu. Maximální výkon takového portu u většiny standartních PC odpovídá

$$P_{\max} = U \cdot I_{\max} = 5 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 2,5 \text{ W.} \quad (1)$$

Maximální odebraný výkon samotným mikrokontrolérem odpovídá 1,0395 W [23]. Je nepravděpodobné, že by v průběhu této aplikace k takovému odběru došlo, i přesto s ním bude kvůli bezpečnosti nadále počítáno.

Výkon odebíraný DC/DC měničem naprázdno TBA 1-0311 je 99 mW [18]. S tímto výkonem bude počítáno jako s trvalým odběrem tohoto prvku.

U převodníku logických úrovní ISO7330FCDW je třeba uvažovat odběr jak strany s napětím 5 V, tak strany s napětím 3,3 V. Pro stranu s napětím 5 V bude počítáno s odběrem 16,5 mW a pro stranu s napětím 3,3 V bude počítáno s odběrem 21 mW.[20]

Maximální uváděná spotřeba I/U převodníku TMCS1108 je 30 mW.[15]

Odběr optického enkodéru bude tvořen LED, která bude přes štěrby osvětlovat snímací fototranzistory. Jelikož přesný odběr není znám, bude počítáno s odhadem 100 mW.

Posledními prvky s nezanedbatelným výkonovým odběrem jsou LED s předřadnými odpory. Použité diody jsou stejného typu s nominální hodnotou proudu 20 mA. Jejich výkonový odběr společně se ztrátovým výkonem na předřadných odporech tak získáme pouhým vynásobením jmenovitého proudu s napájecím napětím. Dostáváme pak 100 mW pro LED na napěťové hladině 5 V a 66 mW na napěťové hladině 3,3 V.

U integrovaného obvodu SN74HC14N se Schmittovými klopnými obvody dosahuje odebíraný proud maximálně nízkých desítek mikroampér [19], ve výpočtu odebíraného výkonu bude tak tento prvek zanedbán.

Pro celkový předpokládaný odběr tedy platí

$$\sum P_{\text{odebíraný}} = 1,506 \text{ W,}$$

což je méně než 2,5 W. Zdroj tedy vyhovuje i s dostatečnou rezervou.

Jako dílčí zdroj působí i DC/DC měnič, jehož výstupní výkon je limitován na 1 W. Je tedy zapotřebí provést součet všech výkonových odběrů prvků pracujících na napěťové hladině V, kterými jsou z výše vyjmenovaného: optický enkodér, odběr LED a jedna strana ISO7330FCDW. Platí tedy

$$\sum P_{\text{odebíraný}5\text{V}} = 216,5 \text{ mW,}$$

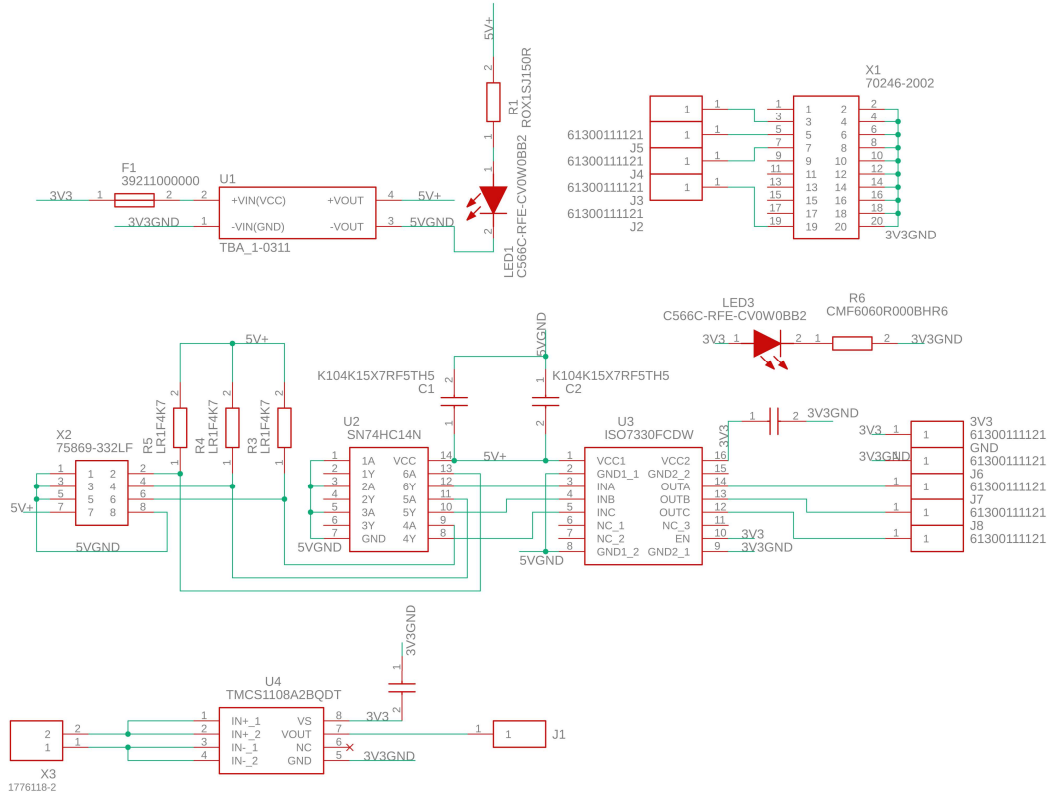
což je méně než 2,5 W. Navržený DC/DC měnič tedy pro napájení těchto prvků vyhovuje.

#### 4.4 Návrh DPS

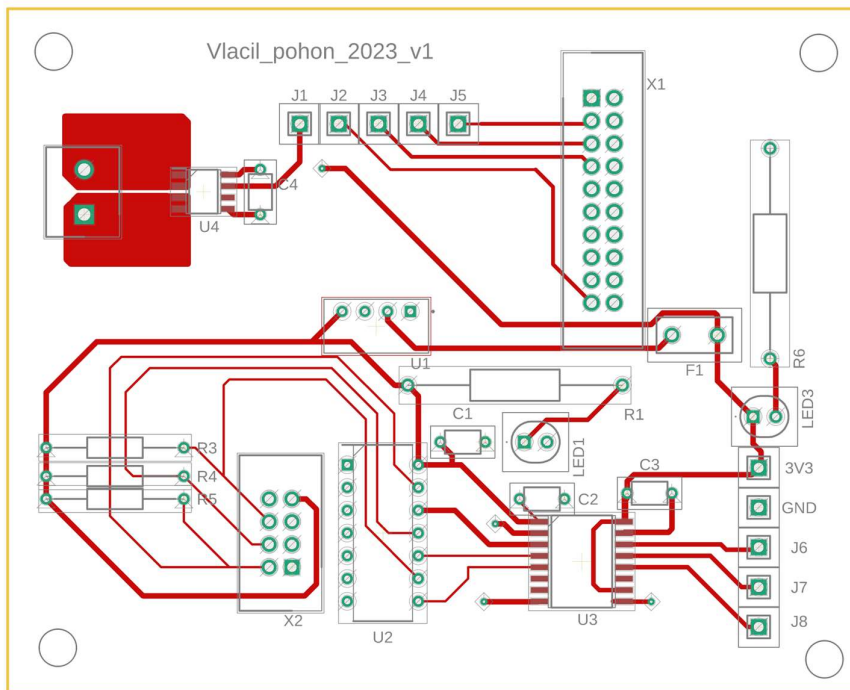
K návrhu samotného DPS byl použit program *Fusion 360* od společnosti Autodesk. S jeho pomocí byl vytvořen návrh dvoustranného plošného spoje. Na spodní straně se nacházejí oblasti s rozlitou mědí, které tvoří země pro jednotlivé napěťové hladiny. Důsledkem toho jsou kratší proudové smyčky a díky tomu je nižší parazitní indukčnost proudových cest.[21]

Elektrické schéma zapojení je na obr. 4-1. Fyzický návrh plošného spoje je pak na obr. 4-2 a obr. 4-3. Foto hotové DPS s osazenými součástkami je na obr. 4-4.

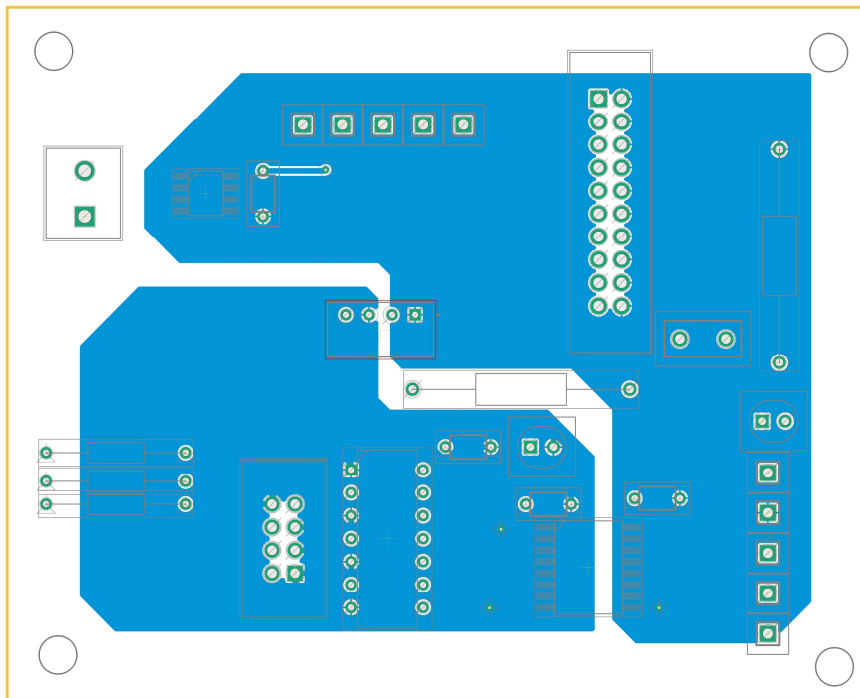
Základní materiál DPS je ITEQ-158 o tloušťce 1,5 mm. Tloušťka vodivých cest je 18  $\mu\text{m}$ . Deska je dále pokryta zelenou nepájivou maskou a kontakty jsou ošetřeny povrchovou úpravou HASL.



