

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Zobrazovač magnetického pole

Václav Zelený

Vedoucí práce: Ing. David Novotný
Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelený** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **434932**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zobrazovač magnetického pole

Název bakalářské práce anglicky:

Magnetic field display

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte měřicí a zobrazovací jednotku na bázi STM32 mikrokontroléru, která bude v reálném čase vizualizovat magnetické pole. Zobrazovač bude tvořen maticí magnetických sensorů a RGB LED (8x8). Měřené magnetické pole bude vyjádřeno plynulou změnou barvy LED. Měřené veličiny budou také přenášeny do PC pomocí sériové linky a vizualizovány pomocí GUI (např. LabView). Při návrhu bude dbáno na dostatečnou obnovovací frekvenci matice, pro dobrou dynamiku zobrazování (alespoň 50 frame/s). Navržený zobrazovač by mělo být možné řetězit do většího celku při zachování jediného PC interface.

Seznam doporučené literatury:

- [1] RIPKA, P.: Magnetic sensors and magnetometers. Boston: Artech House, 2001. ISBN 15-805-3057-5.
- [2] Vít Záhlava: Návrh a konstrukce DPS, Ben 2010
- [3] VEDRAL, Josef a Jan FISCHER: Elektronické obvody pro měřicí techniku. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02966-2.
- [4] RIPKA, Pavel a Michal JANOŠEK: Advances in Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors Journal [online]. 2010, 10(6), 1108-1116 [cit. 2021-01-22]. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429. ISSN 1530-437x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5443656>
- [5] AN4207: Getting started with STM32F37/38xxx SDADC (sigma-delta ADC) [online]. 2021 [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/d9/90/d7/70/7c/ff/45/6d/DM00070480.pdf/files/DM00070480.pdf/jcr:content/translations/en.DM00070480.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. David Novotný, katedra měření FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **22.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2021/2022

Ing. David Novotný
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Davidu Novotnému za pomoc a podporu, kterou mi poskytl při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. z Katedry elektrotechnologie za pomoc a poskytnutí laboratoře při pájení v peci. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

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 21. 5. 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh a výrobu škálovatelného zobrazovacího zařízení magnetického pole s pomocí programovatelných tříbarevných LED a Hallových senzorů na bázi mikrokontroléru STM32. Jednotlivé desky plošných spojů spolu komunikují pomocí sběrnice UART a jedna z nich se stará o komunikaci s počítačem po sběrnici UART, kde se zobrazuje intenzita magnetického pole. První část práce se zabývá návrhem zařízení, dále následuje popis výroby a programů běžících na mikrokontrolérech a počítači.

Klíčová slova: Hallův senzor, magnetické pole, LED, STM32

Vedoucí práce: Ing. David Novotný

Abstract

This bachelor thesis is focused on the design and manufacture of a scalable magnetic field display device which used programmable three-color LEDs and Hall sensors. Device is based on the STM32 microcontroller, where individual printed circuit boards communicate with each other using the UART bus. One board is responsible for communicating with a PC via UART, which shows the strength of the magnetic field. The first part deals with the design of the device, followed by a description of production and programs running on a microcontroller and computer.

Keywords: Hall sensor, magnetic field, LED, STM32

Title translation: Magnetic field display

Obsah

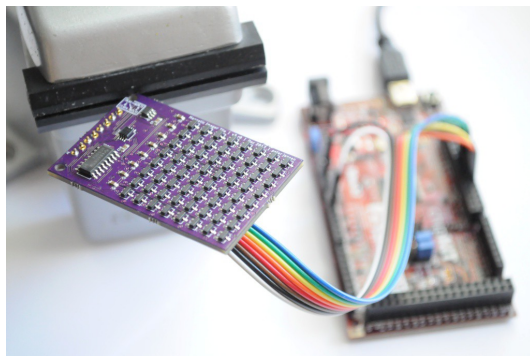
1 Úvod	1	7.3 Čtení hodnot z magnetických senzorů	26
2 Požadavky a návrh	3	7.4 Kalibrace	28
2.1 Měření magnetického pole	3	7.5 Zobrazení dat	28
2.1.1 Fluxgate senzory	3	7.6 Měření počtu snímků za sekundu	29
2.1.2 AMR senzory	4	8 Vizualizace na PC	31
2.1.3 Hallovy senzory	4	8.1 Vykreslování a inicializace	31
2.2 Výběr součástek	5	8.2 Příjem dat	31
2.2.1 LED	5	8.3 Zpracování dat	32
2.2.2 Magnetický senzor	5	9 Ovládání	33
2.2.3 Multiplexor	6	10 Možnosti rozšíření	35
2.2.4 Mikrokontrolér	6	11 Závěr	37
2.2.5 Pomocné obvody	6	Literatura	39
3 Schéma	9	A Seznam příloh	41
3.1 Část mikrokontroléru	9		
3.1.1 Rozvržení pinů mikrokontroléru	9		
3.2 Zobrazovací část	11		
3.3 Senzorová část	11		
4 Návrh desky plošných spojů	13		
4.1 Vrstvy	13		
4.2 Horní strana	13		
4.3 Dolní strana	15		
5 Osazení	17		
5.1 Ruční osazení	17		
5.2 Osazení pomocí podtlakového manipulátoru a pájecí pece	18		
5.2.1 Osazení dolní strany desky plošných spojů	18		
5.2.2 Osazení horní strany desky plošných spojů	19		
5.2.3 Propojení desek	20		
6 Komunikace	21		
6.1 Komunikace LED	21		
6.1.1 Zapojení	21		
6.1.2 Metoda komunikace	21		
6.1.3 Využití SPI jednotky mikrokontroléru ke generování signálu	22		
6.2 Komunikace mezi deskami	23		
6.2.1 Komunikační protokol	23		
7 Firmware mikrokontroléru	25		
7.1 Hlavní smyčka firmwaru, zpracování příchozích dat a odesílání dat	25		
7.2 Příjem dat	26		

