bakalářská práce

# Úprava instrumentace pro magnetickou platformu Magman

*Filip Richter*

Duben 2014

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Filip Richter**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Úprava instrumentace pro magnetickou platformu Magman**

Pokyny pro vypracování:

1. Na nové komunikacní desce "Sentinel" ozivte a otestujte jednotlivé funkcní bloky: napájení pro galvanické oddelení, merení polohy pomocí dotykové fólie a smerování komunikace pres sériové linky.
2. K platforme navrhnete systém pro odhadování teploty cívek, nouzové vypnutí cívek a vizuální indikaci proudu tekoucího jednotlivymi cívkami.
3. Otestujte rízení proudu na stávajících modulech (merení proudu, mód spínání H-mustku, obracení polarity) a implementujte zpetnovazební regulaci proudu.
4. Upravte stávající firmware, aby fungoval na nové rídicí desce.
5. Dokoncete rozpracovany bootloader, otestujte ho a nasadte jej na modulech magnetické platformy.

Seznam odborné literatury:

[1] H-bridge secrets. [Online]. Dostupné z: http://modularcircuits.tantosonline.com/blog/articles/h-bridge-secrets/
[2] Slow, Mixed and Fast Decay Modes. Why Do We Need To Complicate Things? [Online]. Dostupné z: http://ebldc.com/?p=86.
[3] Current recirculation and decay modes. TI. [Online]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/an/slva321/slva321.pdf.
[4] Finn G., New Touch-Screen Controllers Offer Robust Sensing for Portable Displays, Analog Dialogue, Vol. 44, February 2010. [Online]. Dostupné z: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/44-02/touch_screen.html
[5] Low-Voltage I/O TOUCH SCREEN CONTROLLER. [Online]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tsc2046.pdf

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 2. 2014

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Zemánkovi za cenné rady a mnoho trpělivosti. Dále bych chtěl poděkovat i zbytku týmu AA4CC za jejich návrhy a náměty. V neposlední řadě chci také poděkovat svým rodičům za podporu při studiu a hlavně při psaní této práce.

## 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 23. 05. 2014

Podpis

## Abstrakt

Tato práce se věnuje jednotlivým úpravám a rozšířením na instrumentaci platformy MagMan. Popisuje rozdíly mezi dvěma verzemi hardwaru platformy a provedené kroky s cílem vytvořit firmware, který může být provozován na obou verzích. Druhá část se věnuje jednotlivým rozšířením platformy. Jmenovitě jde o problematiku měření a regulace proudu, odhad teploty cívek a zprovoznění komunikační desky Sentinel. Práce porovnává různé metody řešení jednotlivých částí a popisuje jejich výslednou implementaci.

## Abstract

This thesis is devoted to individual adaptation and extension of the instrumentation of the platform MagMan. It describes the differences between two versions of the platform hardware and steps taken to create a firmware that can be run on both versions. The second part focuses on the platform extension. Namely, the issue of measurement and feedback control of current, estimation of coil temperature and getting the communication board Sentinel into operation. Thesis compares different methods of solution of individual parts and describes their final implementation.

# Obsah

**1. Úvod** **1**
1.1. Platforma MagMan . . . . . 1

**2. Firmwaru modulů** **4**
2.1. Struktura firmwaru . . . . . 4
2.2. Bootloader . . . . . 7

**3. Měření proudu** **8**
3.1. Spínání H-můstků . . . . . 8
3.2. Hardwarové řešení . . . . . 9
3.3. Možné řešení zkreslení proudu . . . . . 11
3.4. Implementace v procesoru . . . . . 14

**4. Zpětnovazební regulace proudu** **16**

**5. Odhad teploty cívky** **18**
5.1. Teplotní senzory . . . . . 18
5.2. Model systému . . . . . 19
5.3. Měření odporu cívky . . . . . 21

**6. Komunikační deska Sentinel** **24**
6.1. Komunikační výhybka . . . . . 24
6.2. Galvanické oddělení komunikace . . . . . 27
6.3. Měření polohy . . . . . 27
6.4. Indikační modul . . . . . 31
6.5. Nouzové vypnutí . . . . . 32

**7. Závěr** **34**

**Přílohy**

**Literatura** **35**

**A. Navržené úpravy HW** **36**

**B. ElvisV2** **37**

**C. Obsah přiloženého CD** **41**

## Zkratky

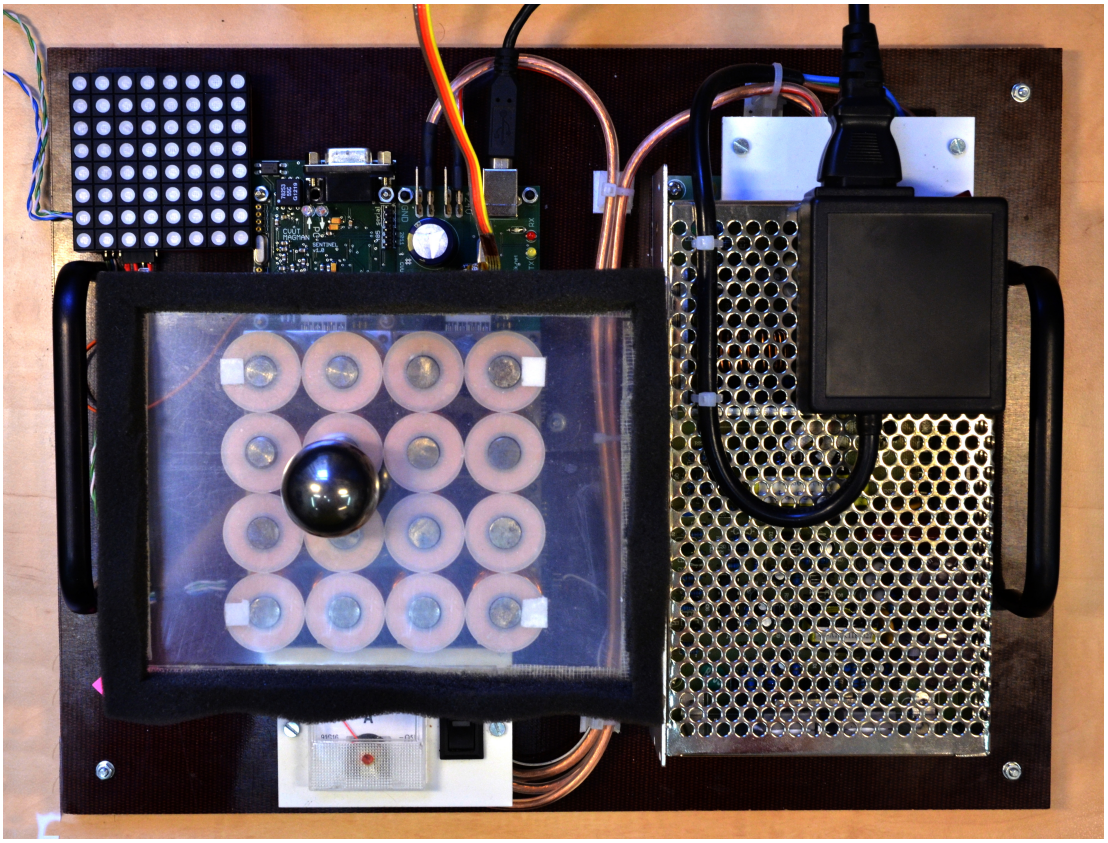
| | |
|---|---|
| MagMan | Magnetický manipulátor |
| RS485 | Komunikační sběrnice standardu EIA-485 |
| RS232 | Komunikační sběrnice standardu EIA-232 |
| I2C | Komunikační sběrnice I2C |
| A/D | Převodník mezi analogovou a digitální hodnotou |
| CRC16 | Kontrolní součet 16-bit (angl. Cyclic redundancy check) |
| LED | Světlo emitující dioda (angl. Light emitting diode) |
| PWM | Pulzně šířková modulace (angl. Pulse width modulation) |
| DIR | Směr (angl. Direction) |
| MODE | Režim (angl. Mode) |
| RAM | Paměť s přímým přístupem (angl. Random-access memory) |
| Pull-up | Rezistor nastavující klidovou úroveň signálu na logckou jedničku |
| Pull-down | Rezistor nastavující klidovou úroveň signálu na logckou nulu |
| DMA | Blok přímého přístupu do paměti (angl. Direct memory acess) |
| FIFO | Paměť typu fronta (angl. First in first out) |
| UART | Blok sériové linky (angl. Universal asynchronous reciever transmiter) |

# 1. Úvod

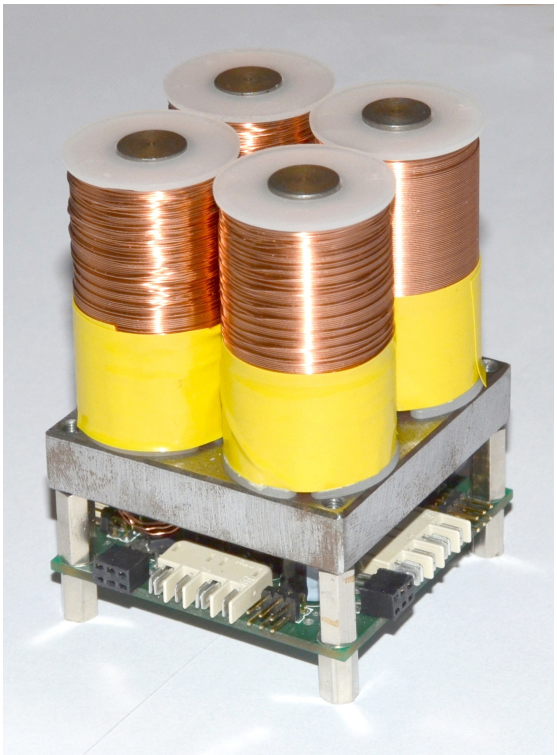
Cílem této práce bylo implementovat nové funkce a rozšířit nebo upravit některé stávající funkce platformy MagMan (Magnetický manipulátor). Platforma měla ve výchozím stavu implementovány pouze základní povely a příkazy (nastavení jednotlivých cívek, nastavení celého modulu) i když hardware je připraven na řadu dalších rozšíření. Součástí této práce bylo také oživení upravené verze modulu a provedení úpravy firmwaru tak, aby byl univerzální pro obě verze. Vzhledem k dlouhodobému plánu se práce zabývá také návrhem možných hardwarových úprav. Výchozím stavem pro tuto práci je osazená platforma bez bootloaderu, připravený bootloader a vzor programu pro práci s ním, dále také nová komunikační deska Sentinel bez programu. Pro testování firmwarů je dostupný testovací modul jak původní verze (označované jako verze 2), tak i nové verze (verze 3).

## 1.1. Platforma MagMan

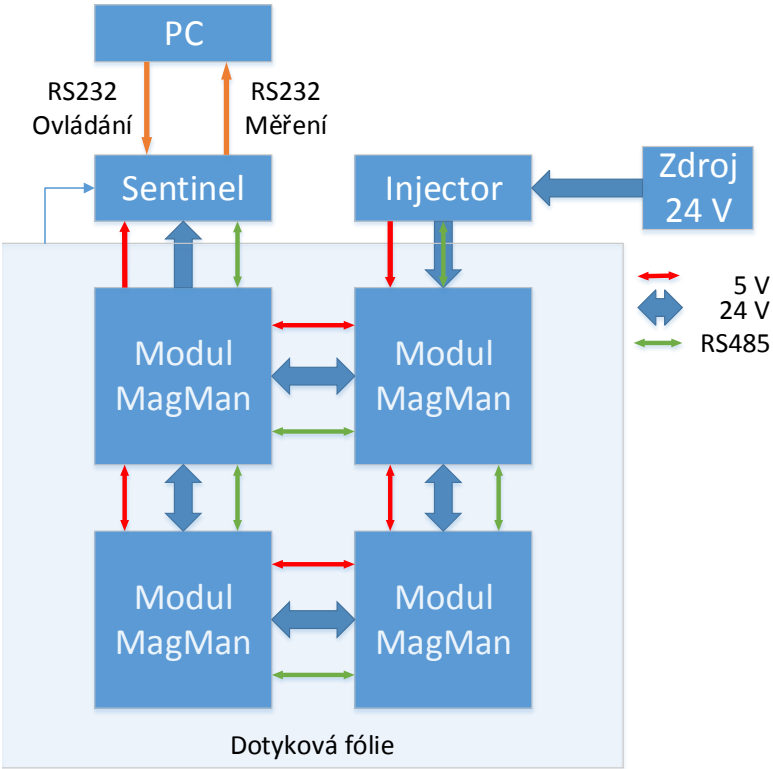
Platforma MagMan (Obr. 1) je laboratorní zařízení, které slouží pro experimentální testování centralizovaných i distribuovaných algoritmů řízení manipulace pomocí fyzikál-



**Obrázek 1.** Platforma MagMan.



**Obrázek 2.** Modul platformy MagMan.




**Obrázek 3.** Výsledná struktura platformy MagMan.

ních polí. Cílem je v tomto případě pohybovat kovovou kuličkou po povrchu platformy za pomoci sady cívek. Platforma se skládá z modulů (Obr. 2), z nichž každý obsahuje čtyři cívky. Jednotlivé cívky obsahují jádra, která jsou uchycena do nosné části modulů. Pod touto nosnou částí je umístěna řídící elektronika. Modul obsahuje na všech čtyřech stranách sadu středově symetricky rozložených konektorů, kterými je spojen se sousedními moduly. Je tak možné platformu jednoduše přestavět do jiného tvaru. Aktuální verze je sestavena ze čtyř modulů sestavených do tvaru čtverce a výsledkem je čtvercová matice cívek o hraně 4 cívky (Obr. 1).

Každý modul obsahuje desku plošných spojů, na které je elektronika pro řízení cívek. Řídící část je založena na procesoru LPC 1313 od firmy NXP. Tento procesor se stará o měření a regulaci proudu pomocí připojených H-můstků. Proud je regulován pomocí modulace PWM, jejíž střída je nastavována podle povelů z řídícího systému. S okolním světem modul komunikuje díky sběrnici RS485, která je přivedena do všech stranových konektorů. Ve stranových konektorech je také dostupné napájecí napětí pro řídící (5 V) a také výkonovou část (24 V). Pouhým sesazením modulů k sobě se propojí veškeré potřebné spoje.

Moduly jsou také připraveny na rozšiřování v oblasti připojených periferií. Proto je vyvedena lokální sběrnice I2C, která může sloužit například pro připojení teplotních či jiných senzorů.

Pro komunikaci mezi modulem a řídícím členem je použit proprietární protokol ELVIS [1]. Tento protokol je přímo navržen pro ovládání platformy a její programování. Vzhledem k provozu v prostředí, které je problematické na rušení, obsahuje robustní prvky (vyhrazený symbol pro začátek zprávy, CRC16) pro zajištění konzistence dat. V rámci této práce byl protokol rozšířen o nově implementované povely a dotazy. Nová verze je označována jako ELVIS V2. Všechny původní povely zůstaly kvůli zpětné kompatibilitě nezměněné. Protokol není kompatibilní s nezdokumentovanou verzí protokolu, která byla nasazena na platformě v době začátku této práce. Protokol ELVIS obsahuje příkazy jak pro ovládání modulů, tak pro jejich přeprogramování bootloaderem (popsán v kapitole 2.2). Je tak možné přehrát program na jednotlivých modulech bez nutnosti přístupu k programovacímu konektoru modulu, čímž i bez demontáže celé platformy.

Práce je strukturovaná do kapitol, které popisují jednotlivé úpravy a rozšíření. Následující kapitola se věnuje úpravě firmwaru pro obě verze modulu. Třetí kapitola popisuje návrh a realizaci měření proudu cívkami. Další kapitola je zaměřena na možnost regulace tohoto proudu. Páta kapitola je věnována návrhu metod sloužících jako ochrana proti nežádoucímu přehřátí platformy. Poslední kapitola se zabývá zprovozněním komunikační desky Sentinel včetně indikačního modulu.

# 2. Firmwaru modulů

Firmware modulu zajišťuje obsluhu připojeného hardwaru a také má za úkol reagovat na příchozí příkaz po sběrnici RS485 a provést například úpravu střídy pro jednotlivé cívky. Dále firmware zajišťuje zpětné měření proudu (Kapitola 3), případně dalších veličin pomocí senzorů připojeních přes I2C sběrnici. Firmware musí zajistit, aby se prioritní příkazy (ovládání cívek) provádělo v reálném čase (musí být definovaný maximální čas odezvy). Pokud by se na platformě používalo distribuované řízení, byl by součástí i distribuovaný regulátor.

Původní firmware pochází od autora Petra Svobody. Firmware byl napsán v jazyce C a kompilován pod operačním systémem Linux. Autor v této verzi implementoval základní povely na nastavení střídy jednotlivých cívek a samotný protokol ELVIS v původní verzi.