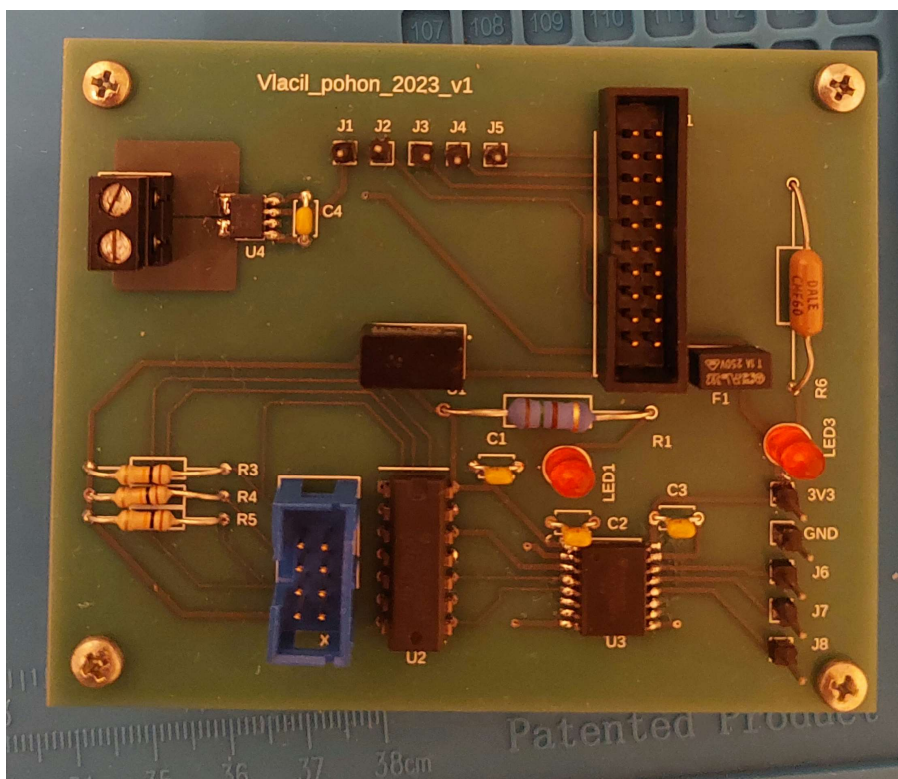
Obr. 4-1 Elektrické schéma zapojení DPS



Obr. 4-2 Horní strana DPS



Obr. 4-3 Dolní strana DPS



Obr. 4-4 Foto horní strany DPS s osazenými součástkami

Seznam prvků s jejich označením v se nachází v tab. 4-2.

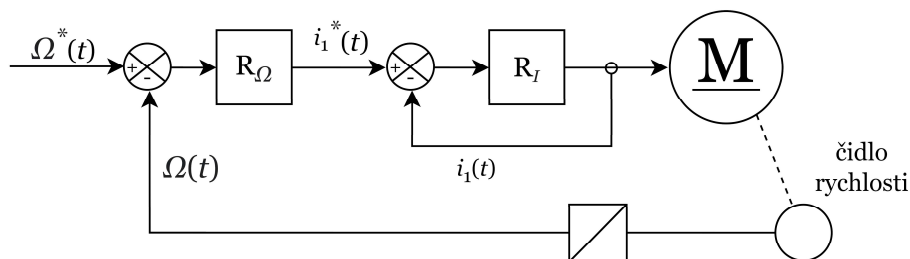
Tab. 4-2 Popis prvků DPS

Ozna- čení	Popis	Funkce
U1	TBA 1-0311	DC/DC měnič s izolovaným výstupem pro převod 3,3 VDC na 5 VDC
U2	SN74HC14N	IO s šesti tvarovacími klopnými obvody s invertovaným výstupem
U3	ISO7330FCDW	IO s třemi převodníky napěťových hladin logického signálu
U4	TMCS1108A2BQDT	U/I převodník s maximálním měřicím rozsahem $\pm 20$ A
C1	Kondenzátor 100 nF	Blokovací kondenzátor dle doporučení výrobce
C2	Kondenzátor 100 nF	Blokovací kondenzátor dle doporučení výrobce
C3	Kondenzátor 100 nF	Blokovací kondenzátor dle doporučení výrobce
C4	Kondenzátor 100 nF	Blokovací kondenzátor dle doporučení výrobce
R1	Rezistor 150 $\Omega$	Předřadný rezistor pro LED
R3	Rezistor 10 k $\Omega$	Zvedací odpor pro kanál kvadrurního čidla
R4	Rezistor 10 k $\Omega$	Zvedací odpor pro kanál kvadrurního čidla
R5	Rezistor 10 k $\Omega$	Zvedací odpor pro kanál kvadrurního čidla
R6	Rezistor 60 $\Omega$	Předřadný rezistor pro LED
LED1	LED; červená	Indikace přítomnosti napájení 5 V
LED3	LED; červená	Indikace přítomnosti napájení 3,3 V
J1	1 pin samec	Informace o velikosti proudu pro procesor
J2	1 pin samec	Signál pro měnič – chyba
J3	1 pin samec	Signál od měniče – PWM
J4	1 pin samec	Signál pro měnič – povolení funkce
J5	1 pin samec	Signál pro měnič – kvitance chyby
J6	1 pin samec	Výstup kanálu I optického čidla
J7	1 pin samec	Výstup kanálu A optického čidla
J8	1 pin samec	Výstup kanálu B optického čidla
3V3	1 pin samec	Připojení napájení +
GND	1 pin samec	Připojení napájení –
X1	20pinový konektor	Konektor určený pro komunikaci s měničem
X2	8pinový konektor	Konektor určený pro komunikaci s optickým čidlem rychlosti
F1	T 0,8 A	Pojistka pro U1 dle doporučení výrobce

## KAPITOLA 5: REGULACE POHONU

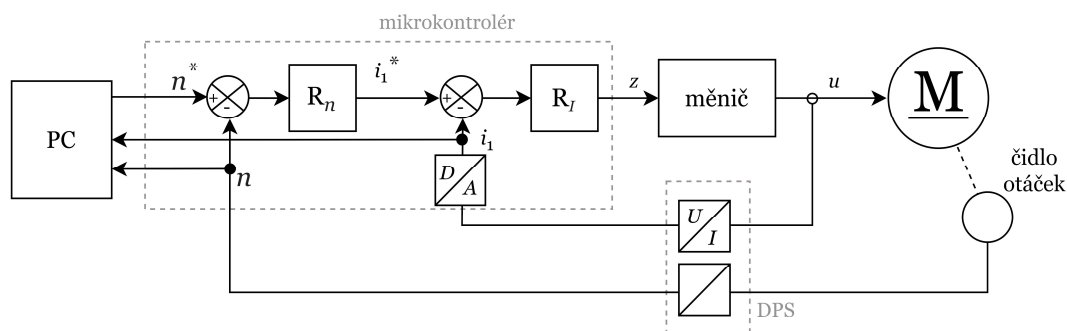
### 5.1 Regulace pohonů se stejnosměrnými motory

Pro regulaci pohonů se stejnosměrnými motory je často používáno sériové vlečné regulace. Vnější regulační smyčka slouží k regulaci rychlosti, resp. otáček motoru, vnitřní smyčka slouží k regulaci kotevního proudu.<sup>2</sup> Obecné schéma takovéto regulace je na obr. 5-1.



Obr. 5-1 Regulační schéma stejnosměrného motoru

Toto schéma však poskytuje pouze ideový přehled o regulaci. Schéma reálné regulace realizované v této úloze je na obr. 5-2. V tomto schématu je zároveň vyznačeno, v jakém fyzickém prvku jsou jednotlivé části regulační smyčky realizovány.



Obr. 5-2 Reálná regulační smyčka

V následujících podkapitolách budou matematicky popsány jednotlivé členy regulační smyčky.

### 5.2 Matematický model stejnosměrného motoru

Matematický model motoru se dá logicky rozdělit na dvě části. Je to mechanická část a elektrická část. Pokud předpokládáme konstantní moment setrvačnosti na hřídeli motoru, dá se mechanická část motoru popsat pomocí pohybové rovnice ve tvaru

$$M - M_z = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2)$$

kde  $M$  je elektromechanický moment vyvíjený motorem,  $M_z$  je zátěžný moment,  $J$  je moment setrvačnosti,  $\Omega$  mechanická úhlová rychlost a  $t$  čas.

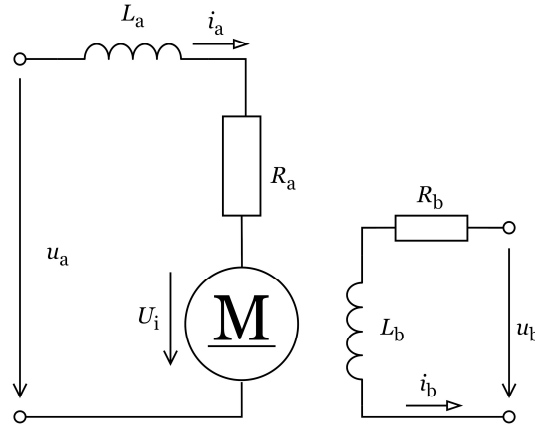
<sup>2</sup> V závislosti na konkrétní aplikaci je možno regulaci doplnit o nadřazenou smyčku pro regulaci úhlu natočení hřídele. Ta však v této práci není řešena.

Vazbu mezi elektrickou a mechanickou částí modelu stejnosměrného motoru popisuje rovnice

$$M = k \cdot \Phi_b \cdot i_a, \quad (3)$$

kde  $k$  je konstanta daná konstrukčními parametry motoru,  $\Phi_b$  je magnetický tok vyvolaný buzením a  $i_a$  je kotevní proud.

Na obrázku obr. 5-3 vidíme náhradní schéma elektrické části stejnosměrného motoru.



Obr. 5-3 Elektrické náhradní schéma stejnosměrného motoru

Matematický model elektrické části pak tvoří rovnice

$$u_a = L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a + u_i, \quad (4)$$

$$u_i = k \cdot \Phi_b \cdot \Omega, \quad (5)$$

$$u_b = R_b \cdot i_b + L_b \cdot \frac{di_b}{dt}, \quad (6)$$

$$\Phi_b = L_b \cdot i_b, \quad (7)$$

kde  $L_a$  je indukčnost kotevního obvodu,  $R_a$  je odpor kotevního obvodu,  $L_b$  je indukčnost budicího obvodu,  $R_b$  je odpor budicího obvodu,  $u_i$  je napětí indukované do kotvy motoru,  $u_a$  je napětí zdroje připojeného ke kotevnímu obvodu,  $u_b$  je napětí zdroje připojeného k budicímu obvodu a  $i_b$  je budicí proud.

Pro motor s permanentními magnety je magnetický tok buzení konstantní a je vytvářen právě permanentními magnety, nikoliv proudem tekoucím v budicím vinutí. V důsledku toho model motoru s permanentními magnety neobsahuje rovnice (6) a (7). Zároveň je také možné upravit rovnice (3) a (5) do tvarů

$$M = k_b \cdot i_a, \quad (8)$$

$$u_i = k_b \cdot \Omega. \quad (9)$$

### 5.3 Matematický model polovodičového měniče

Matematický model ideálního stejnosměrného měniče má tvar

$$U_2 = z \cdot U_M, \quad (10)$$

kde  $U_2$  je střední hodnota výstupního napětí,  $z$  je zatěžovatel a  $U_M$  je hodnota vstupního napětí.



Takovýto model však předpokládá, že odezva výstupu za změnu zatěžovatele je okamžitá. Ve skutečnosti ovšem dochází ke zpoždění, protože k reakci na změnu zatěžovatele dochází až při následující periodě.

Toto zpoždění se reprezentuje náhradní časovou konstantou měniče  $\tau_{pm}$ . Její hodnota je polovina spínací periody měniče. Pro tuto práci je maximální spínací frekvence měniče 40 kHz. Náhradní časová konstanta tedy  $\tau_{pm} = (40\,000 \text{ Hz} \cdot 2)^{-1} = 1,25 \mu\text{s}$ .