Kapitola 1

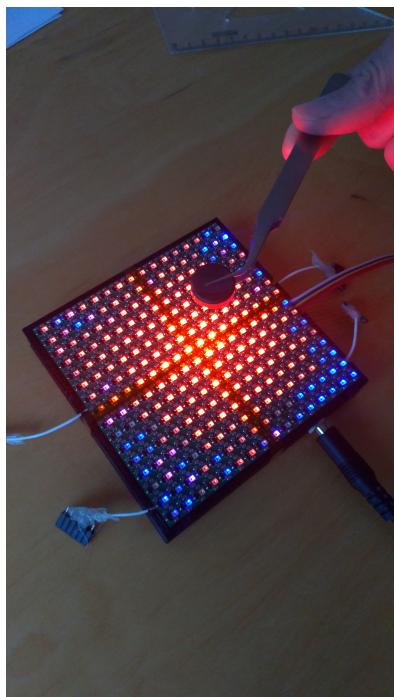
Úvod

Cílem této práce bylo vytvořit zařízení, které by se dalo použít jako demonstrační přípravek na akcích ČVUT FEL. Na horní straně je matice barevných LED a magnetických senzorů, která by měla mít co nejvyšší hustotu, aby se dalo dobře zobrazit měnící se magnetické pole v okolí přiložených předmětů. Proto jsou všechny součástky vybrány v provedení SMD. Data se mají zpracovávat přímo v zařízení, a tak jsou jednotlivé desky vybaveny mikrokontrolérem STM32, kde bylo využito toho, že existují verze s integrovanými sigma-delta analogově digitálními převodníky, čímž se uspoří místo na tak malé desce plošných spojů a zároveň se zjednoduší návrh. Data je potřeba zobrazovat s dostatečnou obnovovací frekvencí, aby obraz vypadal plynule, a tak je výhodné, že tyto integrované převodníky dokáží převádět napětí s frekvencí 16,6 kHz, zároveň mají rozlišení 16 bitů a data se nemusí přenášet po externí sběrnici. Ke komunikaci jak s počítačem, tak i mezi deskami, se používá asynchronní sériová sběrnice (UART).[1]

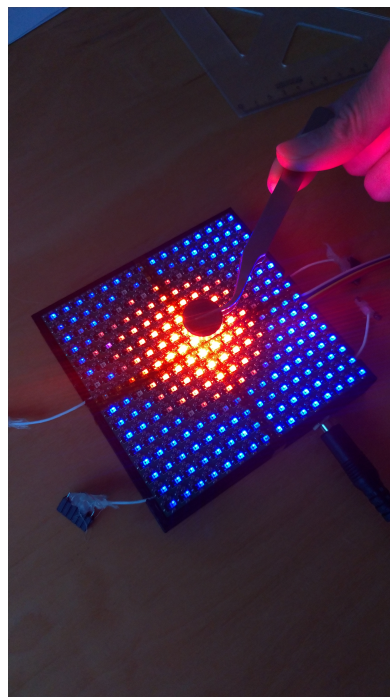
Zadání této práce se inspirovalo projektem, který měří magnetické pole pomocí stejných Hallových senzorů v matici 8 x 8. Tento projekt nezpracovává data na desce, ale používá k tomu externí počítač. Změřené magnetické pole se nezobrazuje přímo na desce, ale až na displeji. Sensory nepokrývají celou horní plochu desky, ale vedle nich je umístěn konektor, AD převodník a čítač ovládající multiplexor. Jedním z cílů mé práce bylo mimo jiné i to, aby bylo možné zvětšovat plochu celého zařízení přiložením dalších desek k sobě. Proto se tyto součástky musely umístit na spodní stranu desky.[2]



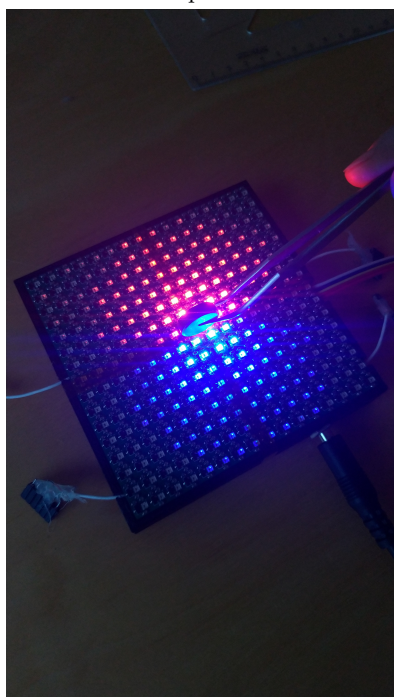
Obrázek 1.1: Fotka projektu, ze kterého pochází inspirace této práce [2]



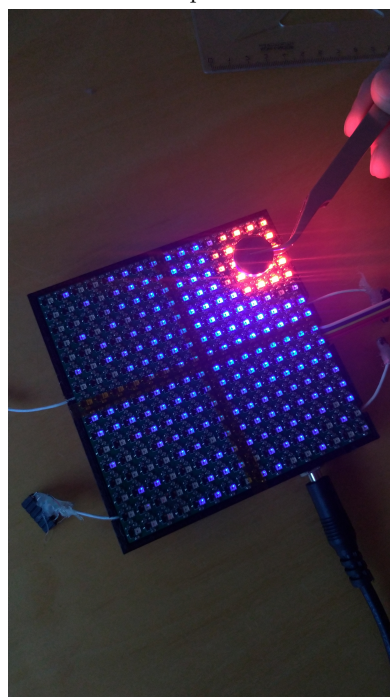
(a) : Umístění magnetu s osou kolmo ve vzdálenosti přibližně 4 cm