Jedním z cílů této práce byla úprava firmwaru pro novou verzi desky. Obě verze mají hodně společného, obsahují stejný procesor, stejné H-můstky i měření proudu je realizováno stejně. Pouze je částečně upraveno přiřazení vývodů procesoru jednotlivým periferiím. Deska modulu verze 2 měla signální vodiče vyvedené do stranových konektorů. Tyto vodiče měly sloužit k autonomní detekci okolních modulů platformy a díky tomu měla být možná automatická detekce uspořádání platformy. Ve verzi 3 se už s těmito detekčními spoji nepočítá, volné vývody byly použity pro připojení RGB LED. Moduly verze 2 totiž neměly žádný vizuální signalizační prvek, což se ukázalo jako nevýhoda. Přiřazení vývodů periferiím popisuje Tab. 1. Úprava firmwaru spočívá v použití direktiv preprocesoru, díky nimž se až při kompilaci určí, který hlavičkový soubor (závislý na verzi desky) se použije. Není tak potřeba udržovat dvě nezávislé verze firmwaru. Během tvorby univerzálního firmwaru byla upravena adresářová i programová struktura projektu a také změny umožňující kompilaci na operačním systému Windows.

## 2.1. Struktura firmwaru

### program.c

Soubor *program.c* obsahuje funkci `void main()`, která se skládá z volání inicializace periferií a hlavní smyčky. Dále je zde také obsažena funkce zajišťující zpracování příchozí zprávy podle protokolu ELVIS, která je volána z knihovny *elvis.h*. V případě potřeby (dle protokolu) je pak připravena a zabalena (vypočte se CRC) odpovědní zpráva, která je odeslána po sběrnici. Na některé příkazy se přímo odpoví, pro jiné je třeba volat funkce z některých knihoven, a až poté odpovědět. Detailní popis protokolu a jeho příkazů je v příloze B.

### hardware.h

Hlavičkový soubor *hardware.h* je určen pro připojení ke každé překládané knihovně. Zařizuje připojení jednoho ze souborů (*hw2.h* nebo *hw3.h*), který obsahuje definice pro

**Tabulka 1.** Přiřazení periferií vývodům, tučně jsou zvýrazněny signály, jejichž přiřazení se změnilo.

| Název signálu | Popis | Vývod ve verzi 2 | Vývod ve verzi 3 |
|---|---|---|---|
| **DIR1** | Ovládání směru proudu cívkou 1 | P0[10] | P0[6] |
| **DIR2** | Ovládání směru proudu cívkou 2 | P0[6] | P0[10] |
| **DIR3** | Ovládání směru proudu cívkou 3 | P1[8] | P2[0] |
| DIR4 | Ovládání směru proudu cívkou 4 | P0[2] | P0[2] |
| MODE | Ovládání režimu H-můstků | P0[7] | P0[7] |
| SCL | Signál SCL sběrnice I2C | P0[4] | P0[4] |
| SDA | Signál SDA sběrnice I2C | P0[5] | P0[5] |
| **I1** | Detekce okolních modulů | P2[0] | |
| **I2** | Detekce okolních modulů | P3[2] | |
| **I3** | Detekce okolních modulů | P3[4] | |
| **I4** | Detekce okolních modulů | P3[5] | |
| ISENSE1 | Měření proudu cívkou 1 | P1[10] | P1[10] |
| ISENSE2 | Měření proudu cívkou 2 | P1[0] | P1[0] |
| ISENSE3 | Měření proudu cívkou 3 | P1[3] | P1[3] |
| ISENSE4 | Měření proudu cívkou 4 | P1[1] | P1[1] |
| REF1V24 | Měření referenčního napětí (1,24 V) | P1[2] | P1[2] |
| **PWM1** | PWM signál pro cívku 1 | P1[9] | P0[9] |
| PWM2 | PWM signál pro cívku 2 | P0[8] | P0[8] |
| PWM3 | PWM signál pro cívku 3 | P1[4] | P1[4] |
| PWM4 | PWM signál pro cívku 4 | P0[11] | P0[11] |
| RS485DIR | Ovládání směru směrnice RS485 | P1[5] | P1[5] |
| RS485RXD | Odchozí sériová linka RS485 | P1[6] | P1[6] |
| RS485TXD | Příchozí sériová linka RS485 | P1[7] | P1[7] |
| SLEEP | Ovládání blokování H-můstků | P1[11] | P1[11] |
| **LEDR** | Ovládání LED | | P1[9] |
| **LEDG** | Ovládání LED | | P0[3] |
| **LEDB** | Ovládání LED | | P3[4] |
| **FAULT** | Detekce chyby můstků | | P3[5] |

danou verzi, a také souboru z toolchainu popisujícího registry periferií na procesoru. Obsahuje také definice maker a parametrů, které jsou shodné pro obě verze desky: funkce pro nastavení a vyčítání parametrů pulzně šířkové modulace, změnu režimu H-můstků (režimy H-můstku více popsány v kapitole 3) a možnost úsporného režimu (všechny cívky vypnuty, H-můstky odpojeny).

Nově je zde také funkce, která slouží k synchronizaci nastavení stříd. Díky zvyšujícím se nárokům na frekvenci ovládání modulů již nelze nastavovat střídy asynchronně. Bylo tedy třeba implementovat synchronizační příkaz. Zápis nyní může probíhat v synchronizovaném režimu, kdy se nejdříve do všech modulů pošle příkaz na nastavení hodnot střídy, ale skutečné nastavení se provede až po přijetí synchronizačního příkazu, který se pošle pomocí broadcastu všem modulům zároveň. Detailnější popis s příkladem komunikace je uveden v dokumentaci k protokolu (Příloha B)

### hw2.h a hw3.h

Soubory *hw2.h* a *hw3.h* obsahují definice preprocesoru závislé na verzi desky, které se používají v ostatních částech projektu. Jednu taková definici je uvedena na příkladu, kde je uveden popis připojení signálu MODE k procesoru. Na desce verze 2 je tento signál na portu procesoru P0 bit 7, obdobně ve verzi 3 je na portu P1 bit 8.
*hw2.h*

```
#define MODE_Pin        Pin_7           // Signal MODE -> Pin P0[7]
#define MODE_Port       LPC_GPIO0
```

*hw3.h*

```
#define MODE_Pin        Pin_8           // Signal MODE -> Pin P1[8]
#define MODE_Port       LPC_GPIO1
```

Pokud je pak v nějaké části programu použit příkaz

```
MODE_Port->MASKED_ACCESS[MODE_Pin]=0;
```

dostaneme po průchodu preprocesorem kód v závislosti na verzi udané při kompilaci buď (pro HW=2)

```
LPC_GPIO0->MASKED_ACCESS[(1<<7)]=0;
```

nebo (pro HW=3)

```
LPC_GPIO1->MASKED_ACCESS[(1<<8)]=0;
```

který zajistí, že v dané verzi se hodnota zapíše na odpovídající pin. V ostatních místech firmwaru již pak není třeba rozlišovat, mezi jednotlivými verzemi.

### Složka lib

Složka *lib* obsahuje jednotlivé knihovny, které byly napsány přímo pro firmware modulů, například: implementace protokolu ELVIS, knihovna zajišťující měření proudů a knihovna pro obsluhu sběrnice I2C s rozšířením pro teplotní senzor LM75 použitý v kapitole 5. Bylo snahou vytvořit tyto knihovny pokud možno co nejvíce univerzální pro možné použití na jiném procesoru, ne však na úkor výpočetní rychlosti v kritických místech.

### Složka keil

Tato složka obsahuje základní knihovny pro obsluhu sériové linky, čítačů/časovačů a inicializaci A/D převodníku. Struktura souborů v této složce zůstala nezměněna z původní verze firmwaru. Soubory pocházejí z příkladů vývojového prostředí Keil dostupných pro použitý procesor.

## 2.2. Bootloader

Bootloader je program, který se aktivuje ihned po resetu procesoru a čeká přibližně jednu sekundu na zprávu po komunikační sběrnici. Pokud detekuje zprávu (příkaz), která je určena na jeho adresu (adresa modulu pro protokol ELVIS, která byla udána při instalaci bootloaderu), zpracuje jej a znovu nastaví časovač na 1 sekundu. Pokud zpráva nepřijde, bootloader předá řízení hlavnímu programu, a to tak, že odskočí na adresu 0x1001. Tato adresa odpovídá prvnímu bloku z vnitřní Flash paměti určené pro hlavní program. Těsně před předáním řízení uloží bootloader svojí adresu protokolu ELVIS na určené místo v RAM paměti. Tato adresa se pak načte v hlavním programu a je používána pro komunikaci. Je tak zaručeno, že bootloader i hlavní program na jednom modulu budou mít vždy stejnou adresu.

Bootloader zde popisovaný připravil Viktor Kajml [2]. Tento bootloader umožní nahrávání přes sběrnici RS485 protokolem ElvisV1 [1] a lze tak přehrát firmware v modulech bez nutnosti demontáže platformy. Bootloader však autorem nebyl řádně otestován, a tak zatím nebyl ani nasazen. K bootloaderu byl také připraven vzor programu, který může být přes něj nahráván. Vzhledem k tomu, že se moduly verze 2 a 3 od sebe liší pouze připojením některých periferií, je bootloader pro obě verze stejný.

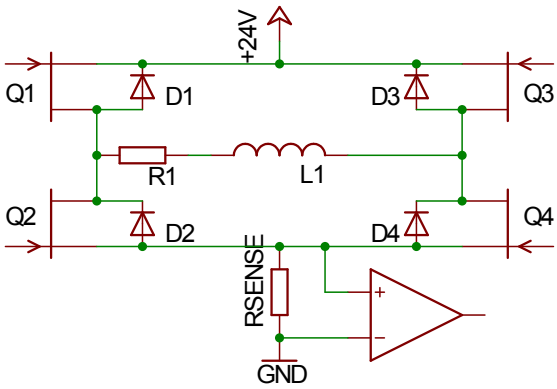
Bootloader byl v rámci této práce otestován a připraven na nasazení. Během testování se ukázalo, že je třeba opravit některé chyby. Jednou z nich bylo, že během programování modulu přes bootloader se aktivovaly všechny cívky plným proudem. Bylo to způsobeno tím, že bootloader neinicializoval vstupně-výstupní porty. Ty jsou před inicializací v režimu vstupu (vysoké impedance) a není tak definována úroveň na ovládacích vstupech H-můstků. Tento problém má obecně dvě řešení: softwarové a hardwarové. Softwarové řešení, tedy inicializace vstupně-výstupních portů v bootloaderu, bylo provedeno, avšak to řeší pouze stavy, kdy v procesoru běží program (tzn. ne v resetu a ne před naprogramováním). Druhou možností je přidání pull-up (popř. pull-down) rezistorů, které nastaví logické úrovně do doby než procesor inicializuje výstupy. V tomto případě šlo o přidání pull-down rezistoru na signál *sleep*. Do inicializace výstupně výstupních portů je tento signál v logické nule a H-můstky jsou tím deaktivovány. Tato oprava je pro ověření funkčnosti provedena na obou testovacích modulech.

# 3. Měření proudu

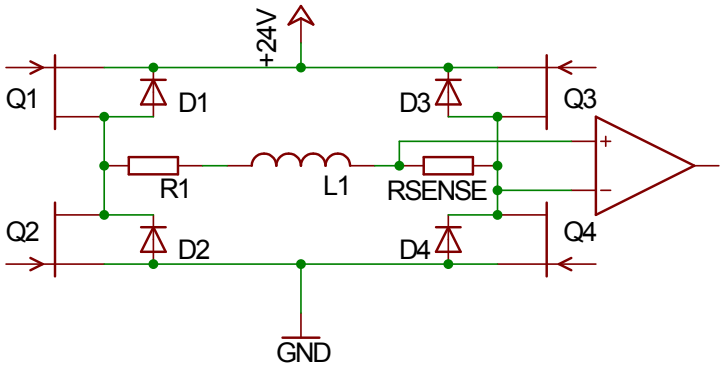
Měření proudu je jeden z dalších úkolů každého z modulů platformy MagMan. Hodnota proudu cívkou je důležitá pro regulátor ve vyšších vrstvách struktury řízení (řízení síly, polohy kuličky, zrychlení kuličky, ...). Modul platformy MagMan je ale napájen z napěťově tvrdého zdroje, takže v případě změny činitele plnění je třeba brát v úvahu přechodový ději. Proto je výhodné proud měřit a mít tak možnost přesněji určit vlastnosti okolního magnetického pole nebo proud regulovat. Aby měření proudu přinášelo užitečnou informaci, je potřeba, aby naměřená hodnota měla dostatečnou obnovovací frekvenci.

## 3.1. Spínání H-můstků

Pro ovládání každé cívky na modulu je použit jeden plný H-můstek. Ten umožňuje řízení proudu připojeným zařízením (v tomto případě cívkou) oběma směry. Skládá se ze čtyř spínacích prvků (Obr. 4), jejichž spínáním lze určit cestu procházejícího proudu. Můstek bývá řízen pulzně šířkovou modulací (PWM), která umožní nastavení požadované střední hodnoty napětí. V aktivní části PWM periody se otevře dvojice protilehlých spí-




**a)** „Low-side“




**b)** Plovoucí měření

**Obrázek 4.** Zapojení H-můstku a obvodu měření proudu pro jednu cívku.

načů (Q1–Q4 nebo Q2–Q3). Výběr dvojice závisí na požadovaném směru procházejícího proudu. V neaktivní části PWM periody se stav různí podle použitého režimu. Vzhledem k tomu, že pro připojenou skutečnou cívku lze použít náhradní zapojení sériové kombinace rezistoru s ideální cívkou (R1 a L1), je třeba uvažovat dynamické parametry. Literatura (např. [3]) zmiňuje tři možné režimy.

1. Fast-decay – V neaktivní části periody PWM se sepnou pouze druhé dva spínače na tak dlouho, než proud klesne na nulu. Proud se tak uzavírá přes zdroj, který je využit pro „brždění“ proudu cívkou. Poté se všechny čtyři spínače rozepnou. Pro nenulovou hodnotu proudu je třeba činitel plnění alespoň 50 %. Rozsah mezi 0 % a 50 % je nevyužit. Sepnutí druhých dvou spínačů může být nahrazeno pouhým rozepnutím všech spínačů, proud je pak veden přes ochranné diody.
2. Slow-decay – V tomto režimu se v neaktivní části periody PWM sepnou spodní spínače Q2 a Q4 (sepnutím obou horních se dosáhne stejného výsledku), proud pak protéká přes oba spodní tranzistory. Pokles proudu probíhá pomaleji proti režimu Fast-decay. Tento režim využívá celý rozsah činitele plnění.
3. Mixed-decay – Tento režim je kombinací dvou předchozích, na platformě však není použit. Detailním popisem tohoto režimu i celé problematiky H-můstků se zabývá řada zdrojů např. [3].

Na modulech platformy MagMan je připraven provoz jak v režimu Fast-decay (používáno v původní verzi), tak Slow-decay (používaný nyní). Přepínání mezi režimy probíhá signálním vodičem *mode* připojeným k procesoru.