Model reflektující zpožděnou reakci měniče má v podobě přenosu v operátorové rovině tvar

$$G_{pm} = \frac{U_2(s)}{Z(s)} = \frac{U_M}{1 + s \cdot \tau_{pm}}. \quad (11)$$

## 5.4 Regulátor

Regulátor je součástí regulačního obvodu, přičemž podstata jeho funkce spočívá ve zpracování regulační odchylky podle daného matematického předpisu.[24]

### 5.4.1 PID regulátor

V regulační technice se nejčastěji setkáváme se třemi předpisy, resp. jejich kombinacemi. Regulátory s těmito typickými předpisy se nazývají: proporcionální, integrační a derivační. Matematický popis bude dále proveden pouze pro kombinaci všech tří složek tzv. PID regulátor.

Pokud konkrétní aplikace nevyužívá všechny tři složky, je možné nevyužívanou složku vyřadit vhodným zvolením konstanty této složky.

V literatuře se vyskytuje mnoho různých tvarů předpisu PID regulátoru, lišících se v podobě zavedení konstant. V této práci bude převzat a dodržován předpis z [1], který má tvar

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (12)$$

kde  $K_P$  je proporcionální konstanta regulátoru,  $T_I$  je integrační časová konstanta regulátoru,  $T_D$  je derivační časová konstanta regulátoru,  $e$  je regulační odchylka a  $u$  je akční veličina.

Operátorový přenos takto zavedeného regulátoru má tvar

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{1}{s \cdot T_I} + T_D \cdot s. \quad (13)$$

Výše uvedené předpisy pracují se spojitými veličinami. Mikrokontroléry jsou však číslicová zařízení a dokáží tedy pracovat pouze s diskrétními veličinami. Aby bylo možné regulátory implementovat v rámci mikrokontroléru, je nezbytné předpis regulátoru diskretizovat.

### 5.4.2 Diskretizace/PSD regulátor

Diskretizace je proces, při kterém je v čase spojitá veličina vzorkována s určitou periodou  $T_{vz}$ . Ze spojitých veličin se tak stávají pouze posloupnosti bodů.

Okamžité hodnoty takto diskretizovaných veličin již není možné získat v libovolném čase, ale pouze v nějakém celistvém násobku  $T_{vz}$ . Korektní zápis hodnoty veličiny v  $k$ -tém násobku by pak byl např. pro regulační odchylku  $e(k \cdot T_{vz})$ . Častěji se však používá zkrácený zápis  $e(k)$ , kde  $k$  je přirozené číslo určující pořadí vzorku.

Dále je třeba vyřešit výskyt integrálu a derivace. Tyto matematické operace jsou definovány pouze pro spojitě funkce, proto je třeba tyto operace nahradit pouze numerickými aproximacemi. V případě integrálu bude v rámci této práce použita lichoběžníková metoda numerické integrace. Derivace bude nahrazena numerickou metodou derivování zvanou zpětná diference. Provedením popsanych kroků lze z rovnice (12) získat předpis diskrétního PID regulátoru, který má tvar

$$u(k) = K_P e(k) + \frac{T_{VZ}}{2T_1} \sum_{n=1}^k (e(n) + e(n-1)) + \frac{T_D}{T_{VZ}} (e(k) + e(k-1)). \quad (14)$$

Protože integrál byl nahrazen sumou, často se pro označení tohoto regulátoru používá zkratka PSD.

### 5.4.3 Přírůstkový tvar PSD regulátoru

Rovnice (14) je sice platným předpisem funkce PSD regulátoru, pro programovou implementaci v mikrokontroléru však existuje vhodnější tvar tohoto předpisu.

Zavádí se tzv. přírůstek, pro který platí

$$\Delta u = u(k) - u(k-1). \quad (15)$$

Z rovnice (14) pak lze odvodit tvar přírůstku pro PSD regulátor

$$\Delta u = e(k) \cdot \left( K_P + \frac{T_{VZ}}{2T_1} + \frac{T_D}{T_{VZ}} \right) + e(k-1) \cdot \left( -K_P + \frac{T_{VZ}}{2T_1} - \frac{2T_D}{T} \right) + e(k-2) \cdot \left( \frac{T_D}{T_{VZ}} \right). \quad (16)$$

Pro větší přehlednost bude nadále použito označení

$$q_0 = K_P + \frac{T_{VZ}}{2T_1} + \frac{T_D}{T_{VZ}}, \quad (17)$$

$$q_1 = -K_P + \frac{T_{VZ}}{2T_1} - \frac{2T_D}{T}, \quad (18)$$

$$q_2 = \frac{T_D}{T_{VZ}}. \quad (19)$$

Z definice přírůstku platí

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (20)$$

Dosazením (16) do (20) lze získat tvar PSD regulátoru

$$u(k) = u(k-1) + e(k) \cdot q_0 + e(k-1) \cdot q_1 + e(k-2) \cdot q_2. \quad (21)$$

Tento tvar regulátoru se nazývá přírůstkový, nebo také rychlostní.

### 5.4.4 Unášení integračního členu

Unášení integračního členu je jev, který má negativní dopad na kvalitu regulace. Pokud je požadovaná hodnota regulované veličiny vyšší, než je spojení akčního členu a regulované soustavy schopno dosáhnout, regulovaná veličina se dostane do saturace. Integrační člen regulátoru však nadále přičítá odchylku k hodnotě regulátoru. Výstup regulátoru tedy nadále roste, i když na něj akční člen není schopen nadále reagovat. Po změně požadované hodnoty pod mez saturace pak musí integrační člen dostatečně dlouho přičítat odchylku opačné polarity, než skutečně dojde k regulačnímu zásahu.[25]

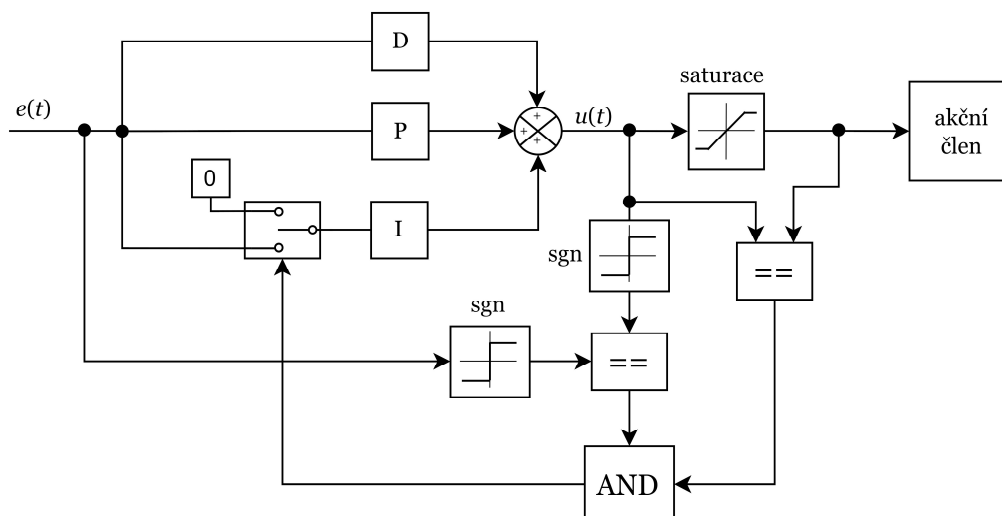
V této práci by k takové situaci mohlo dojít, například pokud by při proudové regulaci byla požadovaná hodnota proudu nastavena na jmenovitý proud motoru a motor by běžel nezatížen. Hodnota proudu naprázdno je totiž násobně menší než jmenovitý proud.

Je jasné, že výše popsáný jev je zcela nežádoucí a je třeba ho potlačit. K potlačení unášení integračního členu existuje mnoho metod. Mezi často používané metody patří metoda zpětného dopočtení (*Back-calculation method*) nebo metoda sevření (*clamping*).[25]

V této práci bude využita metoda *clamping*. Princip *clampingu* je graficky zobrazen na obr. 5-4. Výstup regulátoru je v této metodě omezen (sevřen). Pokud výstup regulátoru dosáhne tohoto omezení a zároveň má regulační odchylka takový smysl, že by integrační složka výstup

regulátoru nadále zvětšovala, integrační člen je vyřazen. K opětovnému zařazení integračního členu dojde teprve při změně polarity regulační odchylky.

V této práci budou limity výstupu dány limitními dobami sepnutí, resp. rozepnutí tranzistorů v měniči pro regulátor proudu a jmenovitým proudem motoru pro regulátor otáček.



Obr. 5-4 Omezení unášení integračního členu metodou „clamping“ [25](upraveno)

## 5.5 Regulátor proudu

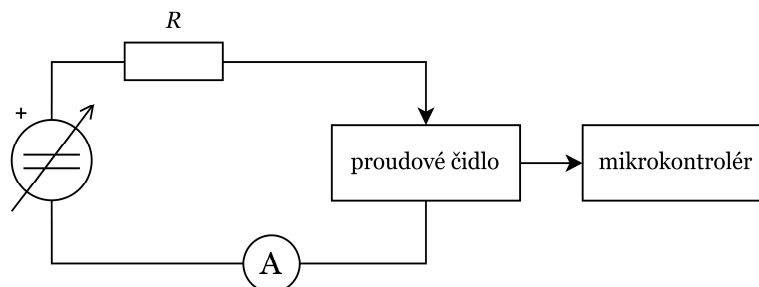
### 5.5.1 Kalibrace proudového čidla

Prvním krokem k realizaci proudového regulátoru je kalibrace čidla TMCS1108A2BQDT. Po zpracování výstupní hodnoty A/D převodníkem mikrokontroléru se hodnota pohybuje v rozsahu od 0 do 65535<sup>3</sup>. Přepočtení na hodnotu proudu bude prováděno pomocí rovnice

$$I_a = \frac{\text{aktuální hodnota A/D převodníku} - \text{referenční hodnota}}{\text{kalibrační konstanta}}, \quad (22)$$

kde referenční hodnota je výstupní hodnota A/D převodníku při nulovém proudu, která je určena z prvních 1000 vzorků získaných z A/D převodníku. Povolovací signál pro měnič je po dobu odebrání prvních 1000 vzorků blokován, nezávisle na nastavení z GUI. Kalibrační konstanta je experimentálně určená převodní konstanta, jejíž rozměr je  $A^{-1}$ .

Pro určení kalibrační konstanty bylo sestaveno pracoviště schematicky zobrazené na obr. 5-5.



Obr. 5-5 Pracoviště pro kalibraci proudového čidla

<sup>3</sup> Tento rozsah neodpovídá rozlišení A/D převodníku. Jeho výstupní hodnota je totiž uchována ve vrchních dvanácti bitech šestnáctibitového registru.

Při kalibraci vykazovala výstupní hodnota A/D převodníku i při konstantních proudech značný rozkmit. Z toho důvodu byl před vstup A/D převodníku zařazen RC filtr typu dolní propust se jmenovitými parametry  $R_{RC} = 220 \Omega$  a  $C_{RC} = 47 \mu\text{F}$ . Po zařazení filtru byla určena kalibrační konstanta, jejíž hodnota činila  $2220 \text{ A}^{-1}$ .