(b) : Umístění magnetu s osou kolmo ve vzdálenosti přibližně 2 cm



(c) : Umístění magnetu s osou rovnoběžně ve vzdálenosti přibližně 1 cm



(d) : Umístění magnetu v rohu zařízení. Je zde vidět, že se ostatní desky ztlumí, aby na sebe navazovaly

Obrázek 1.2: Ukázka funkce zařízení

Kapitola 2

Požadavky a návrh

První požadavek byl, aby se daly jednotlivé desky k sobě jednoduše přikládat a tím se dala v budoucnu zvětšovat celková plocha. Desky tedy nesmějí mít na horní straně žádné pomocné obvody a všechny musí být umístěné na spodní stranu, aby na sebe desky dobře navazovaly a nevznikla větší mezera při přiložení dvou desek k sobě, než která je mezi jednotlivými buňkami. Proto musí být mezery od součástek ke krajům desky poloviční než mezi jednotlivými buňkami, a celá plocha tak vypadala celostně.

Jednotlivé desky spolu musí komunikovat, aby si vyměňovaly informace o amplitudách magnetického pole s ostatními deskami, a tak mohly nastavit měřítko (převod mezi měřenou magnetickou indukci a intenzitou svitu LED) tak, aby přechody mezi nimi nebyly pozorovatelné. Původně jsem uvažoval o použití sběrnice CAN, jejíž výhodou je, že se dají jednotlivá zařízení připojit do sítě s topologií hvězdy. Nakonec jsem pro jednoduchost vybral sběrnici UART zapojenou s topologií kruhu. Každá deska přijímá data jen od předchozí desky a posílá je následující desce. Když v této kruhové topologii deska přijme svoje vlastní data, již je dále neposílá. Díky tomuto přístupu každý uzel zná hodnoty na ostatních deskách a jen jedna (libovolná) deska se tak může starat o komunikaci s počítačem.

Dále bylo potřeba dosáhnout dostatečné obnovovací frekvence, aby byl vjem z pozorování dostatečně plynulý.

Posledním požadavkem bylo, aby celé zařízení mohlo komunikovat s počítačem a zobrazovat na něm měřené veličiny. V tomto případě byla také použita sběrnice UART. Výhoda tohoto řešení je široká dostupnost převodníků UART USB a spolehlivost.

2.1 Měření magnetického pole

2.1.1 Fluxgate senzory

Tyto senzory fungují na principu indukce napětí v měřící cívce, která je navinuta na magneticky měkkém jádře. Na stejném jádře je namotána budící cívka, kterou je pouštěn střídavý proud. To způsobuje periodickou saturaci jádra, která vlivem měřeného magnetického pole přestane být symetrická. Při vhodném prostorovém uspořádání jádra (jader) a budící cívky se v měřící

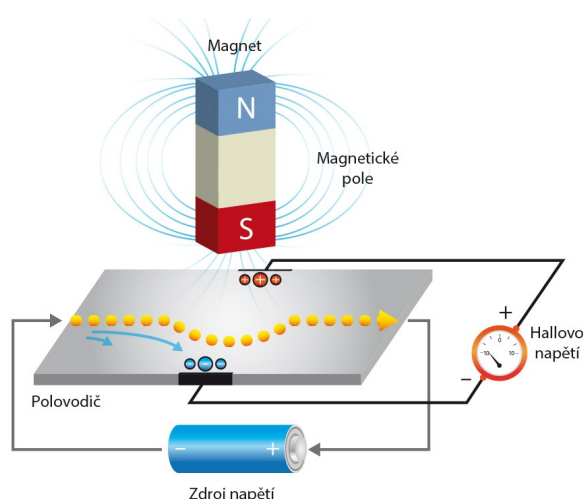
cívce indukuje napětí způsobované pouze externím magnetickým polem. Tyto senzory mají velkou citlivost, ale nezvládají měřit magnetická pole silnější než jednotky mT. Navíc kvůli nutnosti jádra zabírají větší velikost a mají větší spotřebu. Pro použití v této práci se nehodí kvůli velikosti a neschopnosti měřit silnější magnetická pole. [3]

2.1.2 AMR senzory

AMR senzory jsou založeny na principu anizotropní magnetorezistence (AMR). Ta spočívá v tom, že materiál vlivem natočení vektoru vlastní magnetizace vnějším magnetickým polem mění svoji vodivost. Jsou citlivější než senzory založené na Hallově jevu, ale nehodí se pro velké rozsahy měření (max. 1 mT) a jsou komerčně dostupné jen ve velkých pouzdrech (SOIC, ...). AMR senzory měří magnetické pole rovnoběžně s osou magnetu, ale zde je potřeba měřit intenzitu pole v ose magnetu. Ze uvedených důvodů se nehodí k použití v této práci. [3]

2.1.3 Hallový senzory

Tyto senzory jsou založeny na principu Hallova jevu. Pokud polovodičem protéká proud, který je umístěn v magnetickém poli, tak jsou vlivem Lorenzovy síly nosiče náboje vychylovány na jednu stranu. Kolmo na protékající proud a kolmo na magnetické siločáry tak vzniká napětí úměrné proudu a intenzitě magnetického pole. Tento jev se objevuje i u vodičů, jen je mnohem slabší. Hallový senzory využívají tento jev tak, že měří napětí na polovodiči, kterým kolmo protéká známý proud. Výhoda Hallového senzoru je, že dokáže měřit širší rozpětí magnetických polí, a protože je tvořen polovodičem, jde vyrobit na stejném čipu, na kterém jsou i měřicí obvody. Nevýhodou je, že vlivem velkého vlastního šumu nedokáže měřit velmi slabá magnetická pole, ale to pro použití v této práci není limitující. [3]



Obrázek 2.1: Hallův jev [4]

■ 2.2 Výběr součástek

Celá deska je napájena z externího zdroje pět voltů.