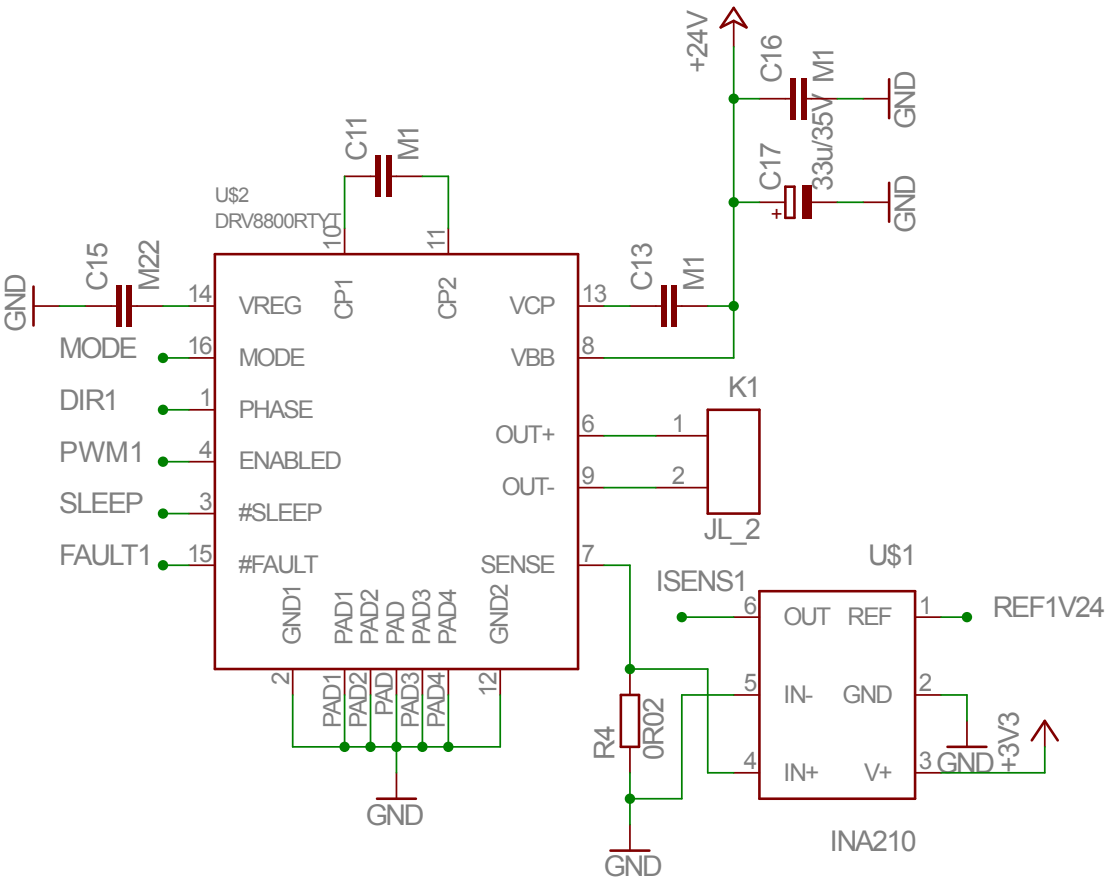
Řízení H-můstků probíhá pomocí PWM signálu generovaného čítačem procesoru o frekvenci $f_{\mathrm{PWM}} = 4{,}39$ kHz. U použité cívky s časovou konstantou $\tau_{\mathrm{L}} = 10$ ms je uvažovaváno, že proud ní protékající je po dobu periody PWM konstantní, protože perioda signálu PWM je

$$T_{\mathrm{PWM}} = \frac{1}{f_{\mathrm{PWM}}} = 227{,}8\ \mu\mathrm{s} \ll \tau_{\mathrm{L}}. \tag{1}$$

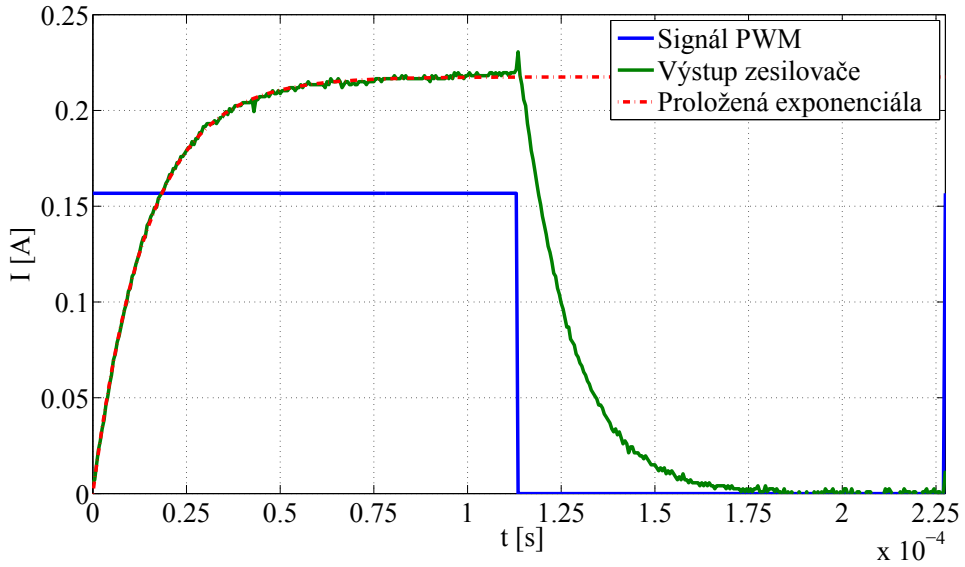
Tento předpoklad je jednou z omezujících podmínek pro volbu frekvence PWM, omezuje ji zdola. Druhou omezující podmínkou, tentokrát shora, je rychlost A/D převodníku a šířka frekvenčního pásma měřícího zesilovače, pokud je zapojen jako na modulu platformy (Obr. 5).

## 3.2. Hardwarové řešení

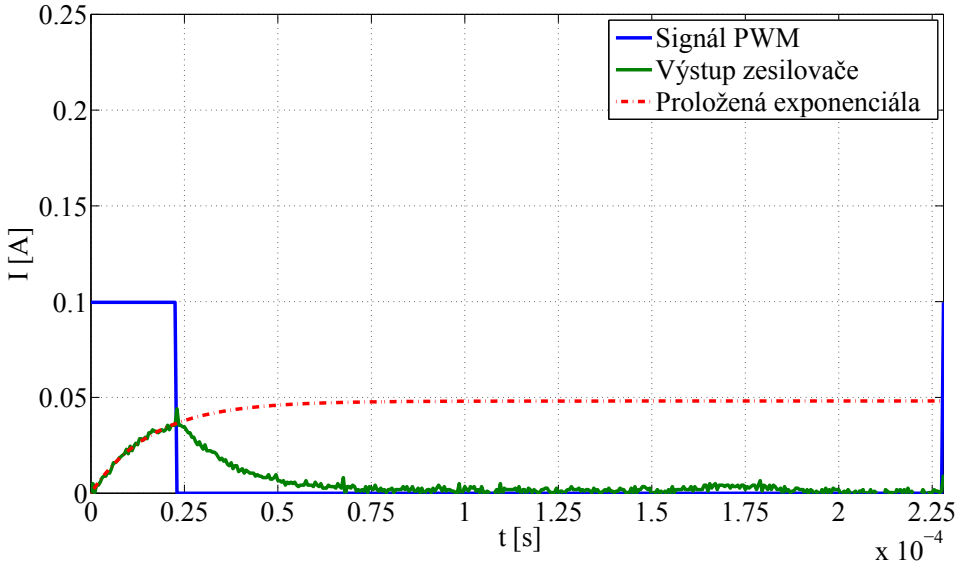
Hardwarové řešení (Obr. 5) se skládá ze snímacího odporu 0,02 Ω, který je připojen mezi H-můstkem a zemí (tzv. „low-side“). Na něj je připojen měřící zesilovač INA210 [4], který signál zesílí (zesílení $k = 200$) a ten je potom přiveden na vstup A/D převodníku procesoru. Proud procházející snímacím odporem neodpovídá vždy proudu procházejícímu cívkou. V režimu Slow-decay se totiž v neaktivní části periody PWM proud uzavírá přes oba spodní spínače (Q2 a Q4) H-můstku a tím pádem vůbec neprochází skrz snímací odpor. V režimu Fast-decay se dokonce periodicky střídá i směr procházejícího proudu a tím i polarita napětí na snímacím rezistoru, i když proud cívkou zůstává konstantní. To způsobuje problémy měřícímu zesilovač INA210 (který má šířku frekvenčního pásma přibližně 10 kHz, což odpovídá časové konstantě $\tau_{\mathrm{z}} = 14{,}7\mu$s), protože na jeho vstupu se skokově mění napětí i v případě konstantního proudu cívkou (konstantního po dobu periody). Jeho výstup, který odpovídá chování systému 1. řádu je vidět na průběhu z osciloskopu (Obr. 6). Pro porovnání je zobrazena i proložená exponenciála.




**Obrázek 5.** Zapojení H-můstku, a obvodu měření proudu pro jednu cívku. Převzato z dokumentace k platformě.




**Obrázek 6.** Výstup zesilovače a signál PWM pro střídu 50 %. Nenulová hodnota signálu PWM reprezentuje jeho aktivní úroveň.




**Obrázek 7.** Výstup zesilovače a signál PWM pro střídu 10 %. Nenulová hodnota signálu PWM reprezentuje jeho aktivní úroveň.

### Problémy hardwarového řešení

Jak si lze všimnout, toto řešení je nevýhodné, hlavně v případě nízké střídy PWM. Pokud je střída vyšší než 32,3 %, pak čas aktivního stavu je větší než $5\tau_z$ a výstup je na konci aktivní části periody PWM již ustálený. V tomto období lze měřit přímo hodnotu proudu. V opačném případě, tedy se střídou PWM pod touto mezí, nelze hodnotu proudu přímo naměřit, protože přechodový děj na výstupu neodezní před příchodem konce aktivní části periody PWM, jak ukazuje naměřený průběh výstupu zesilovače (Obr. 7). Při použití vyšší frekvence PWM se hranice přímého měření posune výš.

Dalším problémem je, že spouštění převodu na A/D převodníku procesoru nelze přímo hardwarově synchronizovat s čítačem generujícím signál PWM. Je třeba využít přerušení, což způsobuje zvýšené zatížení procesoru a v případě zpracovávání nějakých prioritních úkonů to může negativně působit na přesné načasování převodů. Zatížení procesoru je vyšší také z důvodu, že procesor LPC1313 neobsahuje blok přímého přístupu do paměti DMA (direct memory access) a musí se proto pro ukládání hodnot z A/D převodníku používat přerušení jádra procesoru.

## 3.3. Možné řešení zkreslení proudu

### Výměna zesilovače

První možností je použít jiný měřící zesilovač, který by měl větší šířku frekvenčního pásma a tím pádem i kratší časovou konstantu. Umožnilo by to zvýšit frekvenci PWM a měřit přímo i při nižších střídách. Výběr omezují nároky na fyzické rozměry zesilovače, nároky na napájení (na modulu je dostupné 3 V napájení) a potřeba schopnosti měřit proud obousměrně, v režimu Fast-decay totiž proud během neaktivní části periody PWM protéká snímacím rezistorem opačným směrem.

Těmto podmínkám by vyhovoval například zesilovač ADM4073 [5] s šířkou frekvenčního pásma 1,8 MHz. Tím by se vyřešil problém se zkreslením signálu, přesně řečeno by se posunul k nižším střídám nebo vyšším frekvencím PWM. Stále by se ale musel převod synchronizovat s čítačem generujícím PWM signál.

### Plovoucí měření

Jiným řešením je plovoucí měření, kde je snímací odpor v sérii s cívkou (Obr. 4b) a tím pádem jím protéká stejný proud jako cívkou. Tím je samotný problém se zesilovačem vyřešen, protože úbytek na snímacím odporu odpovídá přímo proudu cívkou. Ani toto řešení není bez problémů, protože při spínání H-můstku dochází ke skokové změně napětí na obou stranách snímacího rezistoru, problém zde popisovaný se nazývá „Common Voltage Swing“. Jde o to, že měřící zesilovač (zapojený jako rozdílový zesilovač) by v ideálním případě neměl nijak reagovat, pokud se na obou jeho vstupech bude měnit současně napětí stejně, ale to skutečné měřící zesilovače neumí.

Většina z dostupných měřících zesilovačů je určena pro měření typu „high side“ (snímací odpor zapojen mezi H-můstkem a napájecím napětím) a nebo „low side“ (snímací odpor zapojen mezi H-můstkem a zemí). Některé zesilovače (např. AD8206 [6] nebo LT1999 [7]) jsou na plovoucí zapojení (Obr. 4b) navrženy, ale i tak u nich v okamžiku přepnutí H-můstku, kdy oba vstupy změní napěťovou úroveň, dojde k nežádoucímu jevu na výstupu. Obvyklým projevem je špička, zobrazená například v [7].

Výhodou tohoto řešení je, že je možné měřit proud i v neaktivní části nebo, že nežádoucí špička při přepnutí odeznívá rychleji než přechodový děj u zapojení použitého na modulu platformy. Rychlejší odeznění jevu při přepínání H-můstku znamená delší čas, kdy lze měřit proud.

### Odhad signálu před zesilovačem

Poslední variantou, která byla jako jediná realizována, je odhad signálu před měřícím zesilovačem. Ze znalosti odezvy na jednotkový skok, je možné určit parametry systému, kterými ho lze popsat. Výstupní napětí měřícího zesilovače je dáno rovnicí

$$u_{\mathrm{out}} = Uk\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\mathrm{z}}}}\right), \tag{2}$$

kde $u_{\mathrm{out}}$ je výstupní napětí měřícího zesilovače, $U$ je napětí skoku na vstupu, $k$ je statické zesílení zesilovače, $t$ je čas od skoku (začátku aktivní části periody PWM) a $\tau_{\mathrm{z}}$ je určená časová konstanta měřícího obvodu. Při znalosti velikosti snímacího rezistoru ($R_{\mathrm{SENSE}} = 0{,}02\ \Omega$), lze napsat

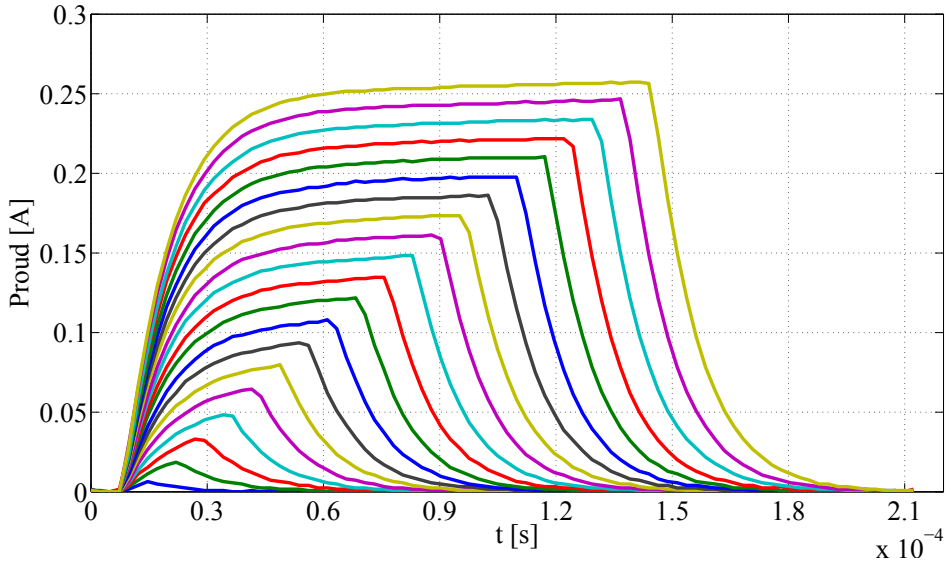
$$u_{\mathrm{out}} = IR_{\mathrm{SENSE}}k\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\mathrm{z}}}}\right), \tag{3}$$

kde $I$ je měřený proud (uvažován jako konstantní po dobou jedné periody PWM). Z rovnice 3 lze provést vyjádření proudu $I$

$$I = \frac{u_{\mathrm{out}}}{R_{\mathrm{SENSE}}k\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\mathrm{z}}}}\right)}. \tag{4}$$

Tuto rovnici je třeba upravit pro práci s diskrétními vzorky, která je ve tvaru

$$I'(n) = \frac{u_{\mathrm{out}}(n)}{R_{\mathrm{SENSE}}k\left(1 - e^{-\frac{nT_{\mathrm{vz}}}{\tau_{\mathrm{z}}}}\right)}, \tag{5}$$




**Obrázek 8.** Modulem naměřené průběhy pro střídu 3-60 % s krokem po 3 %.

kde $n$ je pořadové číslo vzorku a $T_{\mathrm{vz}}$ je vzorkovací perioda. Jmenovatel zlomku je závislý pouze na pořadí vzorku od začátku periody PWM, takže lze použít hodnoty z předgenerované tabulky.

Odhad proudu spočívá ve vypočtení předpokládané hodnoty $I'(n)$ pro každý naměřený vzorek z A/D převodníku. Z těchto hodnot se určí předpokládaná hodnota proudu $I$ pomocí metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenší čtverců je inspirována [8] a implementována přímo do výpočtu proudu tak, že jednotlivá měření tvoří vektor $\mathbf{M} = \left(\frac{u_{\mathrm{out}}(1)}{R_{\mathrm{SENSE}}k}, \ldots, \frac{u_{\mathrm{out}}(m)}{R_{\mathrm{SENSE}}k}\right)^T$ a jím odpovídající vektor exponenciálních korekcí $\mathbf{K} = \left(1 - e^{-\frac{T_{\mathrm{vz}}}{\tau_{\mathrm{Z}}}}, \ldots, 1 - e^{-\frac{nT_{\mathrm{vz}}}{\tau_{\mathrm{Z}}}}\right)^T$, kdy odhadovaný proud je dán rovnicí

$$I = \left(\mathbf{K}^T\mathbf{K}\right)^{-1}\mathbf{K}^T\mathbf{M}. \tag{6}$$

Pro přesnější výsledky byly konstanty $T_{\mathrm{VZ}}$ a $\tau_{\mathrm{Z}}$ tohoto výpočtu určeny experimentem přímo na cílovém hardwaru (modulu MagMan). Experiment spočíval v zaznamenávání naměřených průběhů přímo celý měřícím řetězcem a zároveň měřením proudu cívkou měřícím přístrojem. Naměřená data (Obr. 8) pak byla prokládána výše popisovanou exponenciálou. Při experimentech se ukázalo, že měření je zatíženo multiplikativní chybou, která je pravděpodobně způsobena přídavným odporem mezi místem připojení měřícího zesilovače a vývody snímacího odporu. Díky malé hodnotě snímacího odporu může být odpor těchto přívodů v řádu jednotek procent hodnoty snímacího odporu. Proto byl celkový snímací odpor $R_{\mathrm{SENSE}}$ přidán mezi určované parametry (Tab. 2). V případě potřeby odstranění této chyby je nutné provést kalibraci pro každou cívku samostatně. Srovnání kalibrovaných a nekalibrovaných dat je v závěru kapitoly (Obr. 9).