### 5.5.2 Algoritmus proudového regulátoru

Z *Event Trigger and Interrupt* bloku modulu ePWM1 je spouštěn A/D převodník, který zpracovává hodnotu z čidla TMCS1108A2BQDT. Převod je spouštěn s frekvencí 40 kHz. Po dokončení převodu A/D převodníku je vyvoláno přerušení. V obsluze přerušení je nastaven do příslušné proměnné příznak o nových datech z A/D převodníku. Příznak spustí část kódu, který provede následující kroky:

- přepsání proměnné držící hodnotu o předchozí hodnotě regulační odchylky a proměnné držící hodnotu o předchozím výstupu regulátoru
- přepočítání hodnoty A/D převodníku na hodnotu proudu podle rovnice (22)
- vyhodnocení, jestli požadovanou hodnotu proudu poskytne regulátor otáček, nebo aplikace GUI
- provedení výpočtu regulační odchylky s příslušnou žádanou hodnotou proudu
- výpočet nového výstupu regulátoru podle rovnice (21)
- kontrola splnění podmínek pro vyřazení omezení integračního členu, popř. vyřazení nebo znovuzařazení integračního členu
- kontrola, popř. omezení maximální výstupní hodnoty regulátoru na  $(-0,84|0,84)^4$

Výstup se, je-li regulátor proudu zvolen jako aktivní, zapisuje do komparačních registrů modulu ePWM3 při každém přetečení *Time-Base* bloku tohoto modulu. Spínací frekvence výstupního PWM signálu, a tedy i frekvence přetečení *Time-Base* bloku, je 40 kHz, což je maximální spínací frekvence měniče.

## 5.6 Regulátor rychlosti

### 5.6.1 Metoda výpočtu rychlosti

Základní dvě metody pro výpočet otáčivé rychlosti z pulzů rotačního enkodéru jsou obdobou metod využívaných pro měření frekvence.

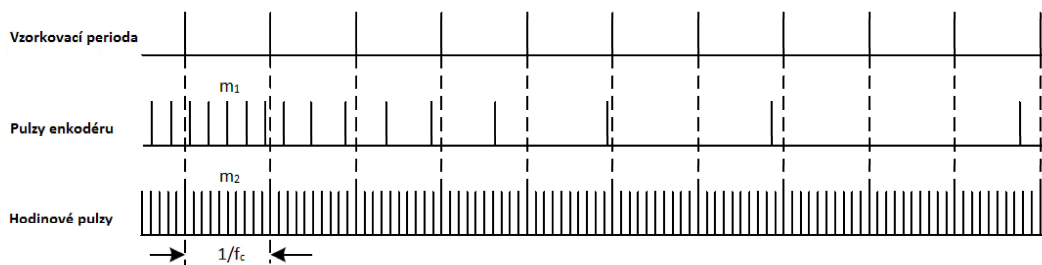
První metoda spočívá v měření doby mezi pulzy. Tato metoda je vhodná pro měření nízkých otáček. V literatuře se tato metoda někdy označuje jako „T“ [5]

Při druhé metodě se naopak měří počet pulzů za konstantní dobu. Tato metoda se v literatuře též označuje jako metoda „M“ [5]

V rámci této práce bude pro výpočet rychlosti použita metoda označovaná jako „M/T“, která je do jisté míry kombinací obou metod. Oproti metodě „T“ tedy dojde ke zpřesnění v oblasti nízkých rychlostí. I tato metoda má ovšem omezení. Nespolehlivá je v oblasti velmi nízkých rychlostí, kdy je počet pulzů během vzorkovací periody nulový. [5]

Princip této metody spočívá v tom, že kromě celkového počtu pulzů enkodéru je měřena doba mezi prvním a posledním pulzem enkodéru ve vzorkovací periodě. Graficky je tento princip naznačen na obr. 5-6. [5]

<sup>4</sup> Toto omezení je dáno limitními dobami sepnutí, resp. rozepnutí tranzistorů měniče. [14]



Obr. 5-6 Princip „M/T“ metody pro měření rychlosti otáčení [5]

Otáčky hřídele lze pomocí této metody získat pomocí vzorce

$$n = \frac{60 \cdot f_c \cdot m_1}{P \cdot m_2}, \quad (23)$$

kde  $f_c$  je frekvence hodin časovače v Hz,  $P$  je počet pulzů enkodéru na otáčku,  $m_1$  je počet pulzů enkodéru ve vzorkovací periodě a  $m_2$  je počet pulzů časovače mezi hranou prvního a hranou posledního pulzu enkodéru ve vzorkovací periodě. Při praktickém výpočtu v mikrokontroléru pro člen  $m_1$  platí

$$m_1 = \text{QPOSLAT}(k) - \text{QPOSLAT}(k - 1), \quad (24)$$

kde QPOSLAT je hodnota v takto označeném přídržném registru eQEP modulu. Pro člen  $m_2$  platí

$$m_2 = \text{QUPRD} - \text{QCTMRLAT}(k) + \text{QCTMRLAT}(k - 1), \quad (25)$$

kde QUPRD a QCTMRLAT jsou opět hodnoty v takto označených registrech eQEP modulu.[5]

Vzhledem k tomu, že *quadrature counter* eQEP modulu čítá náběžné i sestupné hrany obou stop enkodéru, zdánlivě se vytváří čtyřnásobný počet pulzů, než jedné otáčky enkodéru skutečně přísluší [5]. Použitím rovnice (23) by tak docházelo k systematické chybě, jejíž vinou by byla vypočtená rychlost čtyřikrát vyšší než skutečná. Pro implementaci je tedy vhodné rovnici (23) upravit do tvaru

$$n = \frac{15 \cdot f_c \cdot m_1}{P \cdot m_2}, \quad (26)$$

který systematickou chybu eliminuje.

Dále je při výpočtu nezbytné odlišit směr otáčení rotoru. Ten je vyhodnocován pomocí eQEP modulu a ukládán do bitu označeného „QDF“. Při výpočtu otáček je tedy zapotřebí pravou stranu rovnice (26) násobit 1, resp.  $-1$  v závislosti na hodnotě bitu QDF, resp. na hodnotě ekvivalentního přídržného bitu „QDLF“.[5]

## 5.6.2 Algoritmus regulátoru rychlosti

V registru QUPRD eQEP modulu je nastavena hodnota 150 000 hodinových pulzů. Předděličky hodinového signálu nejsou použity. Při dosažení hodnoty QUPRD v čítači hodinových pulzů eQEP jednotky se hodnoty QPOS a QCTMR přesunou do příslušných přídržných (*latch*) registrů. Zároveň je do příslušné proměnné nastaven příznak, který spustí zpracování těchto hodnot. Výpočet rychlosti je proveden podle rovnice (26) včetně určení smyslu otáčení.

Z výše uvedeného vyplývá, že k tomuto dochází s periodou 1 ms. Při testování však hodnota rychlosti vykazovala značný rozptyl, bylo proto zavedeno tzv. průměrování. Před spuštěním samotného regulátoru otáček se odebere pět vzorků, následně je vypočten jejich aritmetický průměr a teprve tato hodnota je brána jako platná hodnota rychlosti a po provedení výpočtu aritmetického průměru je do proměnné nastaven příznak pro spuštění regulátoru rychlosti. Nastavený příznak umožní spuštění části kódu, která vykoná následující kroky:

- provedení výpočtu regulační odchylky
- výpočet nového výstupu regulátoru podle rovnice (21)
- kontrola splnění podmínek pro omezení integračního členu, popř. vyřazení nebo znovuzařazení integračního členu
- kontrola, popř. omezení maximální výstupní hodnoty regulátoru na  $(-4,7|4,7)^5$

Regulátor rychlosti na rozdíl od regulátoru proudu, není v provozu trvale, ale pouze pokud je z uživatelského rozhraní aktivována regulace rychlosti. Výstup regulátoru rychlosti je při následujícím běhu regulátoru proudu použit jako požadovaná hodnota proudu.

## 5.7 Syntéza regulátorů

V literatuře je popsáno mnoho metod syntézy regulátorů, respektive regulačního pochodu. Logicky je možné tyto metody rozdělit do tří skupin. Metody heuristické, analytické a metody empirické.

Analytické metody vyžadují znalost přenosů regulovaných soustav. Různé metody pak popisují různé způsoby pro přepočítání konstant regulátoru. Mezi tyto metody se řadí např. metoda symetrického optima a metoda optimálního modulu, které jsou podrobněji popsány např. v [1].

Metody empirické se provádějí na již realizovaných a funkčních soustavách, které ovšem nemají naladěné regulátory. Na již funkční soustavě se provedou měření určitých parametrů, z nichž jsou pak empirickými předpisy přepočteny konstanty regulátorů. Mezi často používané metody patří Ziegler-Nicholsonova metoda popsaná např. v [24].

Heuristické metody se stejně jako empirické metody provádějí na již funkčních soustavách. Jedná se v podstatě o experimentování, při kterém se konstanty regulátoru odhadnou. Následně se s těmito konstantami nechá proběhnout regulační děj. Na základě průběhu regulačního děje se pak konstanty upraví a opět se nechá proběhnout regulační děj. Toto se opakuje, dokud není průběh regulačního děje uspokojivý.

Tento způsob syntézy je možné použít tam, kde nehrozí nevhodným nastavením regulátoru poškození akčních členů nebo regulované soustavy. Alternativou k experimentování na reálné soustavě je experimentování s matematickým modelem, pokud je model znám.

### 5.7.1 Model regulace

Matematické modely hlavních prvků regulační smyčky jsou popsány v 5.2-5.4. Za účelem ladění regulátorů byl vytvořen matematický model regulace v prostředí *MATLAB-Simulink*. Simulační parametry motoru byly částečně převzaty z [14], v této práci byl totiž používán stejný motor.

<sup>5</sup> Toto omezení je dáno jmenovitým proudem motoru.