Nejdůležitější byl výběr LED a magnetického senzoru tak, aby byly dostatečně malé a společně tvořily co nejmenší buňku. To umožní zobrazení více detailů magnetického pole na menší ploše.

■ 2.2.1 LED

LED jsem vybral WS2812C-2020. [5] Je to trojbarevná plynule regulovatelná LED s vlastním budičem jednotlivých barev. Díky integrovanému PWM budiči se nemusí použít žádné externí řízení, které by bylo neúměrně velké (3 barvy x 64 LED).

Nastavování intenzity a barvy jednotlivých LED se provádí pomocí digitálního signálu, kde se jednotlivé bity kódují do délky pulzu. Podrobněji je to rozebráno v kapitole 6.1 Komunikace LED.

Jednotlivé LED se dají řetězit za sebe. Výstup jedné se připojí na vstup druhé, kde při délce řetězu 1024 LED se dá dosáhnout obnovovací frekvence 30 Hz. Všechny LED jde tedy ovládat pouze jedním pinem procesoru.

Velikost jedné této LED je pouhých dva krát dva milimetry, což umožní malou velikost desky. Při plném svitu všech 3 barev je však limitujícím faktorem vzniklé teplo ($5V$ napájení x 20 mA/LED x 3 barvy = $0,3$ W/LED). V mém případě ale svítí jen jedna barva (modrá/červená), proto problém s přehříváním nenastává.

■ 2.2.2 Magnetický senzor

Magnetický senzor jsem vybral stejný, jaký je použit v projektu, ze kterého jsem se inspiroval. Tedy jednoosý Hallův senzor DRV5053OAQDBZ s teplotní kompenzací a integrovaným regulátorem napětí.

Je to varianta s nejnižší citlivostí -11 mV/mT. Ta dovolí měřit magnetická pole s větším rozsahem hodnot až ± 73 mT. Vlastní (magnetický) šum by přitom měl být podle katalogového listu stejný. Nižší citlivost je poté kompenzována použitím citlivého sigma-delta převodníku (SDAD), integrovaného v řídicím mikrokontroléru STM32. Výstup senzoru je napětí s rozsahem 200-1800 mV. Napětí jeden volt odpovídá nulovému magnetickému poli. [6]

Na výstupu každého Hallova senzoru je připojena dolní propust s mezní frekvencí 159 Hz, která má vyfiltrovat případný šum. Obnovovací frekvence zařízení je sice jen okolo 60 Hz, ale dá se očekávat, že magnetické pole v okolí se bude měnit jen s frekvencí pár desítek Hz, kterých se dá dosáhnou pohybem ruky, a proto by měla být dostačující.

Integrovaný regulátor napětí uvnitř každého Hallova senzoru umožňuje napájení z hlavního napětí pět voltů za cenu toho, že se každý senzor stane malým zdrojem tepla.

■ 2.2.3 Multiplexor

Multiplexor 74HCT4067 [7] je vybrán zase podle projektu, ze kterého jsem se inspiroval, protože má dobrou cenu a splňuje požadavky (především velké množství vstupních kanálů).

Každá deska používá čtyři multiplexory, kde každý obsluhuje matici 4 x 4 magnetické senzory. Každý multiplexor sníží počet potřebných vodičů od procesoru z šestnácti na pět až šest. Čtyři výběrové/řídicí, které vyberou požadovaný senzor na vstupu multiplexoru. Jeden výstupní, který je propojený na AD převodník mikrokontroléru a čte se z něho napětí na Hallově senzoru, a popřípadě další, který se dá použít k aktivaci celého multiplexoru. Tento poslední jsem sice zapojil, ale nakonec se nevyužívá a všechny multiplexory jsou neustále zapnuté.

Protože výběrové vodiče jsou pro všechny multiplexory společné a multiplexory jsou připojeny po dvojicích ke dvěma SDAD převodníkům, tak celkový počet vodičů je snížen z šedesáti čtyř na deset. Počet vodičů by se dal ještě snížit o čtyři, kdyby se v době návrhu nezapojily později nepoužívané aktivační vodiče.

■ 2.2.4 Mikrokontrolér

Vybral jsem mikrokontrolér STM32F373C8T6 s jádrem ARM 32-bit Cortex-M4 a maximální frekvencí 72 MHz. Ten poskytne dostatečný výpočetní výkon pro práci s daty a zároveň umožní i komunikaci s dostatečnou datovou propustností.

Mikrokontrolér obsahuje tři hardwarové jednotky UART. Jedna se použije pro komunikaci mezi jednotlivými deskami a další se použije u jedné z desek pro komunikaci s počítačem. Dále je vybaven třemi SDAD převodníky, z nichž použiji jen dva. Použití třetího by výrazně zvýšilo komplexnost firmwaru a nepřineslo by to výrazné zvýšení obnovovací frekvence. Tento mikrokontrolér obsahuje rozhraní SWD (Serial Wire Debug), přes které se dá programovat a také ladit a krokovat program.

Výhodou je velikost pouze sedm krát sedm milimetrů, která zabere na omezené ploše desky málo místa. [1]

■ 2.2.5 Pomocné obvody

Vedle všech hlavních prvků, které přímo zajišťují měření, zpracování, komunikaci a zobrazování, se nachází několik pomocných obvodů.