Tento postup odhadu v sobě zahrnuje dva předpoklady, které musí být splněny, aby se dal použít. Prvním z nich je konstantní proud po dobou jedné periody PWM. Druhým

**Tabulka 2.** Experimentálně určené konstanty měření proudu

| Parametr | Hodnota |
|---|---|
| $\tau_{\mathrm{Z}}$ | 13,6 $\mu$s |
| $T_{\mathrm{VZ}}$ | 2,44 $\mu$s |
| $R_{\mathrm{SENSE}}$ | 21,6 m$\Omega$ |

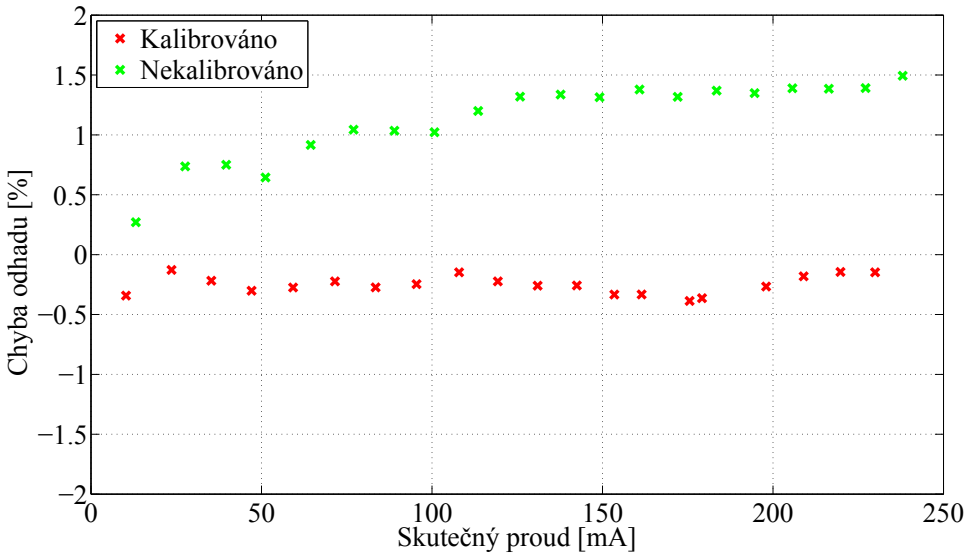
předpokladem je, že výstup zesilovače po začátku aktivní části periody PWM musí narůstat od nulové hodnoty. To nastane, pokud je dostatek času od konce aktivní části minulé periody PWM. Tento předpoklad je při zvolené frekvenci PWM bezpečně splněn, pokud je střída menší než 60 %. V případě, že je střída větší, je již dostupná dostatečně dlouhá část ustálené hodnoty a je možné použít přímý odhad pomocí aritmetického průměru z ustálených dat.

## 3.4. Implementace v procesoru

Měření v procesoru se skládá z pěti fází, každá z těchto fází trvá přesně jednu periodu signálu PWM. První čtyři fáze slouží pro odměr jednotlivých kanálů. Odměr probíhá tak, že se čtyři vzorkovací periody před začátkem aktivní části periody PWM začne vzorkovat maximální možnou vzorkovací rychlostí. Navzorkuje se 85 vzorků, což je maximální možná hodnota pro zajištění přepnutí na kanál druhé cívky. V páté fázi se provede výpočet (dle postupu výše) odhadu proudu pro všechny čtyři kanály z uložených dat. Aby výpočet probíhal co nejrychleji, byla použita tzv. „fixed-point“ reprezentace dat a vektor exponenciálních korekcí je předpočítán a uložen jako tabulka. Maticová implementace metody nejmenších čtverců umožní výpočet odhadované hodnoty proudu během jednoho průchodu přes pole vzorků. Vzhledem k výše uvedeným předpokladům se při střídě vyšší než 60 % provádí odhad aritmetickým průměrem z posledních 30 vzorků před koncem aktivní části periody PWM bez použití exponenciální korekce. Jedno měření na všech čtyřech kanálech i s výpočty trvá 5 period signálu PWM, obnovovací frekvence měření tak je

$$f_{\mathrm{omp}} = \frac{1}{5T_{\mathrm{PWM}}} = 881 \text{ Hz}. \tag{7}$$

Na výsledném srovnání (Obr. 9) chyby odhadnutého proudu proti proudu měřeného měřícím přístrojem je vidět rozdíl mezi kalibrovaným a nekalibrovaným případem.




**Obrázek 9.** Srovnání chyby odhadnutých hodnot proudu proti proudu měřeným měřícím přístrojem v rozsahu použité exponenciální korekce (střída 3-60 %) pro kalibrovaná a nekalibrovaná data. Chyba odhadu je uvedena v procentech měřícího rozsahu (500 mA).

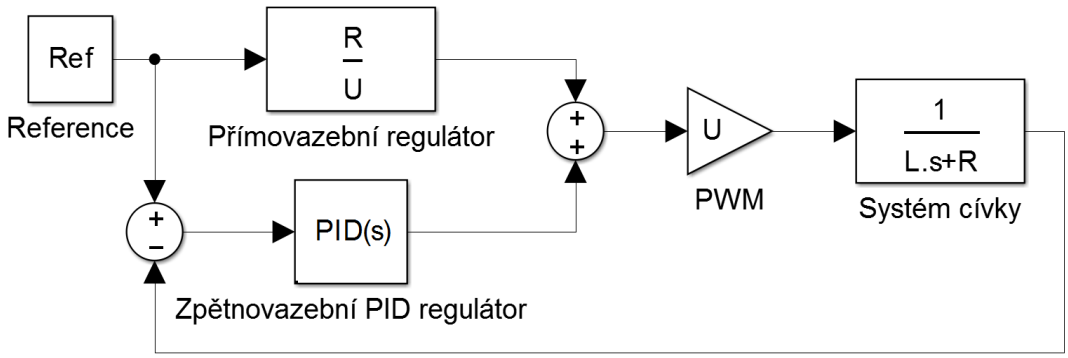
# 4. Zpětnovazební regulace proudu

Na modulu platformy MagMan se používá již zmíněné ovládání proudu cívkou pomocí PWM modulace připojeného napětí. Frekvence PWM je zvolena dostatečně vysoká na to, aby se proud cívkou dal považovat za konstantní po dobu jedné periody PWM. Při změně střídy však dochází k přechodovému ději.

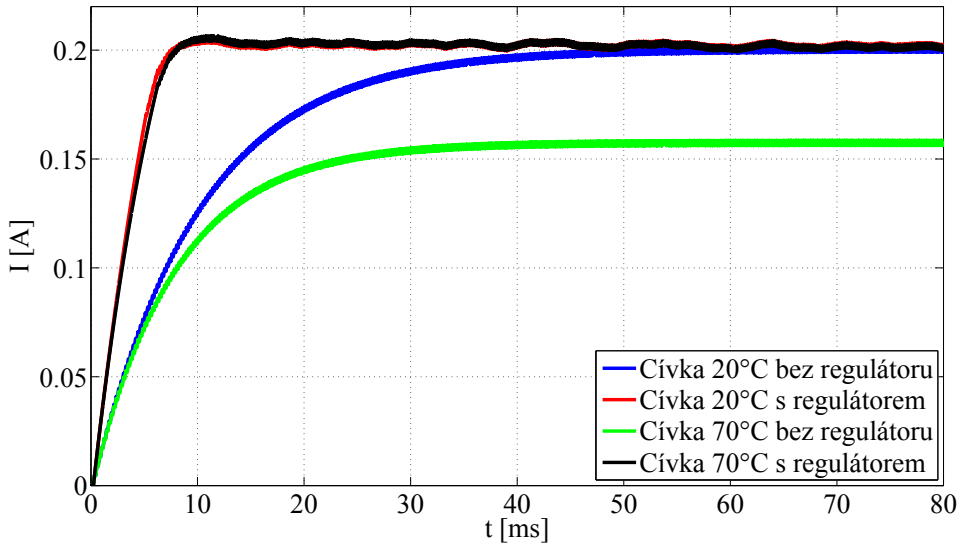
Pro vyšší vrstvy struktury řízení by však bylo ideální, pokud by se přenos z reference proudu na skutečný proud dal považovat za hodnotu 1. Potom by nebylo potřeba uvažovat dynamické vlastnosti cívky. Tomuto ideálu se lze přiblížit zvýšením rychlosti odezvy a potlačením ostatních vlivů způsobujících regulační odchylku (teplotní závislost parametrů cívky, pokles napájecího napětí...) použitím zpětnovazebního regulátoru. Navržený regulátor se skládá z přímovazební a zpětnovazební části. Přímo vazební část je navržena jako pouhé zesílení. Využívá znalosti hodnoty odporu cívky a napájecího napětí. Zpětnovazební část tvoří PI regulátor.

Výsledkem této části práce je model systému i s regulátorem implementovaný a simulovaný v Simulinku (Obr. 10). Tento model obsahuje systém 1. řádu reprezentující cívku, blok pro generování PWM signálu a omezení vzorkovacích period jak na řízení střídy PWM signálu, tak na měření hodnoty proudu. Dále je doplněn generátor šumu reprezentující šum měření proudu. Tento regulátor bohužel nebyl z časových důvodů implementován do modulu platformy a tak není možné posoudit jeho funkci ve skutečnosti.

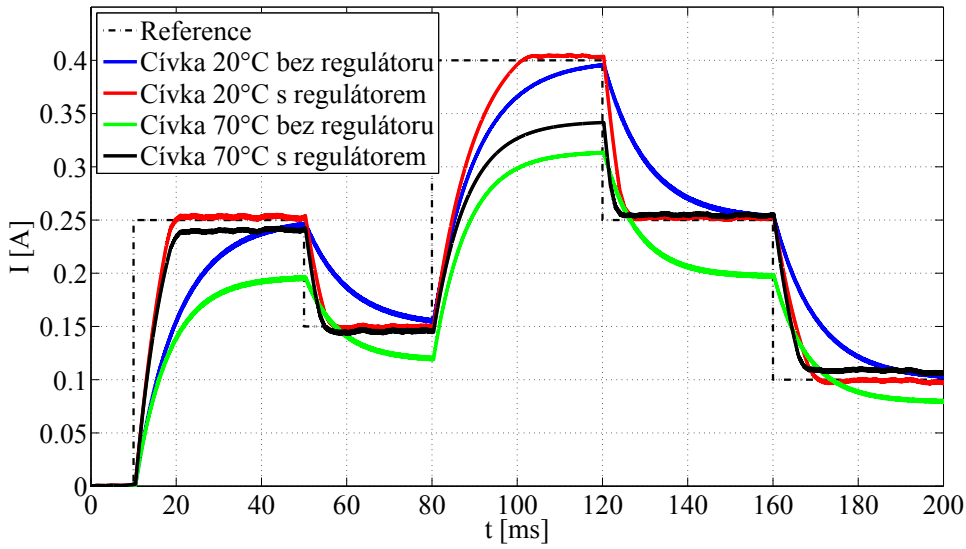
V simulacích (Obr. 11) je vidět, že schopnost zvýšit rychlost odezvy je závislá na referenci. Pokud je totiž reference příliš vysoká, nemá regulátor dostupný potřebný akční zásah. Navržený regulátor dobře potlačuje regulační odchylku v případě změny odporu cívky (v simulacích použita hodnota odporu odpovídající přibližně 70 $°C$).




**Obrázek 10.** Zjednodušené schéma proudového regulátoru, celý model systému s regulátorem je dostupný na přiloženém CD.




**a)** Porovnání odezvy simulovaných systému na skok 0,2 A.




**b)** Porovnání odezvy simulovaných systému na zvolený průběh.

**Obrázek 11.** Porovnání systémů se zpětnovazebním regulátorem a bez něj. Přidány také simulace systémů se změněným odporem cívky odpovídajícím přibližně 70 $°C$.

# 5. Odhad teploty cívky

Odhad nebo měření teploty slouží pro účely ochrany proti přehřátí. Při napájecím napětí 24 V totiž může tepelný výkon jedné cívky dosahovat až 11 W. Takovýto výkon dokáže celý modul značně zahřívat a při delším provozu by mohlo dojít k nežádoucímu přehřívání cívek i celého modulu. K zamezení přehřátí bylo navrženo několik možností, jak určit teplotu cívek a případně modul včas vypnout. Vzhledem k tomu, že nejde o regulaci teploty, ale odhadnutá teplota slouží pouze pro účely detekce přehřátí, není nutná vysoká přesnost. Cílem je určit teplotu v řádu jednotek až jedné desítky stupňů. Zmíněné metody byly ověřovány na testovacím modulu platformy MagMan, každá z nich má své výhody i nevýhody. Rozhodnutí, která z metod se bude v budoucnu na platformě používat zatím neproběhlo.

## 5.1. Teplotní senzory

První možností je osazení cívek teplotními senzory. Na testovacím modulu platformy byly použity teplotní senzory LM75 [9], které jsou výrobcem přímo určeny pro použití, jako ochrany proti přehřátí.

Teplotní senzor LM75 je digitální senzor komunikující s nadřazeným obvodem pomocí sběrnice I2C. Má 3 vstupy pro nastavení adresy a lze tak připojit až 8 těchto senzorů na jednu sběrnici. Kromě digitální sběrnice obsahuje také jeden výstupní signál indikující přehřátí nad nastavenou teplotu s možností nastavit hysterezi. Tento signál je připojen na výstup s otevřeným kolektorem. Lze tak spojit více výstupů senzorů na jeden vstup procesoru. Obě teplotní úrovně se nastavují přes digitální sběrnici I2C, přes kterou se také čte aktuální hodnota teploty. Senzor může být dokonce použit jako jednoduchý dvoustavový regulátor teploty.

Pro účely ochrany proti přehřátí jsou na testovacím modulu osazeny čtyři senzory na horní části jednotlivých cívek a jeden připojený s nosnou částí. Všechny senzory jsou spojeny na jednu sběrnici I2C procesoru. Kromě toho jsou také propojeny jejich výstupy signalizující přehřátí a tento kombinovaný signál je přiveden na jeden vstup procesoru s aktivovaným vnitřním pull-up rezistorem. Pokud kterýkoliv teplotní senzor signalizuje přehřátí, přivede na svůj výstup logickou nulu, která v procesoru spustí přerušení. Pro určení, o který jde senzor je potřeba se dotázat všech senzorů po sběrnici I2C.

Senzory LM75 mají absolutní toleranci až ±2 °C, relativní toleranci jen ±0,25 °C a rozlišení dokonce ±0,125 °C. Pokud je potřeba provést přesnější měření je vhodné u všech senzorů před začátkem provést kalibraci offsetu. Průběhy pro testování ostatních metod byly naměřeny pomocí těchto senzorů s využitím zmíněné kalibrace.

Výhodou řešení pomocí teplotních senzorů je, že není potřeba nijak zatěžovat žádnou výpočetní kapacitu platformy. Senzorům se totiž, po zapnutí modulů, nahrají do registrů požadované teplotní úrovně od té doby je provoz zcela autonomní. Komunikace

se senzory probíhá pouze na dotaz z nadřazeného řídícího systému, nebo při překročení nastavené teplotní úrovně, kvůli určení o který senzor jde. Naopak nevýhodou je nutnost instalace senzoru na každou cívku a jejich propojování.

## 5.2. Model systému

Druhou možností je vytvořit model systému a ten pak používat pro odhad aktuální teploty. Kompletní teplotní model celého systému platformy MagMan by byl velmi složitý, protože se jednotlivé moduly při spojení začínají vzájemně ovlivňovat. Bylo by tak nutné modelovat jinak cívky na vnějším okraji a jinak cívky vnitřní. Vzhledem k tomu, že nejde o model pro regulaci teploty, ale pouze o systém detekce přehřátí, tak je přesnost v řádu jednotek až jedné desítky stupňů dostatečná. To umožňuje použít tyto zjednodušení:

- Neuvažuje se vzájemné ovlivňování cívek.
- Vnější teplota je brána jako konstantní.
- Teplotní rezistance mezi cívkou a okolím je brána jako lineární.
- Cívka i její jádro jsou aproximovány jednou tepelnou kapacitou.
- Přechodové děje proudu na cívce jsou o několik řádů rychlejší než přechodové děje teplotního systému, proto můžou být zanedbány.
- Odpor cívky je brán jako konstantní.

Poslední zjednodušení neznamená veliký rozdíl ve složitosti modelu, a tak byly vytvořeny modely celkem dva: jeden s uvažováním závislosti na teplotě a jeden bez ní. Závislost odporu na teplotě je více popsána v kapitole 5.3, kde je použita pro odhad teploty.