Tab. 5-1 Parametry matematického modelu pohonu

$R_a$	3,67 $\Omega$
$L_a$ <sup>6</sup>	91,2 mH
$J$	$0,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ [14]
$k_b$	0,075 V $\cdot$ s [14]
$U_M$	24 V
$\tau_{PM}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$ s
$\tau_{RC}$	0,00705 s

Protože výstupní informací modelu o rychlosti otáčení motoru je úhlová rychlost  $\Omega$ , bude prováděn přepoččet na otáčky za minutu pomocí předpisu

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \Omega. \quad (27)$$

Dále není vhodné zanedbat časové zpoždění způsobené RC filtrem v měřicím řetězci proudu. RC filtr je v matematickém modelu reprezentován svým přenosem

$$G_{RC}(s) = \frac{1}{1 + \tau_{RC} \cdot s}, \quad (28)$$

kde  $\tau_{RC}$  je časová konstanta RC obvodu a platí

$$\tau_{RC}(s) = R_{RC} \cdot C_{RC}. \quad (29)$$

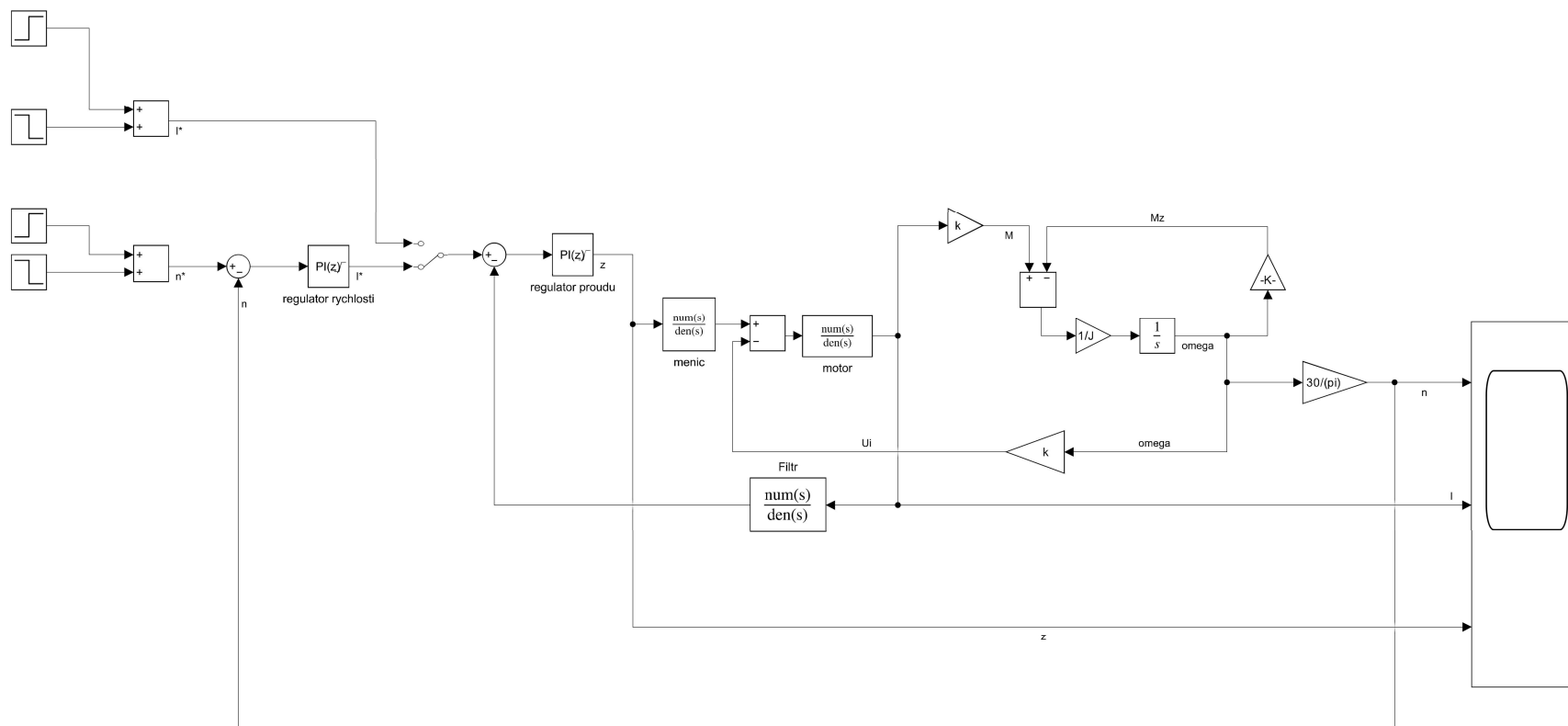
Realizovaný model je na obr. 5-7. Pomocí tohoto modelu byly pomocí rozšíření *Simulink PID Tuner* určeny konstanty regulátorů. Oba regulátory jsou realizovány jako PI, resp. PS regulátory. Tomu odpovídají i v modelu použité bloky, které jsou nastavené jako diskrétní PI regulátory s příslušnou vzorkovací frekvencí. Konstanty jsou uvedeny v tab. 5-2

Tab. 5-2 Konstanty regulátorů

	$K_P$	$T_I$
Regulátor proudu	0,0222665 $A^{-1}$	0,39684 A $\cdot$ s
Regulátor rychlosti	0,005 A $\cdot$ min	657,895 $A^{-1}$

Konstanty regulátoru rychlosti uvedené v tabulce ovšem neodpovídají těm, co byly určeny pomocí matematického modelu. Při ověřování funkce regulátoru byly totiž tyto konstanty upraveny, což je dále popsáno v kapitole 6.

<sup>6</sup> Parametry  $R_a$  a  $L_a$  zahrnují zároveň odpor, resp. indukčnost vyhlazovací tlumivky.



Obr. 5-7 Matematický model regulace v prostředí MATLAB-Simulink



## KAPITOLA 6: OVĚŘENÍ FUNKCE

Za účelem nastavování požadovaných hodnot regulovaných veličin byla za pomoci *GUI Composeru* vytvořena aplikace uživatelského rozhraní, která umožňuje v reálném čase upravovat požadované hodnoty a zobrazovat hodnoty měřených veličin. Toto uživatelské rozhraní je zobrazeno na obr. 6-8.

První tři karty slouží k ovládání měniče. Pokud měnič předává informaci o chybovém stavu, svítí kontrolka na kartě „*měnič CHYBA*“, tento stav je třeba kvitovat pomocí přepínače „*měnič reset*“, sepnutím a opětovným rozepnutím tohoto přepínače dojde k vymazání chybového stavu. Pomocí karty přepínače na kartě „*STOP/START*“ dochází k centrálnímu povolení měniče. Je-li tento přepínač v poloze 0, tranzistory měniče nespínají, nehledě na řídicí PWM signál.

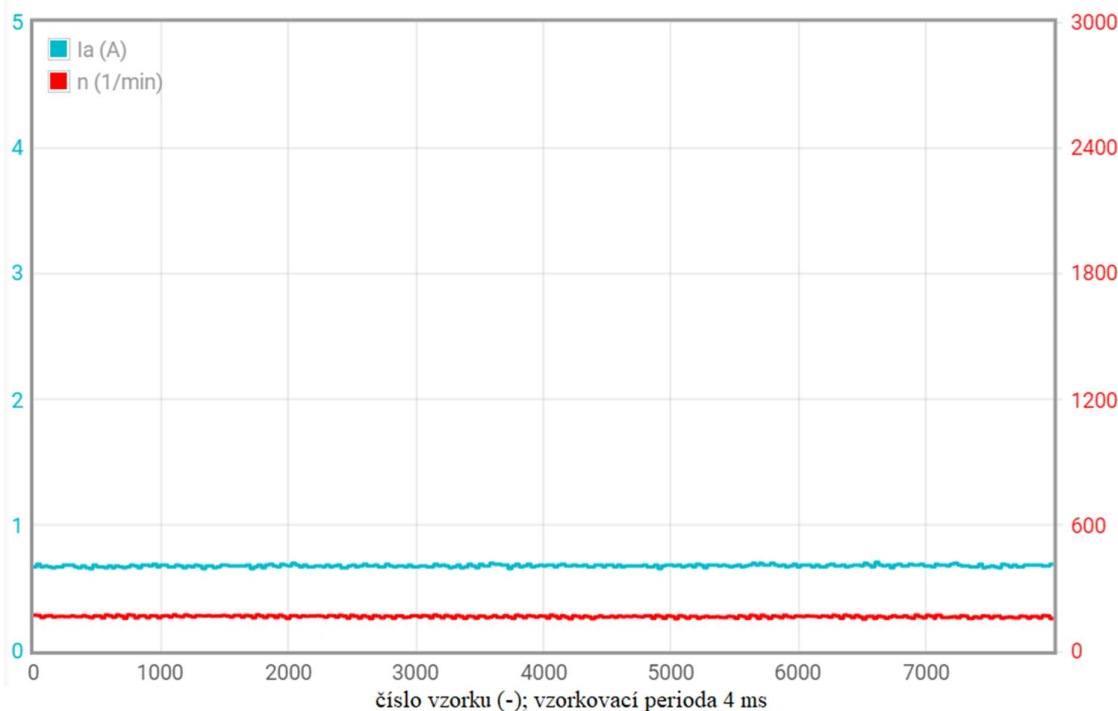
Toto rozhraní umožňuje pracovat ve třech režimech. První režim je nazván manuální ovládání. V tomto režimu je pomocí karty „*požadovaný zatěžovatel*“ přímo nastavována hodnota zatěžovatele pro měnič, pohon je tedy pouze ovládán.

Po přepnutí přepínače do módu regulace je pomocí druhého přepínače možné volit mezi regulátorem proudu a regulátorem otáček. V těchto módech je motor regulován pomocí algoritmů popsaných výše tak, aby byla dosažena požadovaná hodnota proudu nebo rychlosti dle toho, který regulátor je zvolen.

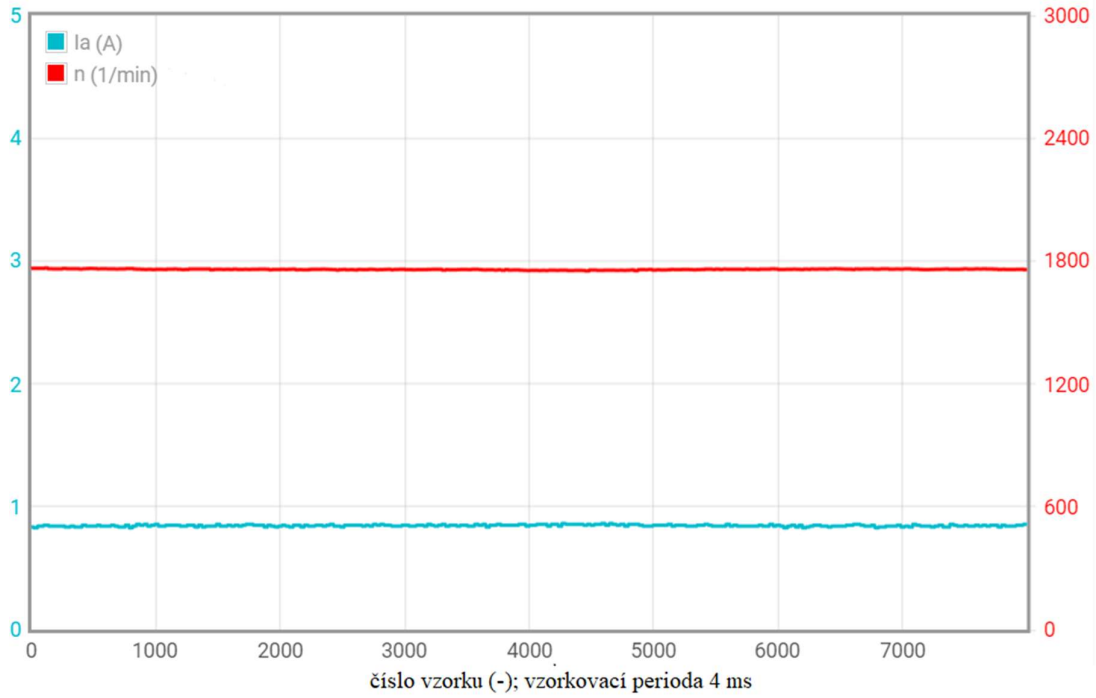
Požadované hodnoty zatěžovatele, proudu i rychlosti je možno nastavit pouze na hodnoty v rozsahu omezeném maximálními přípustnými hodnotami těchto veličin.