Kvůli poměrně nízké vstupní impedanci SDAD (47 k Ω v nejhorším případě) a naopak vysoké impedanci dolní propusti za každým Halloovým senzorem (10 k Ω), je za každým multiplexorem operační zesilovač v zapojení sledovače napětí a následnou dolní propustí s malou impedancí. [8]

Mezi procesorem a první LED se nachází převodník napěťové úrovně (3,3 V na 5 V), protože mikrokontrolér pracuje na napětí 3,3 V a LED s napětím 5 V, logické úrovně vycházely na hraně kompatibility.

K procesoru je připojen externí oscilátor s frekvencí 16 MHz, který je potřeba pro správnou funkci UART. Dal by se použít i vnitřní zdroj hodinového signálu, ale pro komunikaci na vyšších rychlostech by to mohlo způsobovat chyby. K procesu je dále připojena napěťová reference 2,048 V (LM4040DIM3X-2.0) pro SDAD převodníky (definuje jejich rozsah, proto bylo výhodné zvolit referenční napětí odpovídající rozkmitu výstupu senzorů).

Dále se na desce nachází konektory, filtrační kondenzátory a jedna normální LED. Normální LED je v návrhu pro případ ladění programu, pokud by se nepodařilo zprovoznit komunikaci s digitálními LED. Nakonec nebyla vůbec osazena, stejně jako konektory, místo kterých se připájely přímo vodiče.

Kapitola 3

Schéma

Pro vytvoření schématu jsem použil open-source program KiCad, který umožňuje vytvářet elektronická schémata a obsahuje i velkou databázi běžně používaných součástek.

Kompletní schéma je k dispozici v přílohách ve formě KiCad projektu a v PDF.

3.1 Část mikrokontroléru

V této části se nachází mikrokontrolér, zdroje napětí 3,3 V a referenčního napětí 2,048 V, oscilátor, konektory, převodník napěťových úrovní, pomocná LED a hlavní zálohovací kondenzátor.

3.1.1 Rozvržení pinů mikrokontroléru

Pin NRST slouží k restartování celého mikrokontroléru, když se na něm objeví napětí nižší než 0,3x napájecí napětí po dobu delší než 100 ns. Tento pin má vnitřní pull-up rezistor, takže je k němu připojen jen doporučený externí kondenzátor, aby nedošlo k náhodnému restartování vlivem rušení. Tento pin se používá k programování přes rozhraní SWD.

Pin VREFSD+ slouží jako referenční napětí pro SDAD převodníky.

K pinu PF0 je připojen externí zdroj hodinového signálu (krystalový oscilátor) o frekvenci 16 MHz. Pin PF6 je připojen na signál s označením SINC, původním účelem tohoto signálu byla synchronizace mezi jednotlivými deskami. Nakonec tento signál nebyl k synchronizaci využit, v plánu je jeho využití na uživatelské tlačítko pro zafixování škálování na všech deskách současně.

Pin PF7 je připojen k signálu SINC_JMP, který je připojen ke dvou pinovému konektoru. Druhý pin tohoto konektoru je připojen k napětí 3,3 V. Původní účel tohoto signálu byla možnost vybrat propojkou hlavní desku, která by se starala o řízení komunikace a podobně. Protože toho lze dosáhnout jednodušeji úpravou programu, tak se tento signál taky v programu nepoužívá.

K pinu PD8 je připojena pomocná LED, jelikož se nevyskytly problémy, k jejímž řešení by mohla pomoci, tak není ani osazena.

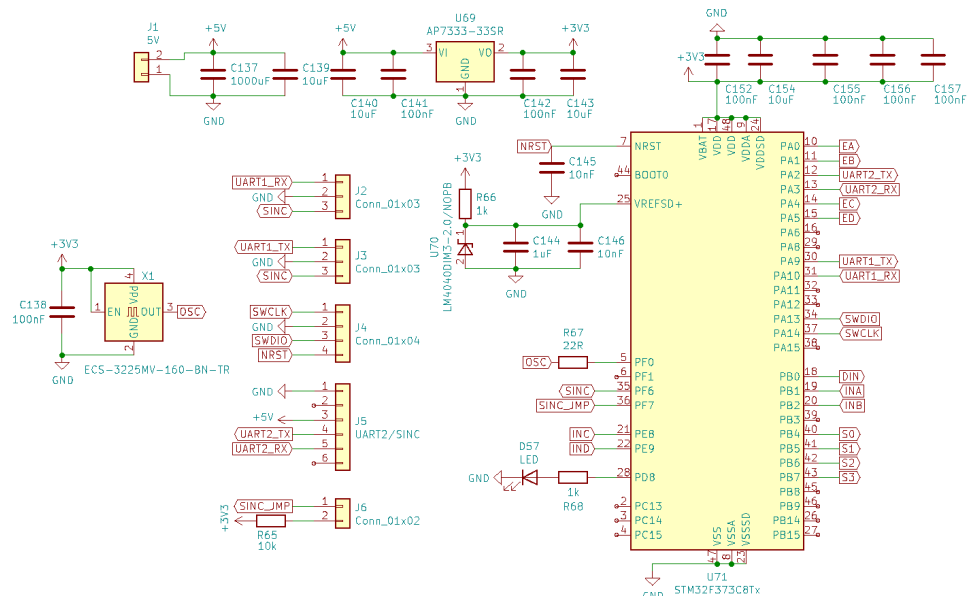
Piny PA0, PA1, PA4 a PA5 slouží k aktivaci a deaktivaci multiplexorů. Vzhledem k tomu, že multiplexory jsou nakonec stále aktivní, tak tyto signály nejsou použity a jsou neustále v logické nule, kdy jsou multiplexory aktivní.

Piny PA2 a PA3 slouží pro druhou jednotku UART, která se používá ke komunikaci s počítačem. Jsou připojeny na šesti pinový konektor se zemí a napájením, které se většinou používá u převodníků UART USB.