Teplotní model s použitím výše zmíněných zjednodušení popisuje pseudo-vazební graf (Obr. 12). Jeho vstupem je zdroj $S_\mathrm{f}$, jehož hodnota $P_\mathrm{IN}$ je elektrický výkon přeměňovaný na teplo na oporu cívky. Tento výkon je dán rovnicí

$$P_\mathrm{IN} = R(T)I^2 = \frac{U_\mathrm{STR}^2}{R(T)}, \tag{8}$$

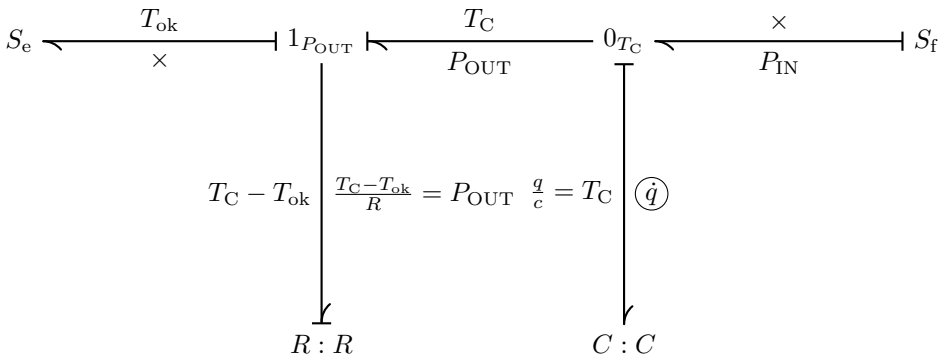
kde $R(T)$ je odpor cívky v závislosti na teplotě $T$ (případně konstantní), $I$ je proud cívkou a $U_\mathrm{STR}$ je střední hodnota napájecího napětí modulovaného signálem PWM. Do této rovnice je možné dosadit (při použití výše uvedených zjednodušení) vztah pro výpočet střední hodnoty napětí v závislosti na napájecím napětí a střídě, čímž dostáváme

$$P_\mathrm{IN} = \frac{U^2 D^2}{R(T)}, \tag{9}$$

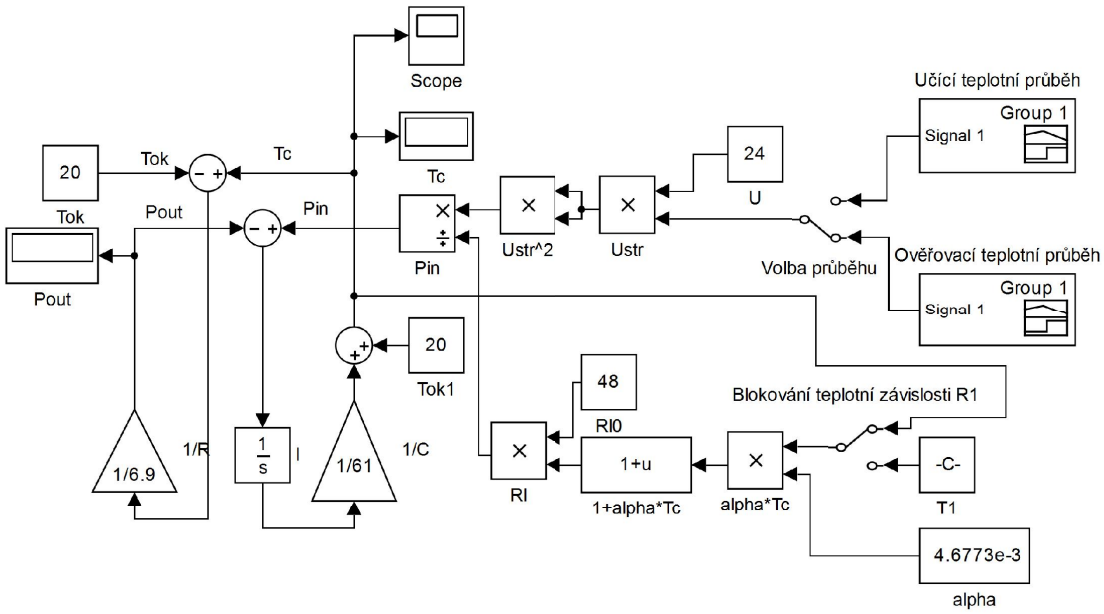
kde $D$ je střída signálu PWM. Toto je výsledný vztah použitý v modelu. Teplotní závislost odporu cívky je aproximována jako

$$R(T) = R_0 \left(1 + \alpha \left(T - T_0\right)\right), \tag{10}$$

kde $R_0$ je odpor cívky při teplotě $T_0$ a $\alpha$ je teplotní součinitel odporu cívky. Určení těchto parametrů je popsáno v kapitole 5.3. Model byl implementován v Simulinku (Obr. 13), kde byly prováděny simulace.

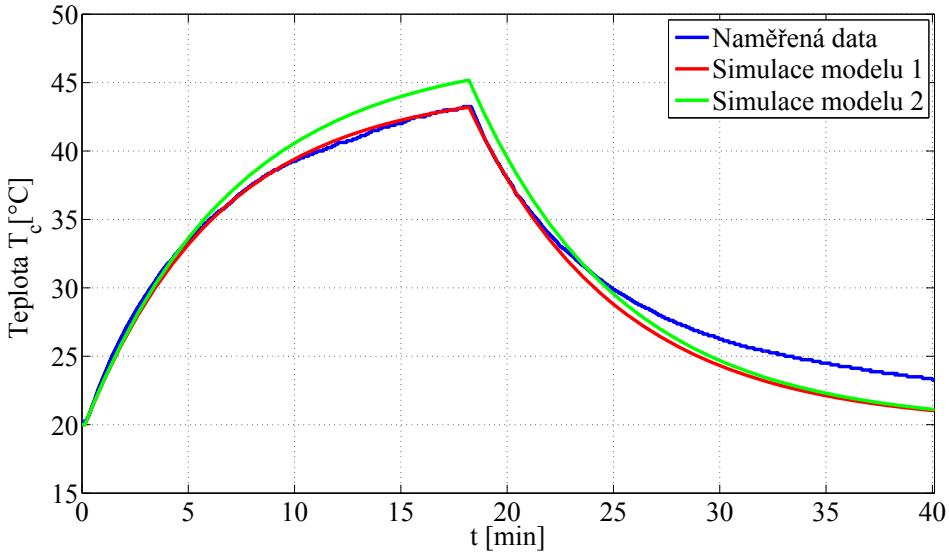



**Obrázek 12.** Pseudo-vazební graf zjednodušeného teplotního modelu.

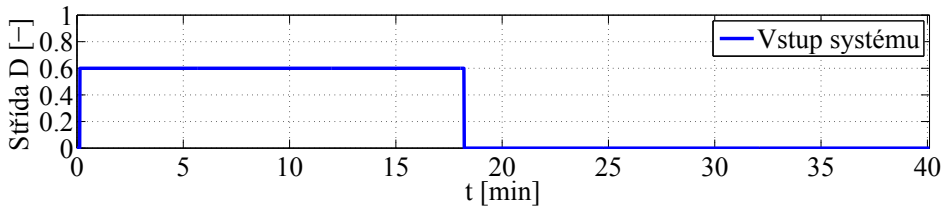



**Obrázek 13.** Simulinkové schéma teplotního modelu.

Parametry tohoto modelu $R_T = 6.9\ \mathrm{W \cdot K^{-1}}$ tedy tepelný odpor a $C_T = 61\ \mathrm{J \cdot K^{-1}}$ tedy tepelná kapacita cívky i s jádrem byly určeny na základě experimentu (Obr. 14) a pak ověřeny na druhém experimentu se složitějším průběhem (Obr. 15). Model popisuje chování systému dostatečně dobře, vzhledem k jeho použití. Odchylky jsou způsobeny značným zjednodušením, a to hlavně neuvažováním závislosti na okolních cívkách a tím i nosné části, nicméně to jeho funkci detekce přehřátí zásadně neomezí. Mezi výhody této metody se řadí absence instalace hardwaru a možnost výpočtu mimo platformu v řídícím systému bez dalšího zatížení komunikace dotazy. Metoda má i nevýhody jako je nutnost přídavného výpočetního zatížení komunikační desky Sentinel, kde je uvažováno o jeho nasazení. V případě, že by se výpočet prováděl mimo platformu v řídícím sytému, hrozí přehřátí, pokud řídící systém přestane pracovat, ačkoliv v tomto případě by zasáhl systém nouzového vypnutí popsaný dále (Kapitola 6.5).




**a)** Měření a simulace




**b)** Vstupní průběh

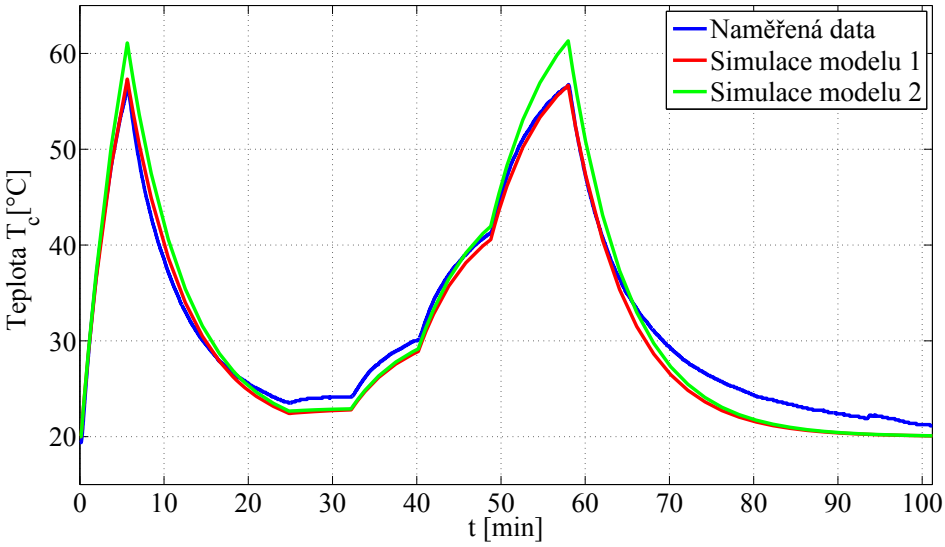
**Obrázek 14.** Naměřené průběhy pro určení parametrů, simulace modelu 1 (bez zanedbání teplotní závislosti odporu cívky) a modelu 2 (se zanedbáním teplotní závislosti odporu cívky).

## 5.3. Měření odporu cívky

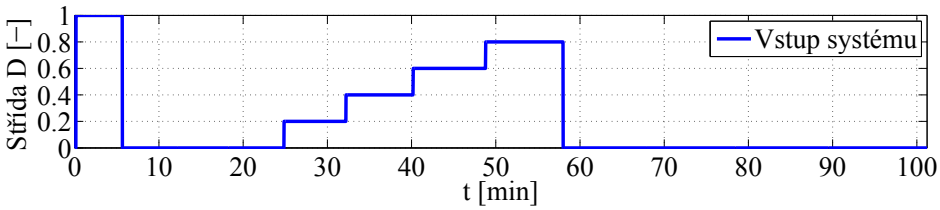
Poslední zkoumanou možností je odhad z teplotní závislosti odporu cívky. Pro určení hodnoty odporu cívky je potřeba měřit (případně považovat za konstantní) napájecí napětí a měřit proud. Dále je třeba zajistit, aby odezněl přechodový děj na cívce (od poslední změny střídy musí uplynout doba alespoň $5\tau_{\mathrm{L}}$). Tento předpoklad nemusí být nutný, pokud se použije obdobný odhad ustálené hodnoty jako byl použit pro měření proudu, ale při splnění těchto předpokladů můžeme určit odpor cívky jednodušeji. Pro určení teplotní závislosti (Obr. 16) byla použita data z předchozích experimentů. Na tomto průběhu je vidět, že teplotní závislost lze aproximovat přímkou. Díky tomu lze psát, že

$$T_{\mathrm{c}} = \frac{\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L0}}} - 1}{\alpha} + T_0 = \frac{\frac{U}{IR_{\mathrm{L0}}} - 1}{\alpha} + T_0, \tag{11}$$

kde $R_{\mathrm{L}}$ je hodnota odporu cívky, $R_{\mathrm{L0}}$ je hodnota odporu při teplotě $T_0$, $\alpha$ je teplotní součinitel odporu, $U$ je napájecí napětí a $I$ je ustálený proud. Tento výpočet teploty byl pro srovnání použit na ověřovací záznam dat. Na ověřovacím průběhu (Obr. 17) je vidět, že měření může probíhat pouze pokud cívkou prochází proud a také, že při vyšších proudech cívkou je odchylka nižší. Výhodou této metody odhadnutí teploty je, že není potřeba hardwarová úprava (instalace senzorů), nedochází k integrační chybě a také, že se měří přímo teplota vinutí cívky. Mezi nevýhody patří nutnost měření napětí a proudu nebo také, že lze teplotu měřit pouze při protékajícím proudu.

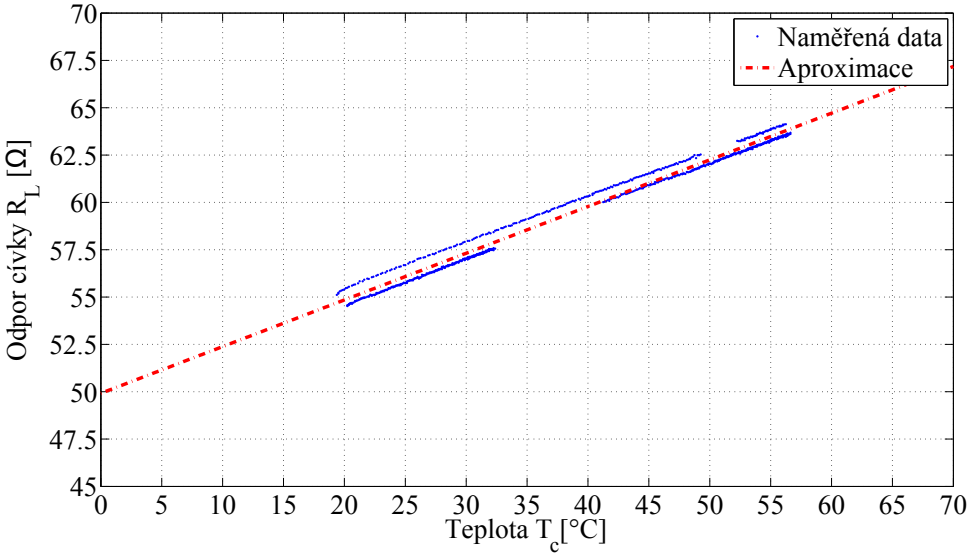



**a)** Měření a simulace

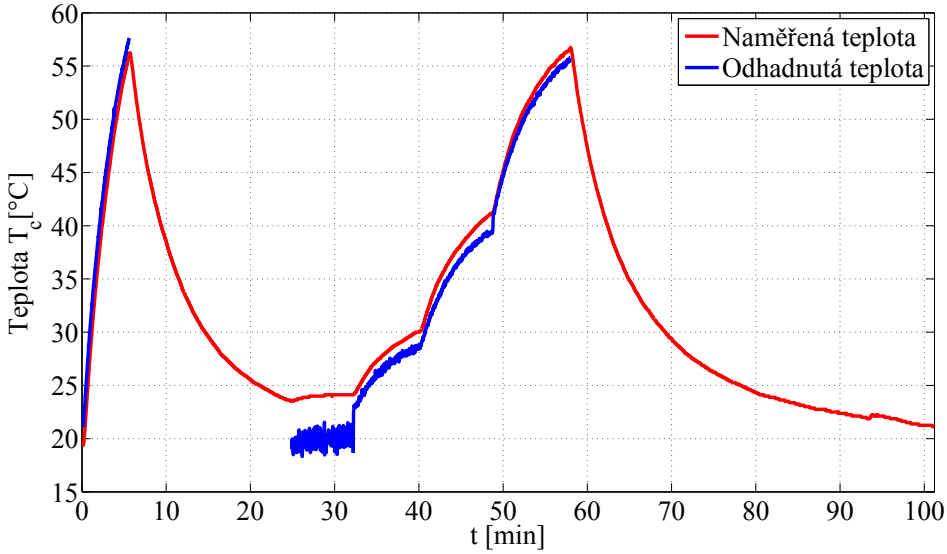



**b)** Vstupní průběh

**Obrázek 15.** Naměřené průběhy pro ověření modelu. Simulace modelu 1 (bez zanedbání teplotní závislosti odporu cívky) a modelu 2 (se zanedbáním teplotní závislosti odporu cívky).