K získání informací o měřených, potažmo regulovaných veličinách slouží dva ukazatele, na nichž je zobrazena aktuální hodnota proudu a rychlosti, a také graf, do kterého jsou tyto dvě veličiny zapisovány. Vodorovná osa tohoto grafu je označena pořadovými čísly vzorku. Vzorkovací perioda je 4 ms.

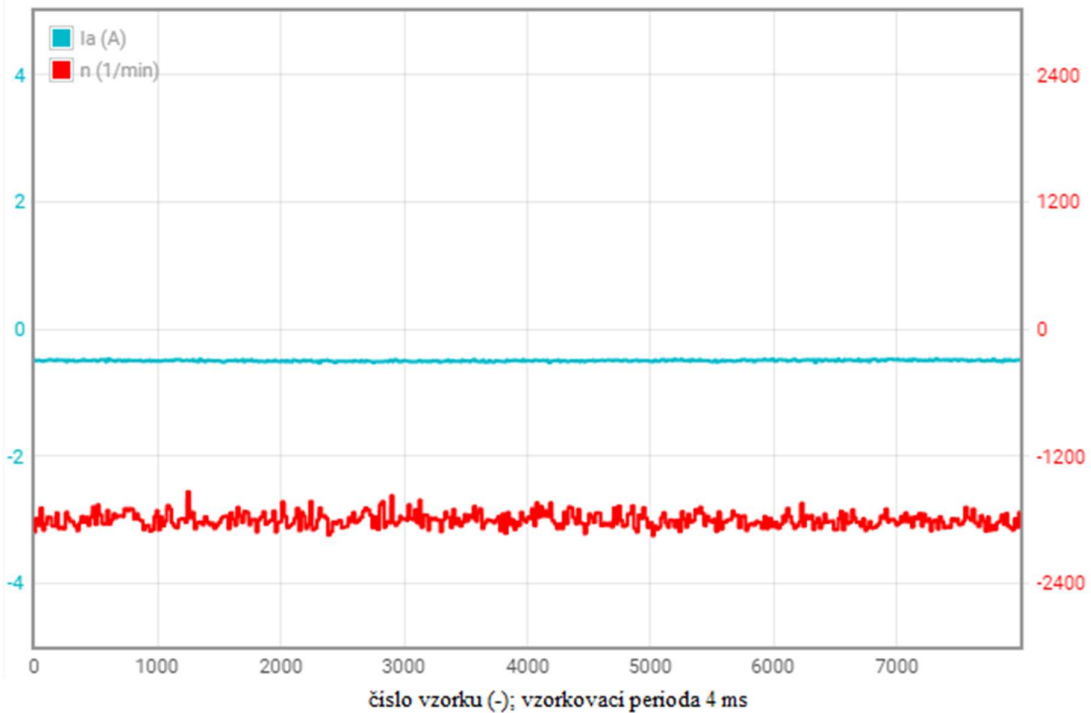
Na hotovém pohonu bylo provedeno několik měření, jejichž cílem bylo ověřit vlastnosti motoru a funkčnost regulace.



Obr. 6-1 Běh motoru v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem 0,21



Obr. 6-2 Běh motoru naprázdno v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem 0,63



Obr. 6-3 Běh motoru naprázdno v režimu manuální ovládání se zatěžovatelem -0,63

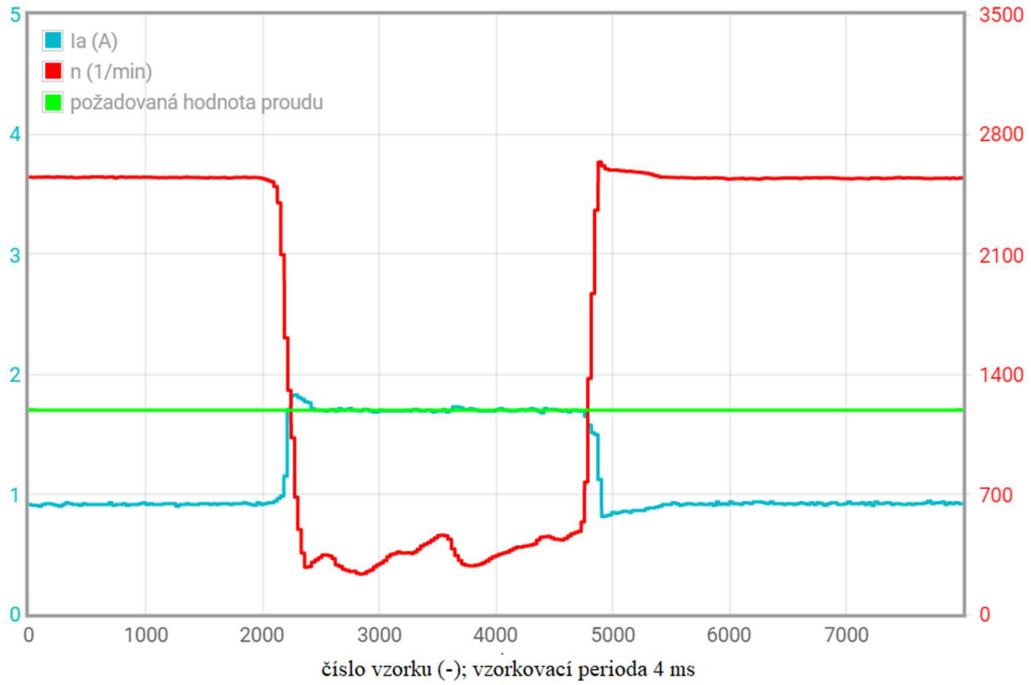
Na obr. 6-1 a obr. 6-2 jsou zobrazeny průběhy naměřené v režimu manuálního ovládání se dvěma různými hodnotami zatěžovatele v kladné polaritě rychlosti. Pro porovnání je na obr. 6-3 zachycen průběh se zápornou hodnotou zatěžovatele. Je patrné, že při záporné hodnotě

zatěžovatele vykazuje motor výrazně větší zvlnění okamžité rychlosti, což bylo také hlavní příčinou zavedení průměrování popsaného v 5.6.2. Možnou příčinou tohoto jevu může být způsob navinutí motoru, důsledkem čehož by indukované protinapětí mohlo vykazovat značné zvlnění. Další možnou příčinou tohoto jevu je nedokonalý způsob uložení hřídele motoru. Ten totiž může mít vliv na moment ztrát a způsobovat jeho kolísání. Jelikož na obr. 6-3 není patrné kolísání proudu, podle rovnice (8) je hnací moment motoru konstantní. Podle rovnice (2) kolísající moment ztrát, který při nezatížené hřídeli představuje zátěžný moment  $M_z$ , způsobí při konstantním hnacím momentu  $M$  kolísání úhlové rychlosti  $\Omega$ , resp. rychlosti  $n$ .

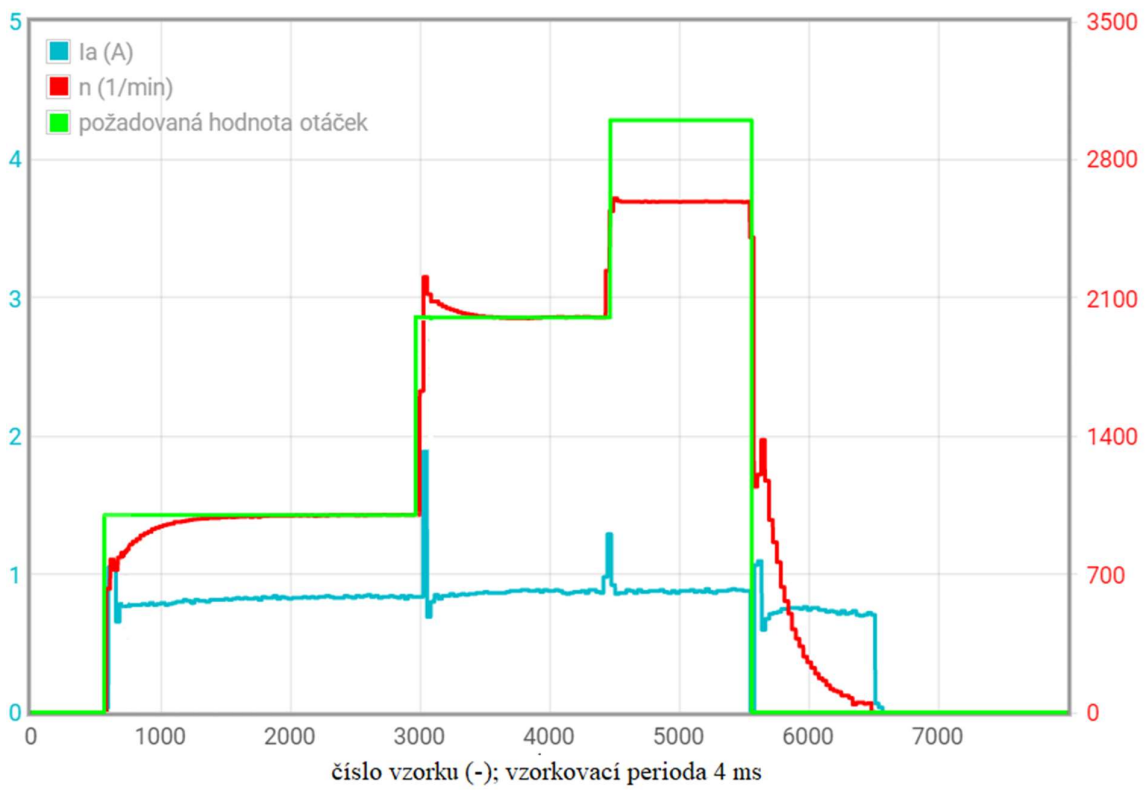
Na obr. 6-4 je pohon v režimu regulace proudu s konstantní požadovanou hodnotou proudu 1,7 A. V době, kdy běží motor naprázdno, se vlivem protinapětí proud drží pod hodnotou 1 A. Ve chvíli, kdy je hřídel motoru zatížena, regulátor proudu udržuje hodnotu proudu na požadované hodnotě. Po uvolnění hřídele proud vlivem protinapětí opět klesá pod hodnotu 1 A.

Na obr. 6-5 a obr. 6-6 je zobrazeno chování motoru při skokových změnách požadovaných hodnot regulátoru rychlosti. Konstanty regulátoru rychlosti bylo při ověřování funkce zapotřebí upravit. Důvodem této úpravy je výše popsaný jev zvlnění průběhu rychlosti v jedné polaritě. Pokud by byly konstanty voleny s vyšším důrazem na dynamiku a nižším důrazem na robustnost regulačního děje, vedlo to v této polaritě k nestabilitě regulátoru. Regulační děje regulátoru rychlosti jsou tedy relativně pomalé. Nižší dynamika je patrná i na obr. 6-7, na kterém zachycena reakce regulátoru rychlosti na skovou změnu zátěžného momentu hřídele. Po ustálení je ovšem patrné, že regulátor rychlosti je funkční i pokud motor nepracuje pouze naprázdno, což dokazuje jeho schopnost reagovat na změny zátěžného momentu.