Piny PA13 a PA14 jsou připojeny ke signálům SWCLK a SWDIO, které jsou se signálem NRST a zemí připojeny na čtyř pinový konektor sloužící k programování a ladění přes rozhraní SWD.

Na pinu PB0 (signál DIN) probíhá komunikace s nastavitelnými LED, které ale používají napětí 5 V, a proto je ještě mezi mikrokontrolérem a první LED převodník napětových úrovní z 3,3 V na 5 V. Piny PB1, PB2, PE8 a PE9 slouží jako vstup pro SDAD převodníky, který probíhá pomocí signálů s názvy INA, INB, INC a IND.

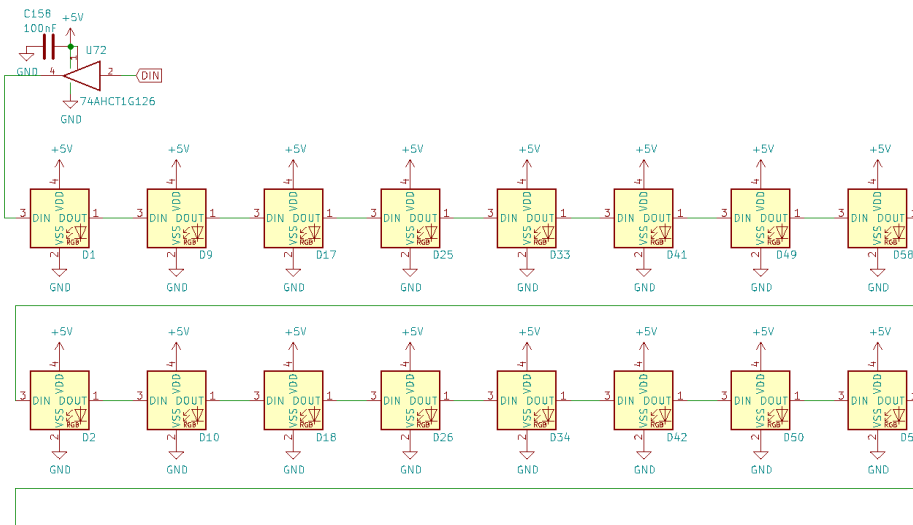
Piny PB4 až PB7 (signály S0 až S3) slouží k vybrání vstupu na všech multiplexorech.



Obrázek 3.1: Část schématu s mikrokontrolérem

3.2 Zobrazovací část

V této části se nachází převodník napětových úrovní, který je připojen k mikrokontroléru přes signál DIN. Jeho výstup je přiveden na první digitální LED. Její výstup je připojen na vstup další LED v řadě, a tak dále dokud nejsou všechny LED propojeny. U jednotlivých LED nejsou použity filtrační kondenzátory, protože by se již nevešly na horní stranu desky s tak velkou hustotou součástek. Poté by se musela zvětšit velikost buňky a tím i celé desky. Proto LED sdílí filtrační kondenzátor s Hallovyými senzory.



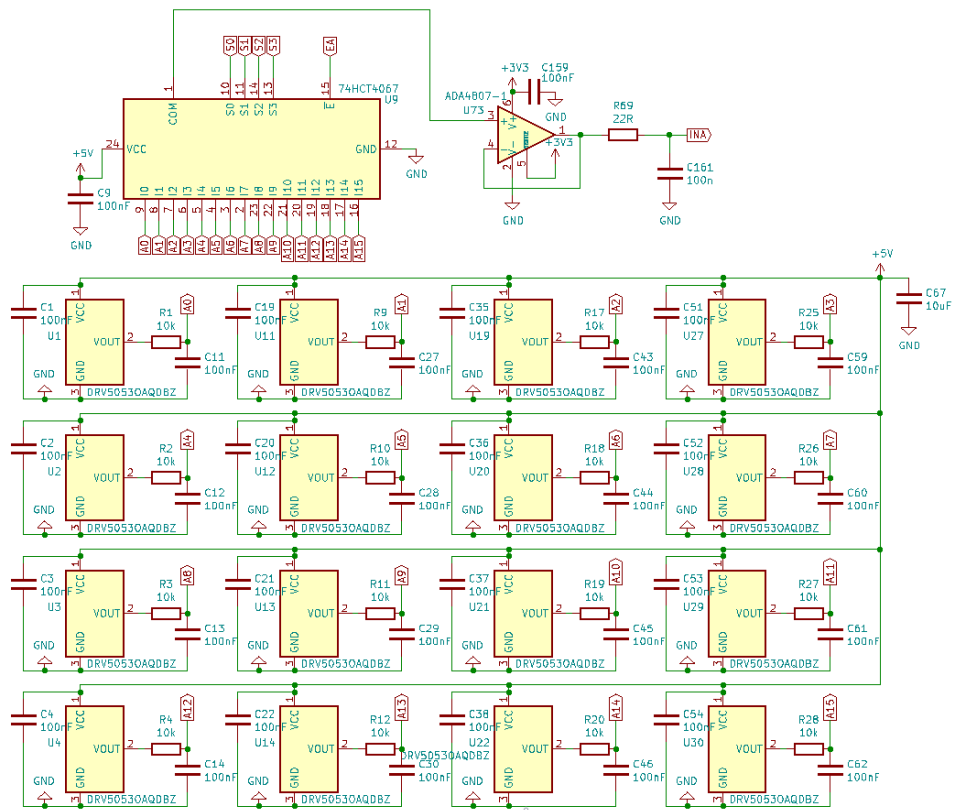
Obrázek 3.2: Zapojení prvních 16 LED

3.3 Senzorová část

Jednotlivé senzory jsou rozdělené na čtyři šestnáctice. Ke každé šestnáctici patří jeden multiplexor. Každá šestnáctice má označení A až D. Následně je popsána jen šestnáctice A. Ostatní jsou zapojeny obdobně, jen je v názvech signálů použito jiné písmeno.