**Obrázek 16.** Závislost odporu cívky na teplotě.



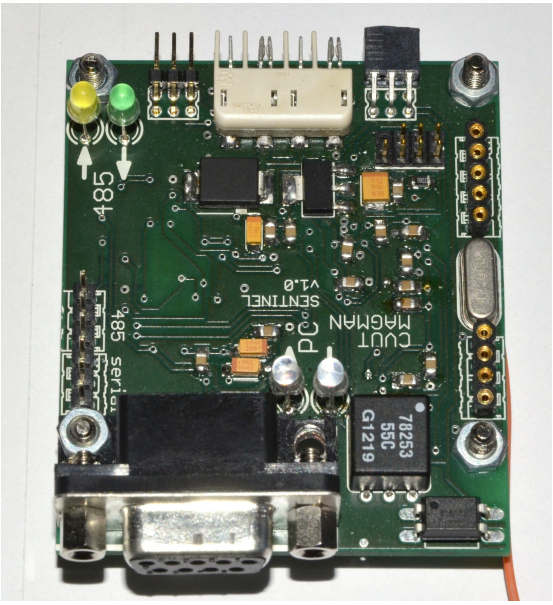

**Obrázek 17.** Srovnání odhadu teploty pomocí teplotní závislosti odporu s teplotou naměřenou senzorem.

# 6. Komunikační deska Sentinel

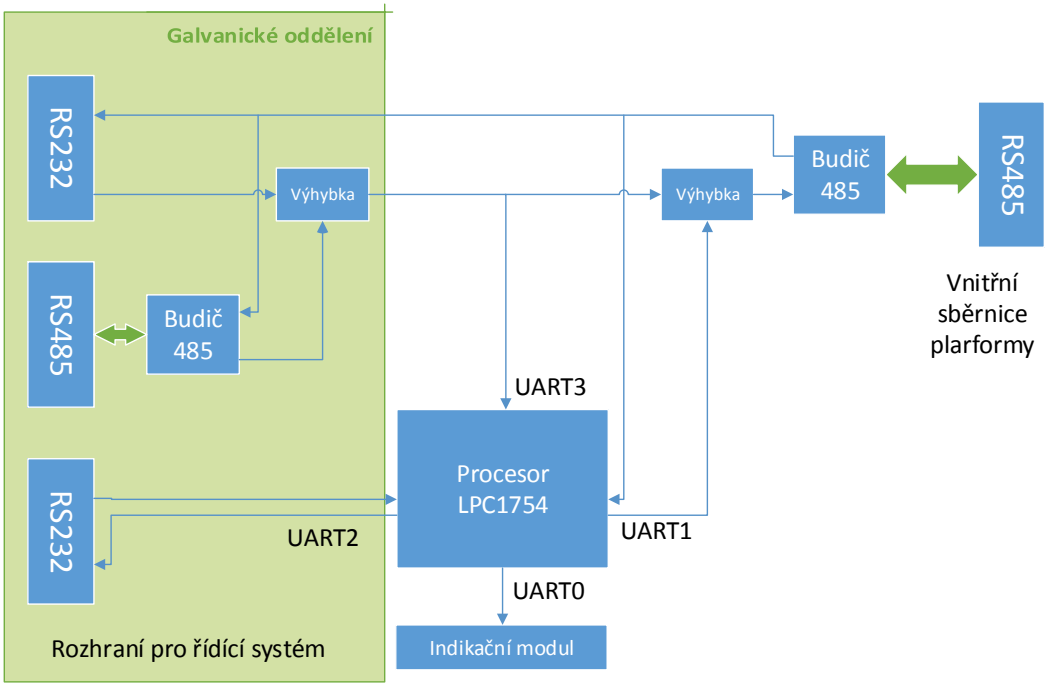
Deska Sentinel (Obr. 18) má sloužit pro připojení počítače nebo jiného zařízení, které má platformu ovládat. Má také zajistit galvanické oddělení vnitřních a vnějších sběrnic. Mezi další úkoly patří měření polohy pomocí dotykové fólie a obsluha indikačního modulu. Deska obsahuje procesor LPC1754 od firmy NXP, který zařizuje veškerou činnost, dále obsahuje také obvod pro obsluhu odporové dotykové fólie a sadu logických obvodů tvořících komunikační výhybku. Jelikož je vybavena stranovým konektorem (stejným jako na všech modulech), lze ji připojit k platformě MagMan na kterémkoli vnějším okraji. Celá deska je napájena z platformy MagMan.

## 6.1. Komunikační výhybka

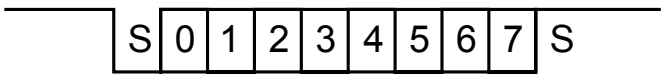
Komunikační výhybka (Obr. 19) slouží pro směrování komunikace mezi vnitřními a vnějšími sběrnicemi. Umožňuje, aby s platformou mohl komunikovat jak řídící počítač, tak procesor Sentinelu. Skládá se ze dvou budičů sběrnice RS485: jeden je připojen ke sběrnici platformy (na pravé straně) a druhý slouží k připojení externí sběrnice RS485. Oba budiče sběrnic jsou doplněny obvody automatického řízení směru, které zařídí přepnutí směru budičů v případě detekce odchozího přenosu po dobu jeho trvání. Výhybka dále obsahuje převodník na sériovou linku standartu RS232, aby byla možnost připojit platformu k co nejvíce různým druhům řídících zařízení. Poslední součástí jsou bloky signálových výhybek, které zajišťují sloučení dvou sériových linek.



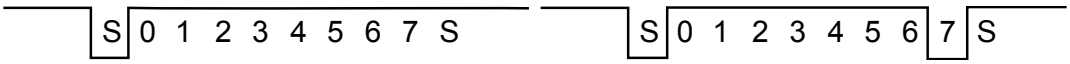

**Obrázek 18.** Komunikační deska Sentinel a její stranový konektor na horním okraji.




**Obrázek 19.** Schéma komunikační výhybky na desce Sentinel.




**Obrázek 20.** Průběh přenosu dat na sériové lince.




**a)** Nejlepší případ **b)** Nejhorší případ

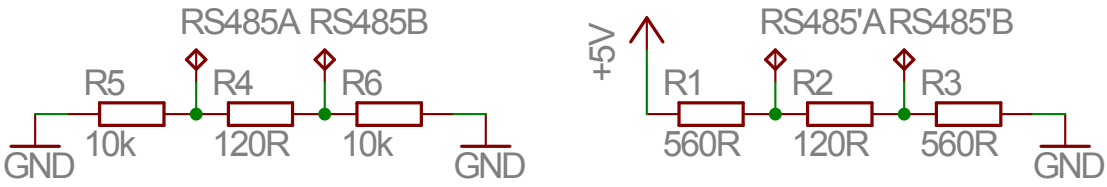
**Obrázek 21.** Hraniční případy pro automatické řízení směru.

Obvod řízení směru je tvořený časovačem, který je spuštěn sestupnou hranou na sériové lince (obvykle startbitem prvního bajtu přenášené zprávy). Časová konstanta je nastavena dle rovnice

$$t_{\mathrm{B}} = \frac{10+1}{b_s}, \tag{12}$$

kde $t_B$ je čas přenosu a $b_s$ je počet přenesených bajtů za sekundu. Konstanta 10 je počet bitů v jednom přeneseném rámci na sériové lince (Obr. 20). Vzhledem k tomu, že sériová linka umožňuje nastavení přenosové rychlosti ±5 %, nelze spoléhat na přesné nastavení rychlosti. Proto je k času přidána 1-bitová rezerva. Po dosazení přenosové rychlosti $b_{\mathrm{s}} = 230400$ b/s vychází časová konstanta obvodu 47,7 $\mu$s.

Při komunikaci mohou nastat dvě hraniční situace. V prvním případě (Obr. 21a) při odeslání bytu o hodnotě 255 (binárně zapsáno 0b11111111) se po sestupné hraně *start-bitu* již neobjeví jiná sestupná hrana. Časovač tak začne odpočítávat 11 bitových délek a skončí jednu bitovou délku po konci stopbitu (ona rezerva). Opačný případ nastává




**Obrázek 22.** Levý obrázek ukazuje aktuální zapojení pro nastavení klidové úrovně na sběrnici, pravý obrázek ukazuje navrženou úpravu zapojení doporučenou např. [11].

(Obr. 21b), pokud má šestý bit hodnotu 1 a sedmý hodnotu 0 (např. 0x01111111=127). V tomto případě přijde sestupná hrana do časovače se začátkem sedmého bitu. Časovač potom odečítá nastavených jedenáct bitových délek. Směr je v tomto případě přepnut až devět bitových délek po ukončení přenosu. Pro bezpečnou rezervu je tak třeba po ukončení příjmu vyčkat s odesláním odpovědi alespoň dobu přenosu jednoho bytu. V průmyslových systémech není neobvyklé ani čekání před odpovědí dobu přenosu až 4 bajtů.

Bloky výhybek, které slouží ke spojení dvou sériových linek, jsou tvořeny hradly AND. Vzhledem k tomu, že sériová linka je v klidovém stavu v úrovni logické jedničky (submisivní úrovni hradla AND), je přenos z kterékoli linky přenášen na výstup. Je však nutné zajistit, aby nikdy neprobíhal přenos na obou linkách zároveň, nastala by totiž kolize. Dalším problémem je, pokud je vstup hradla nezapojen (obdobně pokud je připojen na výstup, který je ve stavu vysoké impedance), potom vstup „visí ve vzduchu“ a nelze s jistotou určit logickou úroveň na výstupu. Tento problém se projevil u budičů sběrnice RS485, které za určitých podmínek [10] mají na svém datovém výstupu vysokou impedanci (tzv. třetí stav). Proto je vhodné opatřit vstupy výhybek pull-up rezistory. Tato úprava je součástí navržených úprav během oživování (Příloha A).

Při oživování se objevilo několik problémů, z nichž jeden byl již zmíněn. Dalšího zdroje problému si lze všimnout na blokovém diagramu komunikační výhybky (Obr. 19). Ukázalo se, že se při přepínání budiče sběrnice RS485 na datovém výstupu objeví velmi krátká špička do nízké logické úrovně. Přijímací obvody sériových linek tuto špičku ignorují (je příliš krátká) pro časovače obvodů automatických přepínačů směru je to však impulz k přepnutí do vysílání. Při pohledu na diagram je vidět uzavřená smyčka, která způsobuje střídavou aktivaci časovačů. Díky této smyčce je negativně ovlivněn i přenos z konektoru RS232. Tento problém se nepodařilo vyřešit a tak byla dočasně odpojena externí sběrnice RS485.

Posledním objeveným problémem jsou nevhodně navržené rezistory určující klidový stav na sběrnici. Autor hardwarového návrhu použil na oba vodiče sběrnice odpory pull-down. Ve srovnání obou zapojení (Obr. 22) je vidět, že instalované zapojení není vhodné. V případě, že na sběrnici nikdo nevysílá (všechny budiče sběrnice jsou ve stavu vysoké impedance), jsou oba diferenciální vodiče spojeny přes odpor na zem. Tento stav přijímací obvody většinou nedefinují, viz. např. [10]. Pokud přijímací obvod takový stav reprezentuje jako logickou nulu, hrozí interpretace jako *startbit*. Pokud je pauza mezi vysíláním a příjmem (skutečné odpojení vysílače nastane až po vypršení času automatického řízení směru) větší než délka přenosu jednoho bytu, přijme se mezi zprávami znak nula (0x00). Tento problém odstraní robustnost protokolu ElvisV2 (Příloha B).

Pokud je však pauza kratší, poruší se synchronizace a celý následující paket je poškozen a při dekódování zprávy zahozen.

Strukturu výhybky doplňuje procesor, ve kterém je implementována i funkce routeru. Podle stávající struktury by se sériový port připojený přes výhybku k platformě měl využívat na ovládání modulů, zatímco druhý sériový port by měl být použit pro čtení hodnot polohy z dotykové fólie. Pokud ale přijme platnou zprávu, která není určena desce Sentinel, tak je přeposlána na vnitřní sběrnici RS485. Případná přijatá odpověď se pak přepošle zpět do řídícího systému (počítače). Pokud přijde z vnitřní sběrnice platformy dotaz s adresou Sentinelu, odpoví se na něj zpět směrem na vnitřní sběrnici platformy. Je tak možné využít pro čtení polohy i převodník na desce Injector (součást platformy na obrázku 1 je vpravo vedle desky Sentinel, zajišťuje napájení a obsahuje převodník USB-RS485). Funkce routeru v procesoru je možné využít pouze při nižších obnovovací frekvencích nastavení, protože po dobu čekání na odpověď nelze používat vnitřní sběrnici platformy pro žádnou jinou komunikaci.

## 6.2. Galvanické oddělení komunikace

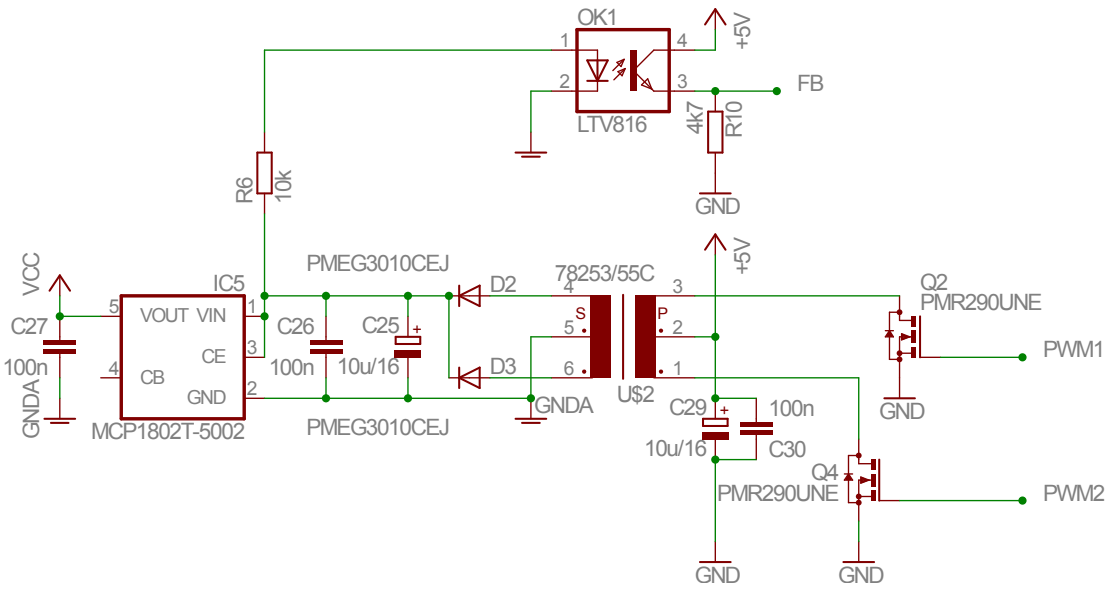
Dalším úkolem desky Sentinel je zajistit galvanické oddělení všech vnějších konektorů. Odstraní se tak rizika zemních smyček pro řídící jednotku. Deska je rozdělená na dvě části. První část je spojená s konektory platformy a patří do ní budiče sběrnice, procesor, měření polohy a část výhybky. Do druhé části se řadí převodníky úrovní sériové linky z logiky TTL na RS232 a budič externí sběrnice, který je prozatím odpojen, kvůli eliminaci uzavřené smyčky popsané výše. Jednotlivé sériové linky jsou odděleny izolátory ADUM1201 [12].

Jelikož sériová linka RS232 ani RS485 neposkytují napájení, je napájení oddělené části řešeno z platformy přes DC-DC spínaný zdroj s galvanickým oddělením (Obr. 23). Zapojení je vytvořeno diskrétními součástkami a je ovládáno přímo hlavním procesorem. Procesor budí tranzistory, které spínají proud přes oddělovací transformátor. Výstup transformátoru je usměrněn a přiveden na stabilizátor. Zpětná vazba je zajištěna přes oddělení optočlenem.

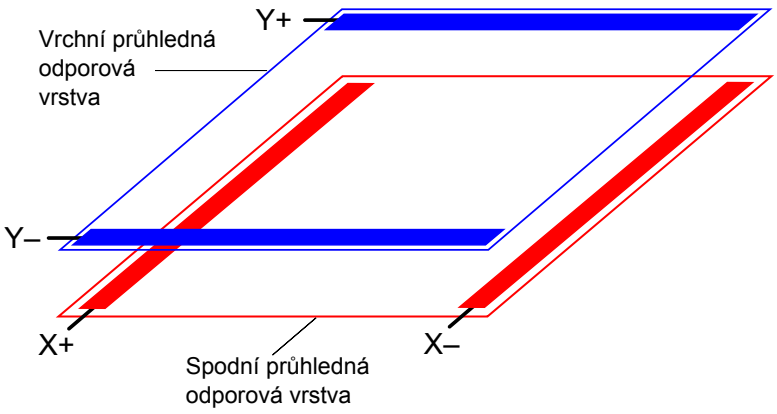
Zapojení bylo dodáno již s demontovanými tranzistory, které byly spálené po prvním zapnutí. Problém byl pravděpodobně v nedefinovaném stavu na jejich vstupu. Pravděpodobně tak zůstaly tranzistory v otevřeném stavu. Procházející proud byl v takovém případě omezen pouze odporem tranzistoru v otevřeném stavu a odporem oddělovacího transformátoru. Protékající proud tak mohl být až desetinásobek jmenovité hodnoty tranzistorů a ty toto přetížení nevydržely. Zmíněný problém nenastává nejen pokud je procesor bez programu, ale také pokud je v resetu (neběží program). Proto je potřeba provést nejdříve úpravu hardwaru, než bude možné tento systém provozovat. Tato oprava zatím nebyla provedena.

## 6.3. Měření polohy

Pro uzavření smyčky zpětnovazebního řízení je platforma doplněna senzorem polohy kuličky. Pro tento účel je použita technologie věrně známá z oboru průmyslových dotykových displejů a to rezistivní dotyková fólie. Tato fólie se skládá ze dvou průhledných odporových vrstev oddělených izolačními mikro-kuličkami (Obr. 24). Každá vrstva je




**Obrázek 23.** Schéma zapojení galvanicky odděleného DC-DC zdroje. Převzato z dokumentace k platformě.




**Obrázek 24.** Struktura dotykové fólie. Překresleno z [13].

opatřena dvěmi elektrodami. V jedné vrstvě (nazvěme jí vrstva X) jsou elektrody umístěny na levém a pravém okraji v druhé (vrstva Y) na předním a zadním. Vodiče na nich připojené jsou přivedeny k vyhodnocovacímu obvodu.

## Vlastnosti

Rezistivní dotyková fólie vyniká v jednoduchosti použití, má také nízkou spotřebou a reaguje i na předměty, které nejsou vodivé. Mezi nevýhody naopak patří větší náchylnost na poškození a reakce na tlak (to omezuje volbu hmotnosti kuličky). Další nevýhodou je schopnost detekovat pouze jeden předmět. Detekce více předmětů je možná při použití speciální dotykové fólie, která je rozdělena na menší části podobající se samostatné tradiční fólii. Speciální vyhodnocovací obvod tak může detekovat předmět v každé této části. Fólie použitá na platformě je tradičního provedení a tak dokáže detekovat pouze jeden předmět.