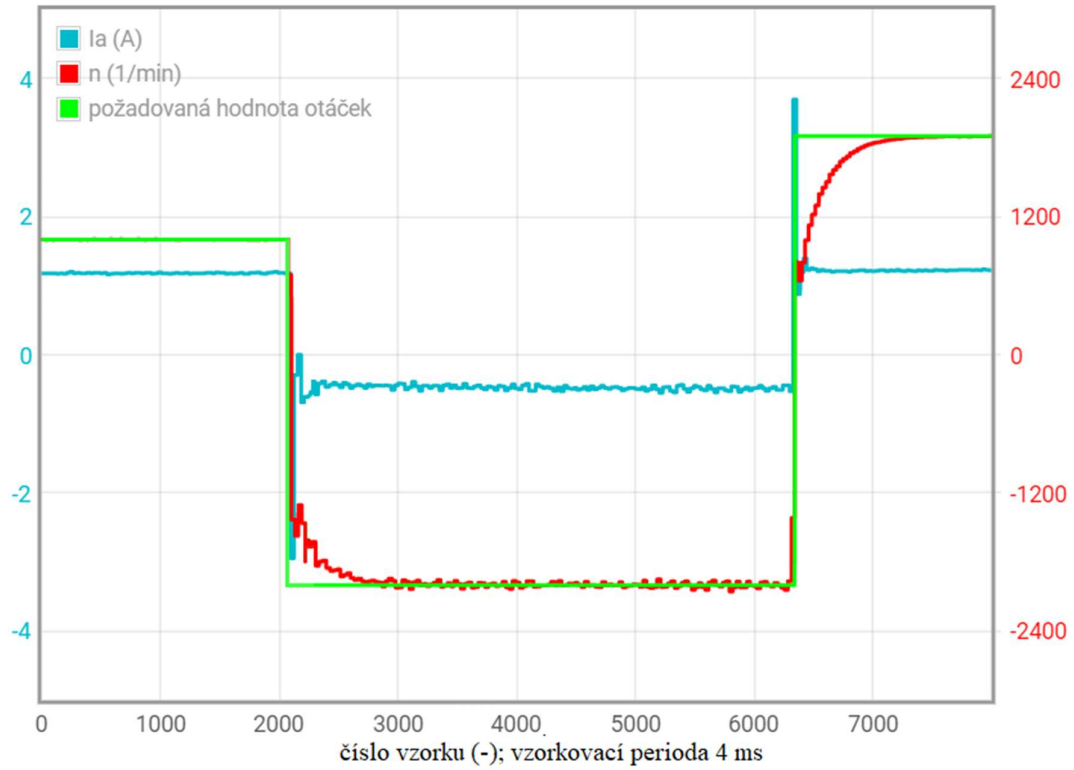
Za povšimnutí stojí také jev na obr. 6-5, kdy se rychlost při požadované hodnotě  $3000 \text{ min}^{-1}$  pohybuje okolo hodnoty  $2600 \text{ min}^{-1}$ . Ačkoliv se jedná pouze  $86,6\%$  jmenovité hodnoty rychlosti motoru, nebyl motor schopen vyšších otáček dosáhnout, a to ani při maximálním zatěžovateli v režimu manuálního ovládaní. Příčinou tohoto jevu může být použitá vyhlazovací tlumivka, na které vzniká napěťový úbytek, a také skutečnost, že měnič by střední hodnoty výstupního napětí 24 V, což je jmenovité napětí motoru a zároveň napájecí napětí měniče, dosahoval pouze v případě, kdy by zatěžovatel byl roven 1. Ten je však v regulátoru limitován na maximální hodnotu 0,84, měnič tedy nedosahuje střední hodnoty výstupního napětí 24 V.



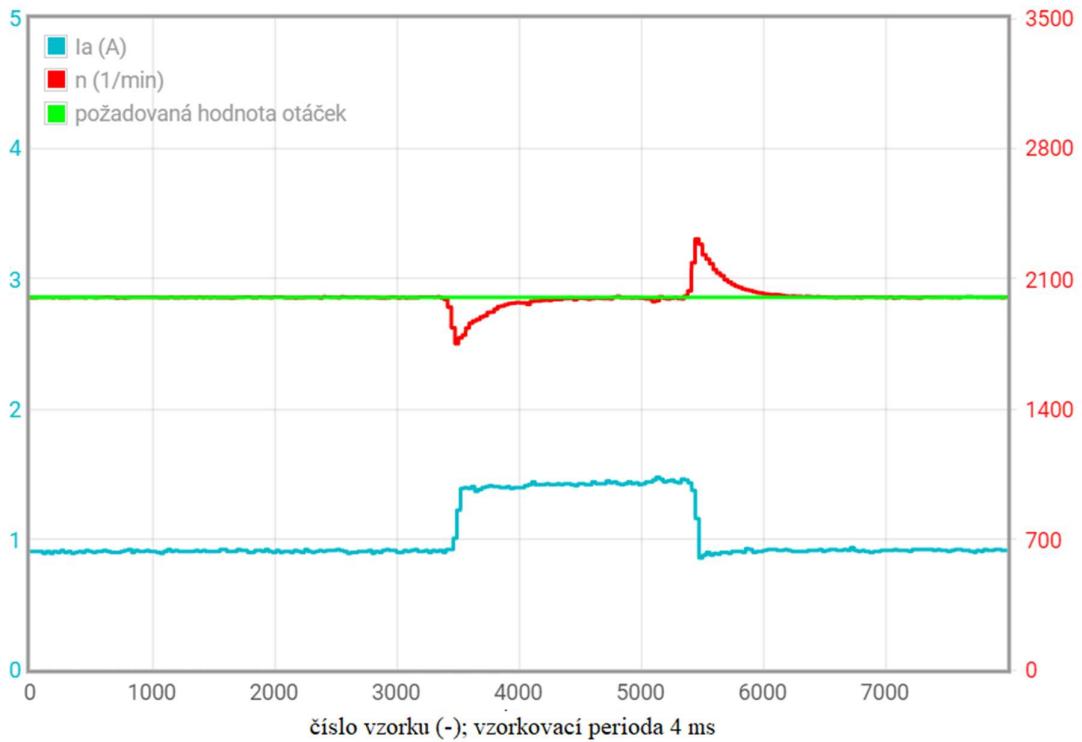
Obr. 6-4 Reakce regulátoru proudu na skokové zatížení a odlehčení hřídele



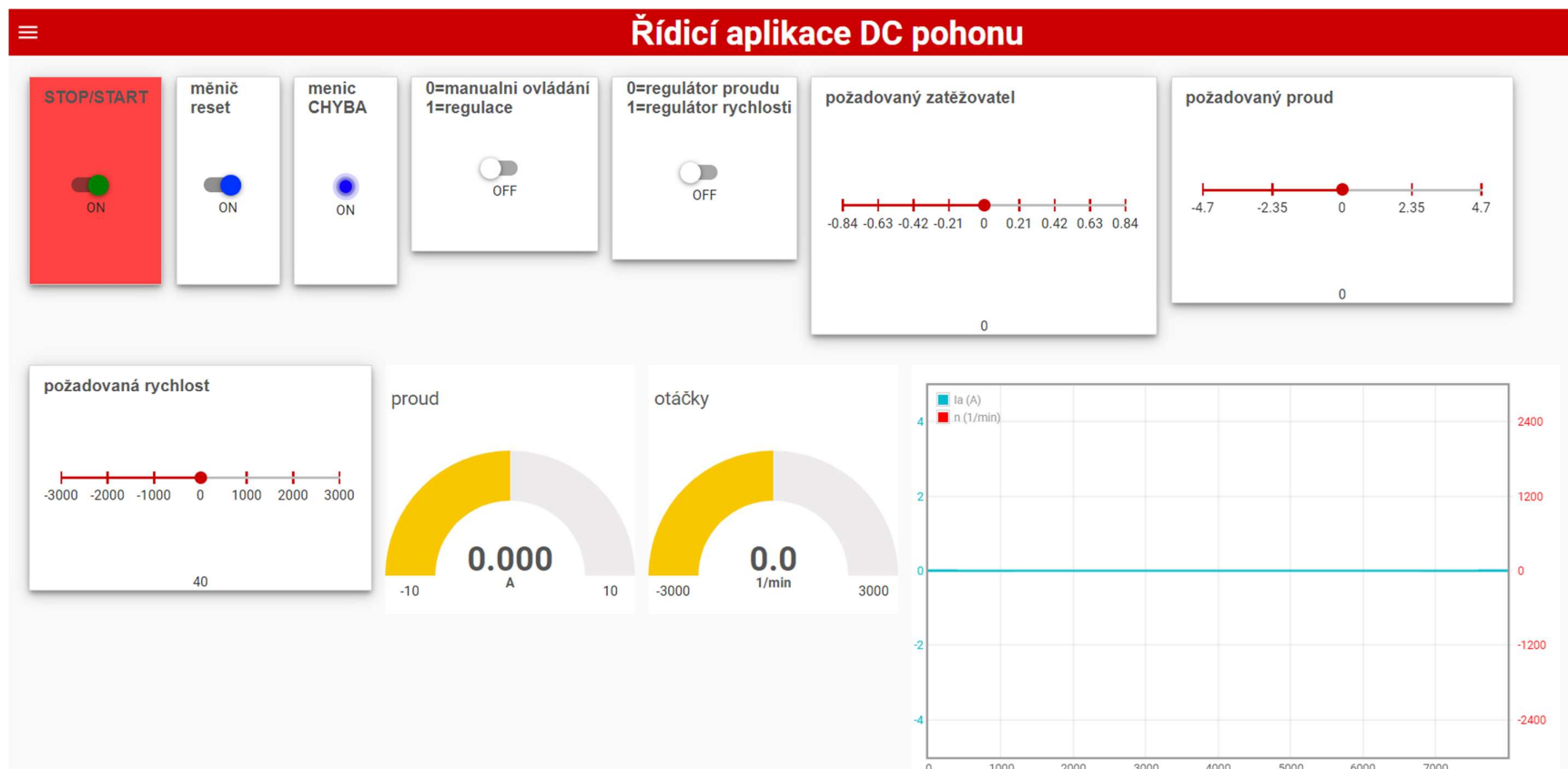
Obr. 6-5 Reakce regulátoru rychlosti na skokové změny požadované hodnoty.



Obr. 6-6 Reakce regulátoru rychlosti na skokovou změnu požadované hodnoty do záporné polarity



Obr. 6-7 Reakce regulátoru rychlosti na skokové zatížení a odlehčení hřídele motoru



Obr. 6-8 Uživatelské rozhraní

## ZÁVĚR

V rámci práce byl realizován elektrický pohon se stejnosměrným motorem a mikrokontrolérem TMS320F28355 jako řídicím systémem. Sestavený pohon umožňuje regulovat buďto proud kotvou motoru, nebo rychlost otáčení hřídele.

Nejdříve byl stručně popsán právě tento mikrokontrolér. Poté byly již podrobněji popsány periferie, které jsou běžně používány v regulaci elektrických pohonů a zároveň byly použity v této práci. Jedná se o systém přerušování tohoto mikrokontroléru a periferie ePWM, eQEP a A/D převodník.