Každý Hallův senzor má v napájení blokující kondenzátor, který je společný s přidruženou LED. Výstup senzoru je připojen k dolní propusti, která je složena z rezistoru o hodnotě 10 k Ω a kondenzátoru o velikosti 100 nF. Výstup tohoto filtru je pro každý senzor označen jako signál A0 až A15. Tyto signály jsou přivedeny na vstup multiplexoru. Pomocí signálů S0 až S3 je vybrán vstup (binárním číslem), který je pak propojen s pinem COM. Za multiplexorem je zapojen operační zesilovač jako sledovač napětí. Signál z něho jde přes dolní propust a výstup z ní je označen jako signál INA, který je pak připojen k mikrokontroléru.

3. Schéma



Obrázek 3.3: Zapojení jedné šestnáctice senzorů

Kapitola 4

Návrh desky plošných spojů

K návrhu desky plošných spojů jsem jako u schématu použil program KiCad. Pouzdra všech součástek se podařilo najít v katalogu, kromě pouzdra digitálních LED, které jsem překreslil z katalogového listu.

Pro datové spoje jsem použil šířku spoje 0,16 mm a pro 3,3V/5V napájecí spoje šířku 0,25 mm, hlavní napájení 5 V je realizováno „rozlitou mědí“ v jedné z vrstev.

4.1 Vrstvy

Celá deska se skládá ze čtyř vrstev. Horní strana slouží pro měření magnetického pole a jeho zobrazování. Jsou zde tedy Hallovy senzory a LED. Dále tu jsou filtrační kondenzátor pro každou dvojici senzoru a LED. U každého senzoru je dolní propust, která by se již na spodní stranu nevešla. Zbytek součástek se nachází na druhé straně desky.

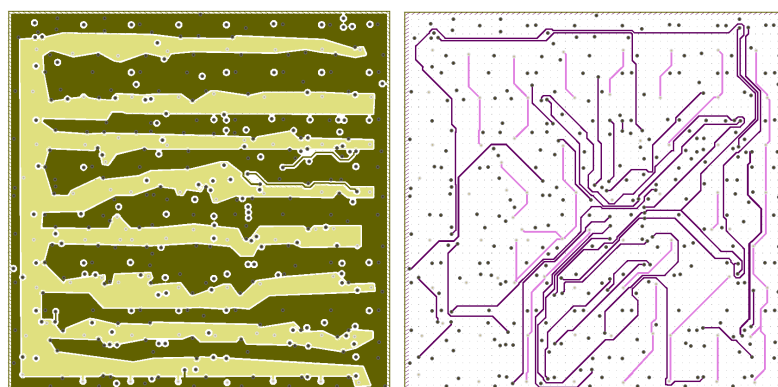
Dvě prostřední vrstvy měly v prvním návrhu sloužit pouze pro napájení 5 V a zem a všechny signály měly vést pouze po horní a spodní straně desky. Kvůli vysoké hustotě součástek se jedna vnitřní vrstva musela použít pro signální vodiče. Druhá vnitřní vrstva se použila jak pro napájení 5 V, tak i pro zem, viz obrázek 4.1a. Díky symetričnosti horní vrstvy se podařilo pod každou řadou buněk udělat širokou cestu rozlité země a napájení.

Ve vrstvě se signály je navíc rozlita zem, a prokovy připojené na 5 V jsou občas vertikálně propojeny, viz obrázek 4.1b. To by mělo přispět k tomu, že napájení i zem bude mít co nejnižší impedanci.

4.2 Horní strana

Aby velikost buňky byla co nejmenší, je u všech kondenzátorů a rezistorů na horní straně desky použito SMD pouzdro o velikosti 0603, tedy 0,06 x 0,03 palce, což odpovídá velikosti 1,55 x 0,85 mm. Tato velikost dovoluje součástky ještě osazovat jednoduše ručně. Podařilo se mi dosáhnout velikosti jedné buňky 6,5 x 6,5 mm. Celková velikost desky s maticí 64 buněk je tedy 52 x 52 mm.

Každá buňka se skládá z Hallova senzoru, vedle kterého je umístěna LED. Obě tyto součástky jsou otočeny tak, aby napájecí vývod byl na spodní straně.

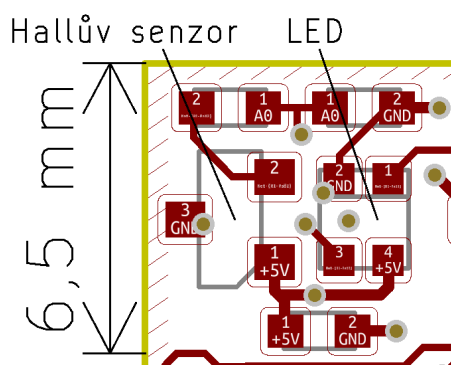


(a) : Napájecí vrstva se světle vyznačeným napájením 5 V a tmavě vyznačenou zemí

(b) : Signální vrstva s bledě fialově vyznačeným napájením 5 V

Obrázek 4.1: Vnitřní vrstvy

Tak mohou mít společné napájení a tím se ušetří místo. Pod každou touto dvojicí je umístěn společný filtrovací kondenzátor. Nad ní je umístěna dolní propust složená z kondenzátoru a rezistoru. Mezi nimi je prokov na spodní stranu, kde je připojen multiplexor.