### Vyhodnocení polohy

Vyhodnocovací obvod určí polohu a sílu stisku ve čtyřech krocích (pokud se nevyhodnocuje síla stisku, stačí kroky dva). Uvedený postup popisuje například [13] nebo [14].

1. V prvním kroku se připojí napájení mezi elektrody X+ a X– (připojené k vrstvě X). Odporová vrstva vytvoří dělič napětí s výstupním napětím v místě dotyku. Deformací vlivem vnější síly se v tomto místě obě vrstvy propojí. Na vrstvu Y se tak dostane napětí odpovídající poloze deformace. Toto napětí lze díky vysoké vstupní impedanci měřícího obvodu naměřit na libovolné elektrodě vrstvy Y a odpovídá hledané souřadnici $x$.
2. V druhém kroku se vymění páry elektrod a provede se obdobné měření. Napětí je přivedeno na elektrody Y+ a Y–. Měřením na elektrodě X+ nebo X– získáme souřadnici $y$.
3. Pokud je třeba naměřit i odhad síly stisku (respektive odpor spojení obou vrstev) je třeba naměřit ještě dvě měření. Literatura [14] nazývá tyto měření $z_1$ a $z_2$. Hodnota $z_1$ je určena měřením na elektrodě X+ při připojeném napájení mezi elektrodami Y+ a X–.
4. Hodnota $z_2$ je měřena na elektrodě Y– s napájením také na Y+ a X–.

Na desce Sentinel je použit obvod TSC2046 [15], což je řadič dotykové fólie. Tento obvod obsahuje 12-ti bitový A/D převodník, multiplexer, spínací obvody pro připojení napětí na jednotlivé elektrody, řídící logiku a komunikační rozhraní SPI. Obvod umožňuje měření externího přivedeného napětí $U_{\mathrm{aux}}$ (na desce Sentinel připojeno k hlavnímu 24-voltovému napájení) a $U_{\mathrm{bat}}$. K měření těchto napětí se používá vnitřní reference 2,5 V. Pro měření polohy je použito vhodnější diferenciální měření, tedy A/D převodník používá referenční napětí přímo z aktuálně napájených elektrod. Převedená hodnota je tak přímo úměrná normované vzdálenosti deformace za předpokladu, že odpor vodičů použitých pro připojení elektrod k vyhodnocovacímu obvodu lze vzhledem k odporové vrstvě fólie zanedbat. Můžeme psát

$$\frac{ADC_{\mathrm{x}}}{2^r} = \frac{U_{\mathrm{y+}}}{U_{\mathrm{x+}} - U_{\mathrm{x-}}} = \frac{R_{\mathrm{x-}}}{R_{\mathrm{x}}} = x, \tag{13}$$

kde $ADC_{\mathrm{x}}$ je výsledná hodnota A/D převodníku, $r$ je počet bitů A/D převodníku, $U_e$ je napětí na elektrodě $e$, $R_{\mathrm{x-}}$ je odpor mezi místem deformace a elektrodou X–, $R_{\mathrm{x}}$ je odpor mezi elektrodami X+ a X– a $x$ je relativní vzdálenost od elektrody X– vzhledem k délce fólie. Obdobně lze vyjádřit relativní polohu $y$.

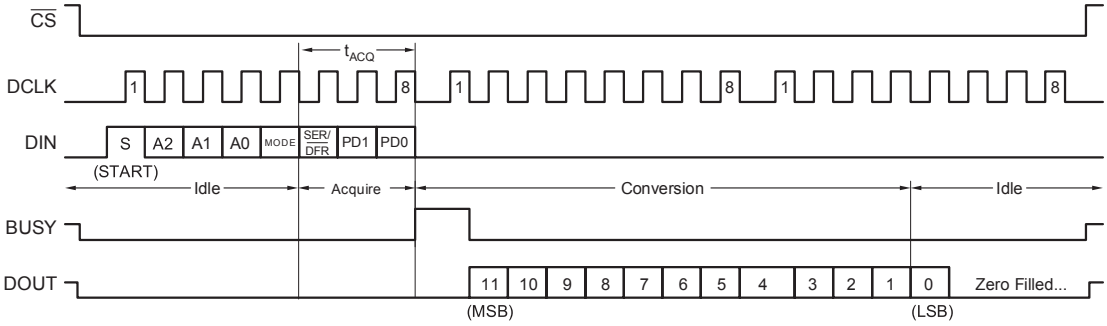
Výpočet odporu stisku se provádí podle vzorce

$$R_{\mathrm{TOUCH}} = R_{\mathrm{x}} \frac{ADC_{\mathrm{x}}}{2^r} \left( \frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right). \tag{14}$$

Odpor stisku lze použít například pro určení přítomnosti detekovaného předmětu. Detailněji o měření stisku fólie pojednává například [14].

### Komunikace s obvodem TSC2046

Řadič dotykové fólie TSC2046 je vybaven sériovým rozhraním kompatibilním [15] se standardem SPI, přes které je připojen k hlavnímu procesoru. V případě že, je třeba určit polohu doteku kuličky, odešle se do řadiče 8-bitový příkaz (Tab. 3), který určuje který kanál se bude měřit (3-bitové číslo A). Bitem Mode se určí rozlišení prováděného




**Obrázek 25.** Průběh komunikace s TSC2046 ([15], upraveno).

**Tabulka 3.** Pořadí bitů příkazu pro obvod TSC2046 [15].

| Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Start Bit | A[2:0] | | | Mode | SFR/DFR | PD[1:0] | |

převodu (8 nebo 12 bitů). Bit SFR/DFR vybírá použitou referenci pro měření. V případě logické jedničky je použita vnitřní reference 2,5 V (použito pro měření $U_{\mathrm{aux}}$), jinak se použije napětí na buzených elektrodách (vhodné pouze pro měření na fólii). Poslední dva bity PD určují aktivaci jednotlivých bloků obvodu (referenční napětí a A/D převodník) a jejich vypínání mezi převody (vypínání není použito, vše běží stále). Obvod rozezná začátek příkazu podle *startbitu*, který je vždy logická jednička. Po odeslání příkazu nastává jednu periodu hodinového signálu pauza. Po této pauze obvod odpoví dvanácti nebo osmi bity naměřené hodnoty. Po odpovědi obvod odesílá logické nuly až do dalšího příkazu (Obr. 25).

Specifikace obvodu TSC2046 dovoluje frekvenci SPI rozhraní až 2,5 MHz. Pro odeslání povelu (8-bit) a příjem hodnoty ve 12-bitovém rozlišení je potřeba 24 bitů (SPI umí pouze násobky 8-mi bitů). V režimu SPI tedy lze získat maximálně 104 166 vzorků za sekundu. První měření po přepnutí budičů fólie je ale zatíženo chybou, která je pravděpodobně způsobena přechodovým dějem na fólii (popisuje například [14]) pro potvrzení této hypotézy nebo určení příčiny by bylo třeba provést další experimenty. V implementaci je použito vyřazení první vzorku po přepnutí, takže se použije až následující. Pro určení polohy (i tlaku stisku) jsou třeba 4 měření (8 s vyřazenými vzorky). To znamená, že maximální vzorkovací frekvence polohy dána vztahem

$$f_{\mathrm{vz}} = \frac{f_{\mathrm{SPI}}}{24 \cdot 8} = 13\ 020\ \mathrm{vz/s} \tag{15}$$

## Filtrace dat

Měřené pozice je třeba filtrovat, protože jsou ovlivněny vnějším rušením. Při hledání zdroje rušení bylo zjištěno, že nejpravděpodobnějším zdrojem rušení jsou přímo moduly platformy a ne spínané zdroje, jak se původně předpokládalo. Ukázalo se také, že rušení je výrazně potlačeno přidáním vodivé stínící vrstvy pod dotykovou fólii. Standardní odchylku se stíněním podařilo snížit při prvních pokusech přibližně 8-krát. Pro přesnější výsledky by bylo třeba provést další experimenty. Na Sentinelu je implementováno

**Tabulka 4.** Parametry měření polohy z dotykové fólie.

| Parametr | Osa | Hodnota |
|---|---|---|
| Rozměry fólie | X | 150 mm |
| Rozměry fólie | Y | 130 mm |
| Rozlišení A/D převodníku | Obě | 12bit |
| Rozlišení měření | X | 31,7 $\mu$m |
| Rozlišení měření | Y | 36,6 $\mu$m |
| Standardní odchylka surových normovaných dat | X | $1{,}89 \cdot 10^{-3}$ |
| Standardní odchylka surových normovaných dat | Y | $1{,}51 \cdot 10^{-3}$ |
| Standardní odchylka normovaných dat po filtraci | X | $9{,}28 \cdot 10^{-4}$ |
| Standardní odchylka normovaných dat po filtraci | Y | $8{,}16 \cdot 10^{-4}$ |

filtrování váhovaným průměrem. Tento filtr doporučuje například [16]. Naměří se $N$ vzorků, ty se seřadí podle velikosti a $K$ vzorků ze středu se zprůměruje. Filtr pracuje podle vztahu

$$x_{\mathrm{f}} = \sum_{n=0}^{N} b(n)x(n) \tag{16}$$

$$b(n) = \begin{cases} \frac{1}{K}, & \frac{N-K}{2} < n < \frac{N+K}{2} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}, \tag{17}$$

kde $b(n)$ váha n-tého vzorku a $x(n)$ jsou měřené hodnoty osy X seřazené dle velikosti. Při vzorkování pro tento filtr lze navzorkovat kanály postupně. Při vzorkování dat pro jednu filtrovanou pozici se napájení budičů přepíná pouze 4-krát. Pro výpočet filtrované polohy je potřeba navzorkovat $(4N) + 4$ napětí (včetně vyřazených vzorků). Lze tak dosáhnout výstupní vzorkovací frekvence až 1 531 Hz (pro $N = 16$).

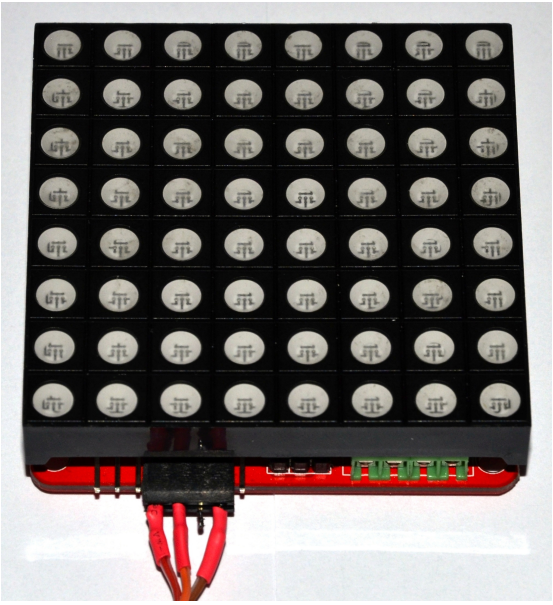
Naměřené parametry popisuje Tab. 4. Je vidět, že filtrování snížilo standardní odchylku přibližně o polovinu. Použitý filtr byl s parametry $N = 16, K = 4$. Dalšího zlepšení je možné dosáhnout již zmíněným stíněním.

## 6.4. Indikační modul

Při práci na platformě se ukázalo, že by bylo praktické mít nějakou indikaci protékajícího proudu přímo u platformy. Pro tento účel byl použit modul Colorduino (Obr. 26), což je maticový displej RGB LED doplněný budičem a procesorem ATMEGA328 [17].

Tento displej zobrazuje stav jednotlivých cívek tak, že kladným střídám odpovídá intenzita červené barvy a záporným střídám intenzita modré barvy. Každou cívku reprezentují čtyři LED. Displej také zobrazuje poslední zaznamenanou polohu kuličky zeleným svitem odpovídající diody.

V procesoru zobrazovací jednotky je implementována pouze obsluha displeje, takže procesor čeká na příchod celého snímku po sériové lince z komunikační desky Sentinel, který pak zobrazí. Jednotlivé snímky jsou sestavovány na desce Sentinel, kde jsou odposlouchávány příkazy směřující na vnitřní sběrnici platformy a udržuje se zde lokální kopie posledního nastavení. Obnovovací frekvence displeje je nastavena na 20 Hz. Displej se skládá z 64 RGB LED tvořících matici, intenzita svitu každé LED je nastavena třemi bajty (8 bitů pro každou barvu), pro odeslání celého snímku je potřeba 192 B.



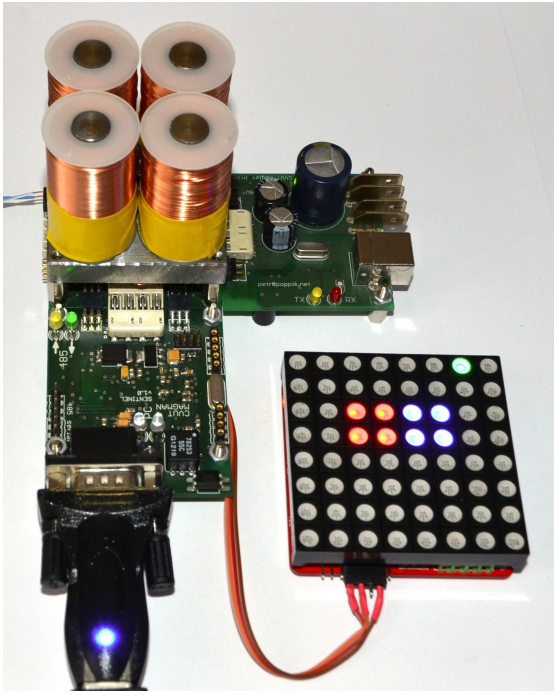
**Obrázek 26.** Indikační modul Colorduino.

Vyrovnávací paměť FIFO bloku UART v procesoru desky Sentinel je 16 bytů veliká. Delší bloky tak nelze odeslat přímo, ale muselo by být blokováno jádro procesoru. Alternativou, které je využita na desce Sentinel, je použít blok přímého přístupu do paměti DMA. V paměti se připraví pole dat, které obsahuje obraz snímku. Adresa začátku tohoto pole se pak předá i s dalším nastavením bloku DMA a zahájí se přenos. Blok DMA pak zařídí, že se do bloku sériové komunikace kopírují postupně jednotlivé prvky tohoto pole nezávisle na probíhajících operacích jádra. Tím je zajištěno, že přenos snímků na displej nebude omezovat hlavní úkoly desky Sentinel.

Dalším opatřením proti omezení prioritních úkolů je princip získání polohy pro zobrazení na displeji. Primárně, pokud přichází z řídícího systému příkazy, se zobrazuje poslední odposlechnutá poloha, která byla změřena na dotaz z řídícího systému. Pokud nepřijde příkaz z řídícího systému po dobu dvou sekund, přejde Sentinel do demonstračního režimu a automaticky si měří polohu kuličky každých 50 ms. Demonstrační režim se ukončí ihned po příchodu jakéhokoli příkazu. Tímto principem je zajištěno, že nemůže dojít ke kolizi při měření polohy, řídící systém má vždy přednost.

## 6.5. Nouzové vypnutí

Posledním úkolem desky Sentinel je nouzové vypnutí v případě ztráty komunikace. Ztráta komunikace může nastat například při chybě v řídícím systému nebo při pádu aplikace v počítači. Pokud nepřijde žádný příkaz po nastavenou dobu (přibližně 5 minut), odešle se všem modulům příkaz *sleep*, který zablokuje všechny H-můstky. Nastavení proudu zůstane v modulech zachováno, což umožní rychlou nápravu při případném nechtěném vypnutí, stačí pouze zaslat příkaz na probuzení systému. Pokud je potřeba udržet moduly aktivní bez odesílání nového nastavení, lze pravidelně (alespoň jednou za 5 minut) posílat z řídícího systému na platformu jakýkoli dotaz (například dotaz na polohu kuličky).




**Obrázek 27.** Injector, indikační modul a Sentinel připojený k testovacímu modulu s demonstrací zobrazení. Pro demonstrační účely byla vypnuta detekce přítomnosti kuličky a tak je zobrazena i bez její fyzické přítomnosti.

# 7. Závěr

V rámci této práce byl upraven firmware modulu platformy MagMan tak, aby mohl být jednoduše kompilován pro obě verze modulu platformy. Byl také testován a připraven na použití bootloader, který umožňuje pohodlně přehrávat firmware v modulech. Dále byly provedeny úpravy umožňující kompilaci pod operačním systémem Windows.

V druhé části práce bylo navrženo a implementováno měření proudu jednotlivými cívkami, které ale není úplně univerzální – pro jeho funkčnost je totiž vyžadováno pevné nastavení frekvence PWM a použití H-můstků v režimu slow-decay (což je běžně splněno). Měření proudu umožnilo rozšířit experimenty týkající se teplotního modelu, díky nimž byl model realizován. Kromě teplotního modelu jsou v práci také popsány další možné řešení ochrany proti nežádoucímu přehřátí. Všechny navržené metody odhadu teploty cívek dosahují dostatečné přesnosti (jednotky stupně Celsia), aby mohly dobře plnit svou funkci. Práce se také krátce věnuje návrhu zpětnovazebního regulátoru proudu. Simulace ukázaly, že může působit na zrychlení ustálení proudu (z 30 ms na 6 ms) a také omezuje statickou regulační chybu při změně napájecího napětí nebo teploty cívky.