V následující kapitole byl proveden popis jednotlivých prvků H/W, které jsou nezbytné pro realizaci pohonu. Byly vypsány jmenovité hodnoty motoru a měniče. Dále bylo zapotřebí navrhnout desku plošného spoje, která by umožnila propojení měniče a mikrokontroléru, převod signálu od optického čidla rychlosti do podoby vhodné pro mikrokontrolér a měření proudu. Při návrhu desky byly jako první vytipovány vhodné komponenty, které umožňovaly realizovat požadované funkce. Po prostudování datasheetu těchto komponentů byl proveden návrh samotné desky plošného spoje tak, aby byla dodržena všechna výrobcem udávaná doporučení pro tyto komponenty. Výsledkem byl návrh dvouvrstvého plošného spoje. Návrh byl zadán k průmyslové výrobě. Vyrobený plošný spoj byl následně osazen a příslušné komponenty byly ručně zapájeny. Poté byla deska oživena a otestována.

Dále byl popsán proces regulace stejnosměrného pohonu. Popsány byly matematické modely jednotlivých prvků regulační smyčky, diskretizace PID regulátoru a následné odvození přírůstkového tvaru PSD regulátoru. Představeno bylo také opatření proti tzv. unášení integračního členu regulátoru. Následně byly popsány algoritmy proudového a rychlostního regulátoru. Prakticky byly tyto algoritmy pomocí IDE *Code Composer Studio* implementovány do mikrokontroléru. Aplikace byla vytvořena v jazyce C. K zadávání požadovaných hodnot v reálném čase a kontrole měřených veličin bylo ve vývojovém prostředí *GUI Composer* vytvořeno grafické uživatelské rozhraní. Za účelem hledání konstant regulátorů byl sestaven matematický model regulační smyčky v prostředí *MATLAB-Simulink*.

Po sestavení pohonu proběhlo testování funkčnosti regulačních smyček. Během testování byly zaznamenány vhodné průběhy demonstrující práci pohonu. Tyto průběhy jsou společně s komentářem součástí poslední kapitoly této práce.

Během testování byla ověřena funkčnost obou regulátorů, které po ustálení regulačních dějů, je-li to možné, udržují regulovanou veličinu na požadované hodnotě. Sestavený pohon je tak možno prohlásit za funkční.

## LITERATURA

- [1] P. Koblíček a J. Pavelka. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [2] I. Švarc. *Základy automatizace*. Skriptum k předmětu Automatizace a regulace. Vysoké učení technické v Brně, 2002.
- [3] Texas Instruments. *TMS320F2833x, TMS320F2823x Real-Time Microcontrollers* [online]. SPRS439Q. June 2007. Revised August 2022. [vid. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>
- [4] J. Zdeněk. *Systémová struktura počítače*. Podkladový materiál k předmětu „Mikroprocesory pro výkonové systémy“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2022
- [5] O. Lipčák. *Vektorové řízení asynchronního motoru pomocí DSP*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce
- [6] Texas Instruments. *TMS320x2833x, 2823x Technical Reference manual* [online]. SPRUI07. March 2020. [vid. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprui07/sprui07.pdf>
- [7] J. Zdeněk. *Speciální obvody a jejich programování v „C“, 2. díl*. Verze 1.40. Podkladový materiál k předmětu „Mikroprocesory pro výkonové systémy“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2022
- [8] J. Zdeněk. *Speciální obvody a jejich programování v „C“, 1. díl*. Verze 1.50. Podkladový materiál k předmětu „Mikroprocesory pro výkonové systémy“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2022
- [9] J. Zdeněk. *Speciální obvody a jejich programování v „C“, 3. díl*. Verze 1.50. Podkladový materiál k předmětu „Mikroprocesory pro výkonové systémy“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2022
- [10] Texas Instruments. *Code Composer Studio User's Guide* [online]. 2020. [vid. 2023-2-02]. Dostupné z: [https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/users\\_guide/index.html](https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/users_guide/index.html)
- [11] *TI cloud agent* [online]. Texas Instruments. May 2022. [vid. 2023-2-03]. Dostupné z: [https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/ti\\_cloud\\_agent.html](https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/ti_cloud_agent.html)
- [12] *C2000WARE* [online]. Texas Instruments. Oct 2022. [vid. 2023-2-03]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/C2000WARE>
- [13] P. Voženílek, V. Novotný a P. Mindl. *Elektromechanické měniče*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-.
- [14] D. Justiz. *Regulace pohonu se stejnosměrným motorem*. Praha, 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce
- [15] Texas Instruments. *TMCS1108 3% Functional Isolation Hall-Effect Current Sensor With ±100-V Working Voltage* [online]. SBOSA36A. January 2021. Revised July 2021. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmcs1108.pdf>
- [16] AMPHENOL. *Amphenol-fci-quickie-connectors* [online]. CUL E66906. January 2021. Revised July 2021. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmcs1108.pdf>
- [17] MOLEX. *0702462002\_PCB\_HEADERS-172437* [online]. March 2022. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/276/1/0702462002\\_PCB\\_HEADERS-172437.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/276/1/0702462002_PCB_HEADERS-172437.pdf)
- [18] TRACO POWER. *DC/DC Converter TBA 1 Series, 1 Watt* [online]. September 2022. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/687/tba1\\_datasheet-3049532.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/687/tba1_datasheet-3049532.pdf)
- [19] Texas Instruments. *SNx4HC14 Hex Inverters with Schmitt-Trigger Inputs* [online]. SCLS085K. December 1982. Revised June 2021. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54hc14-sp.pdf>
- [20] Texas Instruments. *ISO733x Robust EMC, Low Power, Triple-Channel Digital Isolators* [online]. SLLSEK9B. January 2015. Revised April 2015. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7331fc.pdf>



- [21] V. Záhlava. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
- [22] Texas Instruments. *C2000™ DIMM100 Experimenter's Kit Overview*. [online]. SPRUFR5I. June 2008. Revised October 2019. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprufr5i/sprufr5i.pdf?ts=1679404229633>
- [23] Texas Instruments. *TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs)* [online]. SPRS439N. June 2007. Revised October 2016. [vid. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/405/tms320f28234-487597.pdf>
- [24] J. Balátě. *Automatické řízení*, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN: 80-730-0020-2.
- [25] B. Douglas. *Understanding PID Control, Part 2: Anti-Windup for PID control* [video]. Understanding PID Control [online]. MathWorks. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/videos/understanding-pid-control-part-2-expanding-beyond-a-simple-integral-1528310418260.html>

## PŘÍLOHA A: NOMENKLATURA

### A.1 Obecné značení

$x, x(t)$	okamžitá hodnota
$X(s)$	obraz v operátorovém prostoru
$x(k)$	diskrétní veličina v čase $kT$
$y$	regulovaná veličina
$y^*$	žádaná hodnota regulované veličiny
$u$	akční veličina
$e$	regulační odchylka
$T_D$	derivační časová konstanta regulátoru
$T_I$	integrační časová konstanta regulátoru
$K_P$	proporcionální konstanta regulátoru

### A.2 Seznam veličin a konstant

$C_{RC}$ (F)	kapacita filtru typu DP
$G_{PID}$ (–)	operátorový přenos PID regulátoru
$G_{pm}$ (–)	operátorový přenos polovodičového měniče
$I_{max}$ (A)	maximální elektrický proud
$L_a$ (H)	indukčnost kotevního obvodu
$L_b$ (H)	indukčnost budicího obvodu
$M_Z$ (N · m)	zátěžný moment
$P_{max}$ (W)	maximální výkon
$R_a$ (Ω)	elektrický odpor kotevního obvodu
$R_b$ (Ω)	odpor budicího obvodu
$R_{RC}$ (Ω)	elektrický odpor filtru typu DP
$T_{vz}$ (s)	vzorkovací perioda
$U_2$ (V)	výstupní napětí polovodičového měniče
$U_M$ (V)	vstupní napětí polovodičového měniče
$i_a$ (A)	kotevní proud
$i_b$ (A)	budicí proud
$k_b$ (V · s)	konstanta reprezentující buzení motoru s permanentními magnety
$u_a$ (V)	napětí zdroje připojeného ke kotevnímu obvodu
$u_b$ (V)	napětí zdroje připojeného k budicímu obvodu
$u_i$ (V)	napětí indukované do kotvy motoru
$\Phi_b$ (Wb)	magnetický tok buzení
$\tau_{pm}$ (s)	náhradní časová konstanta polovodičového měniče
$\tau_{RC}$ (s)	časová konstanta RC filtru
$M$ (N · m)	elektromechanický moment motoru
$P$ (W)	výkon
$U$ (V)	elektrické napětí
$k$ (–)	konstrukční konstanta motoru
$n$ (min <sup>-1</sup> )	rychlost otáčení hřídele motoru (otáčky)
$t$ (s)	čas
$\Omega$ (s <sup>-1</sup> )	mechanická úhlová rychlost

### A.3 Seznam zkratk

A/D	analogově digitální
CAN	Oblast sítě řídicích obvodů ( <i>Controller Area Network</i> )
DC	stejnsměrný proud ( <i>Direct Current</i> )
DPS	deska plošného spoje

DSP	digitální signálový procesor
FPU	jednotka pro operace s plovoucí řádovou čárkou ( <i>Floating Point Unit</i> )
GPIO	obecný vstupní/výstupní port ( <i>General-Purpose Input/Output</i> )
GUI	grafické uživatelské rozhraní ( <i>Graphical User Interface</i> )
HASL	žárové nanesení pájky ( <i>Hot Air Solder Leveling</i> )
IDE	vývojové prostředí ( <i>Integrated Development Environment</i> )
IO	integrováný obvod
JTAG	system pro připojení se k zařízení a jeho testování ( <i>Join Test Action Group</i> )
McBSP	Vícekanálový vyrovnávací sériový port ( <i>Multichannel Buffered Serial Port</i> )
PID	proporcionální-integrační-derivační
PWM	pulzní šířková modulace
QEP	kvadrurní pulzní enkodér ( <i>Quadrature Encoder Pulse</i> )
ROM	paměť umožňující pouze čtení ( <i>Read Only Memory</i> )
SARAM	paměť s jedním náhodným přístupem ( <i>Single Access Random Access Memory</i> )
SPI	Sériové periferní rozhraní ( <i>Serial Peripheral Interface</i> )
TI	Texas Instruments
UART	Univerzální asynchronní vysílač/přijímač ( <i>Universal Asynchronous Re-ceiver/Transmitter</i> )
USB	univerzální sériová sběrnice ( <i>Universal Serial Bus</i> )
VDC	volty stejnosměrné

## PŘÍLOHA B: OBSAH ELEKTRONICKY PŘILOŽENÝCH SOUBORŮ

Všechny elektronické přílohy jsou organizovány do jednoho .zip souboru s názvem „přílohy\_bakalarske\_prace“. Obsahem souboru jsou adresáře:

- **aplikace\_pro\_mikrokontroler:** *Code Composer Studio* projekt s komentovaným zdrojovým kódem v jazyce C pro regulační aplikaci,
- **deska\_plosneho\_spoje:** soubory pro program *Fusion 360* obsahující elektrické schéma zapojení pro DPS a návrh DPS,
- **matematicky\_model:** soubory pro prostředí *MATLAB – Simulink* obsahující matematický model regulační smyčky,
- **uzivatelske\_rozhrani:** adresář obsahující uživatelské rozhraní.