Poslední část práce se zabývá zprovozněním jednotlivých částí komunikační desky Sentinel. Zde byla zprovozněna komunikační část do stavu, který umožní používání. Dále je funkční také měření polohy z dotykové fólie, které umožňuje měření polohy s přesností 0,14 mm a vzorkovací frekvencí 1 531 Hz, a zobrazování stavu platformy (proudy cívek, polohy kuličky) na indikačním modulu Colorduino.

Z časových důvodů nebyla provedena implementace a nastavení proudového regulátoru v modulu. Zatím také nebyla provedena instalace bootloaderu na platformu. Všechny zde popsané funkce byly ověřované na dvou testovacích modulech.

Další pokračování projektu by se mělo skládat z nahrání bootloaderu do platformy a implementace zpětnovazebního regulátoru. Také by bylo vhodné provést alespoň některé základní úpravy hardwaru modulů již v rámci instalace bootloaderu, kdy bude platforma rozebraná. Dále je plánována výroba dalších modulů za účelem rozšíření rozměrů platformy. Tomu by mělo předcházet zapracování navržených úprav do revize desky. Možností, kterou by stálo za to zvážit, je také úprava hardwaru měření proudu na plovoucí měření. Úprava by mohla přinést značnou úsporu výpočetního výkonu modulů proti aktuálnímu řešení a také snížení nároků na přesné načasování měření, tím by se dala zvýšit frekvence měření proudu.

# Literatura


[1] Petr svoboda. "Řízení modulů magnetické platformy MagMan, komunikační protokol Elvis".

[2] Viktor Kajm. "MagMan Elvis boot-loader description".

[3] Texas Instruments. *Current Recirculation and Decay Modes*. 2014. URL: http://www.ti.com/lit/an/slva321/slva321.pdf (cit. 05. 05. 2014).

[4] Texas Instruments. *INA210 Datasheet*. 2013. URL: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina213.pdf (cit. 03. 05. 2014).

[5] Analog Devices. *Low Cost, Voltage Output, High-Side, Current-Sense Amplifier*. 2014. URL: http://www.farnell.com/datasheets/690988.pdf (cit. 05. 05. 2014).

[6] Analog Devices. *High Common-Mode Voltage, Bidirectional Current Shunt Amplifier*. 2014. URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8206.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[7] Linear Technology. *High Voltage, Bidirectional Current Sense Amplifier*. 2014. URL: http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1999fb.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[8] Stephen Boyd. *Least-squares*. 2014. URL: http://see.stanford.edu/materials/lsoeldsee263/05-ls.pdf (cit. 05. 05. 2014).

[9] NXP. *LM75 Digital temperature sensor and thermal watchdog*. 2014. URL: http://www.gme.cz/img/cache/doc/969/012/lm75ad-datasheet-1.pdf (cit. 17. 05. 2014).

[10] Linear Technology. *LTC485 Low Power RS485 Interface Transceiver*. 2014. URL: http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/485fk.pdf (cit. 27. 04. 2014).

[11] Ing. Pavel Poucha. *Komunikace pro průmyslových linkách RS485 a RS422*. 2014. URL: http://www.papouch.com/cz/website/mainmenu/clanky/jak-na-to/prumyslove-linky-rs485-a-rs422/ (cit. 07. 05. 2014).

[12] Analog Devices. *Dual-Channel Digital Isolators ADUM1201*. 2014. URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM1200_1201.pdf (cit. 27. 04. 2014).

[13] BURR-BROWN. *TOUCH SCREEN CONTROLLER TIPS*. 2014. URL: http://www.ti.com/lit/an/sbaa036/sbaa036.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[14] Gareth Finn. *New Touch-Screen Controllers Offer Robust Sensing for Portable Displays*. 2014. URL: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/44-02/touch_screen.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[15] Texas Instruments. *Low-Voltage I/O TOUCH SCREEN CONTROLLER*. 2014. URL: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tsc2046.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[16] Texas Instruments. *Reducing Analog Input Noise in Touch Screen Systems*. 2014. URL: http://www.ti.com/lit/an/sbaa155a/sbaa155a.pdf (cit. 01. 05. 2014).

[17] ATMEL. *8-bit Microcontroller Atmega328*. 2014. URL: http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf (cit. 17. 05. 2014).

# Příloha A.

# Navržené úpravy HW

V této příloze jsou popsány jednotlivé hardwarové úpravy, které je vhodné zapracovat do budoucích revizí jednotlivých desek.

## Modul platformy magman

Popisované úpravy se vztahují k desce modulu platformy MagMan verze 3. Některé z popisovaných změn byly ověřeny na testovacím modulu.

### Ověřené opravy

- Přidat rezistory pro nastavení hodnoty při resetu na signálech SLEEP.
- Přidat rezistory pro nastavení hodnoty při nezapojených vstupech na signálech BOOT a RESET (programovací konektor).
- Přidat rezistory pro funkci sběrnice I2C, tedy pull-up na signál SDA, SCL.

### Neověřené opravy

- Přepracovat řešení nastavení klidové hodnoty na sběrnici RS485.
- Zvážit připojení napájecí napětí přes odporový dělič na jeden ze vstupů A/D, např. kanál AD7 (pin 27). Signál SLEEP, který je zde nyní a mohl by být přesunut hned vedle na pin 28.

## Komunikační deska Sentinel

Popisované úpravy se vztahují k desce Sentinelu V1. Některé z popisovaných změn byly ověřeny přímo na desce.

### Ověřené opravy

- Oprava přehozených signálů RX (2–>3) a TX (3–>2) v konektoru RS232
- Připojit signál 485RX_2 k procesoru a umožnit tak Sentinelu odposlech komunikace mezi PC a vnitřní sběrnicí platformy. Nynější deska umožňuje poslouchat pouze odpovědi z platformy.

### Neověřené opravy

- Přepracovat řešení nastavení klidové hodnoty na sběrnici RS485
- Odstranit důvod problémů smyčky v komunikační výhybce nebo s budiči RS485.
- Přidat rezistory pro pro nastavení klidového stavu tranzistorů DC-DC měniče.
- Přidat konektor se sběrnicí I2C pro další rozšíření
- Přidat konektor vstupně-výstupních pinů pro další rozšíření, nebo alespoň testpady.

# Příloha B.

# ElvisV2

Tento dokument rozšiřuje protokol ELVIS V1 [1] o nové funkce a příkazy. Fyzická vrstva a původní příkazy jsou pro zpětnou kompatibilitu zachovány a některé případně rozšířeny. Příkazy, které zde nejsou uvedeny zůstávají platné v nezměněné formě.

Všechna přenášená čísla jsou ve formě šestnáctkového čísla zaspaného pomocí ASCII, pokud není uvedeno jinak.

**Tabulka 5.** Seznam příkazů a jejich význam.

| CMD | Název | Odp. | Kapitola | Popis |
|---|---|---|---|---|
| 0x00 | Ping | ANO | – | Ping pro ověření dostupnosti zařízení |
| 0x01 | Reset | ANO | – | Restartuje zařízení |
| 0x02 | Unlock | ANO | – | Přepne do režimu programování |
| 0x03 | Erase | ANO | – | Připraví sektor FLASH paměti pro programování. |
| 0x04 | Load | ANO | – | Naplní část bufferu pro zápis do FLASH paměti. |
| 0x05 | Write | ANO | – | Zapíše buffer do paměti. |
| 0x06 | Checksum | ANO | – | Vypočítá CRC bloku FLASH paměti. |
| 0x0E | Diagnostic | ANO | B.1 | Získá diagnostický kód modulu. |
| 0x0F | Version | ANO | B.2 | Získá verzi firmwaru. |
| 0x10 | Set one | NE | – | Nastaví jednu cívku |
| 0x11 | Set all | NE | – | Nastaví všechny cívky. |
| 0x12 | Set one with reply | ANO | – | Nastaví jednu cívku, požaduje odpověď. |
| 0x13 | Set all with reply | ANO | – | Nastaví všechny cívky, požaduje odpověď. |
| 0x14 | Sleep | ANO | B.3 | Přepnutí modulu do/z úsporného režimu. |
| 0x15 | Mode | ANO | B.4 | Přepnutí režimu H-můstků. |
| 0x16 | Prescaler | ANO | B.5 | Nastavení frekvence PWM |
| 0x17 | Trigger | NE | B.6 | Synchronizované nastavování |
| 0x37 | Get currents | ANO | B.7 | Získání hodnot měření proudů. |
| 0x38 | Get temperatures | ANO | B.8 | Získání hodnot měření teplot. |
| 0x39 | Get position | ANO | B.9 | Získání pozice z dotykové fólie. |

## B.1. Diagnostika

Příkaz *diagnostic* slouží k vyčtení diagnostického kódu ze zařízení. Jednotlivé chybové stavy popisuje tabulka 7.

**Tabulka 6.** Struktura příkazů a odpovědí na příkaz *version*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Dotaz | 0x0E | | Dotaz na chybový kód |
| Odpověď | 0x0E | 'An' | Odpověď chybovým kódem n |
| Odpověď | 0x0E | 'N' | Nelze provést |

**Tabulka 7.** Chybové kódy modulu platformy

| Kód | Popis |
|---|---|
| 0 | Bez chyby |
| 1 | Porucha výkonové části |
| 2 | Přehřátí cívky |

## B.2. Verze

Příkaz *version* slouží k vyčtení druhu a verze zařízení.

**Tabulka 8.** Struktura příkazů a odpovědí na příkaz *version*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Dotaz | 0x0F | | Dotaz na verzi |
| Odpověď | 0x0F | 'AMagMan HW:vn FW:vm.mm' | Odpověď modulu verze n s firmwarem verze m.mm |
| Odpověď | 0x0F | 'Sentinel vn.nn' | Odpověď Sentinelu s firmwarem verze n.nn |
| Odpověď | 0x0F | 'Bn.nn' | Odpověď bootloaderu verze n.nn |

## B.3. Úsporný režim

Příkaz *sleep* slouží k aktivaci a deaktivaci úsporného režimu. Pokud je znak n '0', znamená to vypnutí úsporného režimu (modul v plném provozu). Znak '1' naopak znamená aktivaci úsporného režimu, modul je vypnut.

V případě automatického vypnutí modulu lze modul znovu aktivovat příkazdem *sleep* s parametrem '0'.

**Tabulka 9.** Struktura příkazů a odpovědí na příkaz *sleep*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x14 | 'n' | Zapnutí/vypnutí *sleep* režimu |
| Dotaz | 0x14 | | Dotaz na stav sleep režimu |
| Odpověď ACK | 0x14 | 'An' | Nastaveno na hodnotu n |
| Odpověď NACK | 0x14 | 'Nn' | Nelze provést |
| Odpověď INFO | 0x14 | 'In' | Aktuální stav je n |

## B.4. Režim H-můstků

Příkaz *mode* může mít jako parametr znak `'1'` nebo `'0'`. Znak `'1'` znamená přepnutí H-můstků do režimu slow-decay, znak `'0'` do režimu fast-decay.

**Tabulka 10.** Struktura příkazů a odpovědí na příkaz *mode*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x15 | `'n'` | Přepnutí režimu |
| Dotaz | 0x15 | | Dotaz na režim |
| Odpověď ACK | 0x15 | `'An'` | Změna na n provedena |
| Odpověď NACK | 0x15 | `'Nn'` | Nelze provést |
| Odpověď INFO | 0x15 | `'In'` | Aktuální režim je n |

## B.5. Frekvence PWM

Příkaz *prescaler* slouží k nastavení frekvence PWM. Požadovaná frekvence PWM je dána vztahem

$$f_{\mathrm{PWM}} = \frac{f_{\mathrm{OSC}}}{2048\,(N+1)} = \frac{72 \cdot 10^6}{2048\,(N+1)}, \tag{18}$$

kde N je parametr děličky nastavovaný příkazem `prescaler`. Parametr se předává ve formě třímístného čísla.

**Tabulka 11.** Struktura příkazů a odpovědí na příkaz *sleep*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x16 | `'nnn'` | Nastavení děličky na hodnotu n |
| Odpověď ACK | 0x16 | `'Annn'` | Nastaveno na hodnotu n |
| Odpověď NACK | 0x16 | `'Nnnn'` | Nelze provést |

## B.6. Synchronizační příkaz

Synchronizační příkaz slouží k synchronizované změně nastavení v modulech. Moduly jsou po zapnutí v režimu automatické změny, takže při příchodu nastavovacího příkazu se nastavení ihned provede. Prvním příchodem synchronizačního příkazu se tento režim až do restartu vypne. Od této změny již nově příchozí nastavení ukládá do záchytných registrů. K provedení nového nastavení dojde vždy až s dalším příchodem synchronizačního příkazu. Na synchronizační příkaz se neodpovídá.

Příklad komunikace:

```
//Přímé nastavení maximálního proudu všech cívek modulu 1
ADR 0x01 CMD 0x11 7FF7FF7FF7FF
//Přepnutí do synchronizovaného režimu
ADR 0x00 CMD 0x17
//Příprava nastavení maximálního proudu všech cívek modulu 1
ADR 0x01 CMD 0x11 7FF7FF7FF7FF
//Příprava nastavení maximálního proudu všech cívek modulu 2
ADR 0x02 CMD 0x11 7FF7FF7FF7FF
//Synchronizované provedení všech připravených nastavení
ADR 0x00 CMD 0x17
```

## B.7. Čtení hodnoty proudů

Příkaz *get currents* je bez parametru slouží k vyčtení aktuálních hodnot proudů z modulu.

**Tabulka 12.** Struktura příkazu a odpovědí na příkaz *get currents*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x37 | | Dotaz na proudy |
| Odpověď ACK | 0x37 | `'Aaaabbbcccddd'` | Přečtené hodnoty proudů. |
| Odpověď NACK | 0x37 | `'N'` | Nelze provést |

Odpovědí je potvrzovací znak `'A'` a 12 ASCII znaků dlouhý řetězec. Tento řetězec se skládá z trojic znaků. Každá trojice znaků je hodnota proudu jedné cívky zapsaná jako šestnáctkové číslo v mA.

## B.8. Měření teploty

Příkaz *get temperature* je bez parametru slouží k vyčtení aktuálních hodnot teplot z modulu. Teploty jsou dostupné pouze pokud jsou připojeny teplotní senzory LM35 na sběrnici I2C nebo jiný zdroj informace o teplotě.

**Tabulka 13.** Struktura příkazu a odpovědí na příkaz *get currents*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x38 | | Dotaz na teploty |
| Odpověď ACK | 0x38 | `'Aaaabbbcccdddeee'` | Přečtené hodnoty teplot |
| Odpověď NACK | 0x38 | `'N'` | Nelze provést |

Odpovědí je potvrzovací znak `'A'` a 15 ASCII znaků dlouhý řetězec. Tento řetězec se skládá z trojic znaků.První trojice reprezentuje teplotu nosné části modulu. Každá další trojice znaků je hodnota naměřené teploty jedné cívky. Pro přepočet na stupně celsia je potřeba hodnoty vydělit osmi.

## B.9. Měření pozice z dotykové fólie

Příkaz *get position* je bez parametru a slouží k vyčtení aktuálních hodnot z dotykové fólie.

**Tabulka 14.** Struktura příkazu a odpovědí na příkaz *get position*.

| | CMD | Tělo zpr. | Význam |
|---|---|---|---|
| Příkaz | 0x39 | | Dotaz na teploty |
| Odpověď ACK | 0x39 | `'Axxxyyypppp'` | Přečtené hodnoty pozice |

Odpovědí je potvrzovací znak `'A'` a 10 ASCII znaků dlouhý řetězec. První trojice může obsahovat číslo od 0 do 4096 a reprezentuje naměřenou polohu v ose X. Druhá trojice odpovídá poloze v ose Y zapsané obdobně. Poslední čtyři znaky reprezentují hodnotu tlak stisku, čímenší číslo, tím větší síla stisku. Hodnoty větší než 0x1000 značí, že detekovaný předmět není dostupný.

# Příloha C.

# Obsah přiloženého CD

Některé přiložené soubory pocházejí z dokumentace platformy MagMan.

## Firmware

Složka *Firmware* obsahuje jednotlivé složky pro každé zařízení, pro které byl firmware vyvíjen (Sentinel, ModulV2, ModulV3, UniversalFW a Colorduino). V každé složce jsou podsložky reprezentující jednotlivé verze FW.

## Matlab

Složka *Matlab* obsahuje naměřená data, skripty pro jejich měření, Simulinkové modely a další testovací skripty.

## Dokumentace

Složka *Dokumentace* obsahuje neuveřejněné citované dokumenty [1] a [2].

## Hardware

Složka *Hardware* obsahuje dokumentace k jednotlivým deskám, které pochází z dokumentace platformy MagMan.

## Bakalarska_prace_Text.pdf

Soubor *Bakalarska_prace_Text.pdf* obsahuje text bakalářské práce shodný s tištěnou verzí.