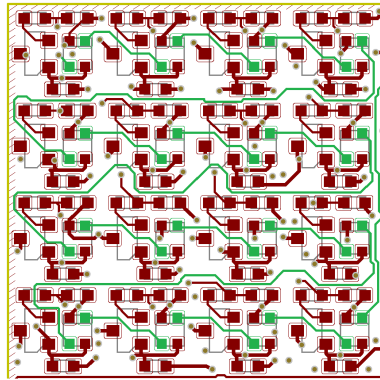


Obrázek 4.2: Jedna buňka složená z Hallova senzoru, LED a filtru

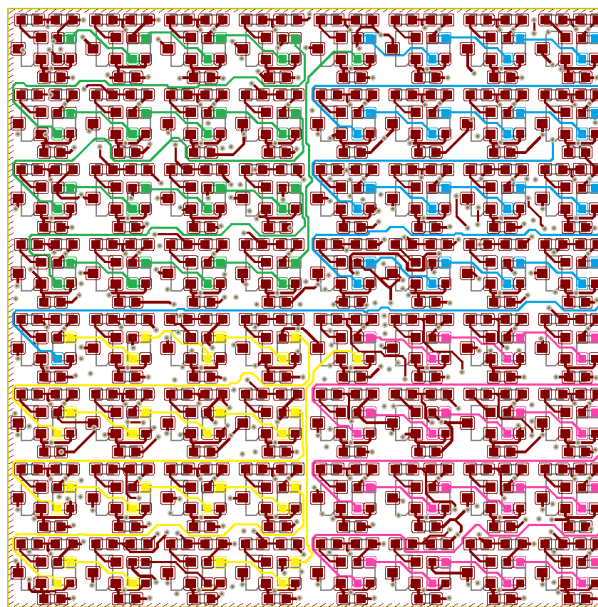
Tyto buňky jsou poté složeny do šestnáctic. Každá LED z buňky je připojena na následující LED v další buňce, když se dosáhne konce řádku v šestnáctici, tak se pokračuje na začátku dalšího řádku.

Celá tato šestnáctice je na spodní straně připojena k jednomu multiplexoru. Konec jedné šestnáctice je poté připojen na začátek další šestnáctice.

Takovéto propojení LED má za následek, že když se přečtou napětí na jednotlivých senzorech postupným zvyšováním indexu na multiplexoru, tak se tyto data uloží za sebe do pole ve správném pořadí. Díky tomu se nemusí provádět žádná transformace pořadí jednotlivých hodnot, aby se správně zobrazily na jednotlivých LED.



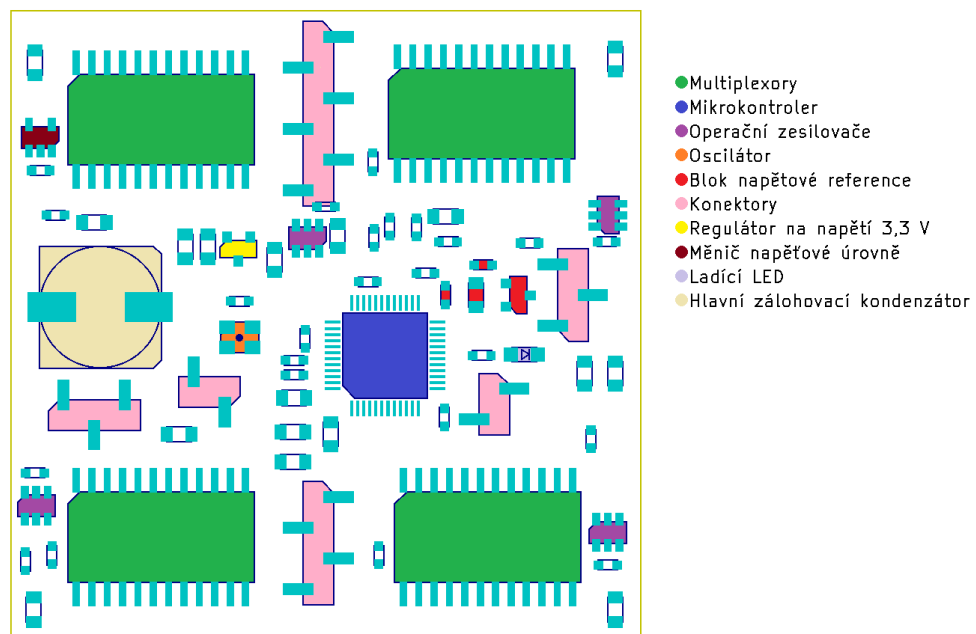
Obrázek 4.3: Zeleně vyznačený propojení LED



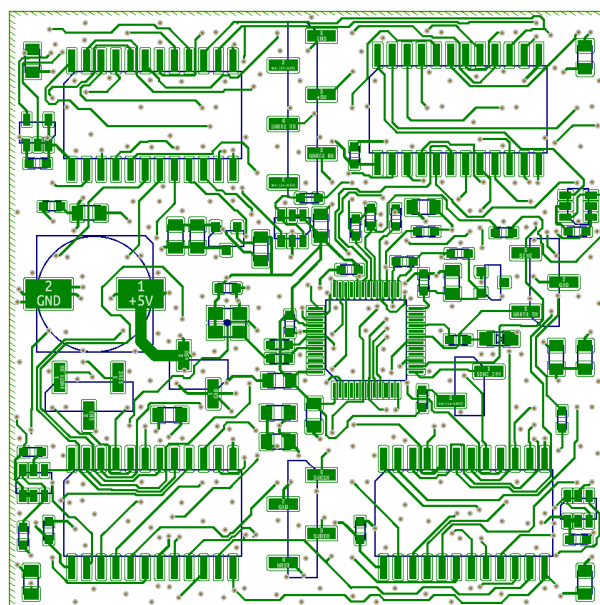
Obrázek 4.4: Barevně vyznačené propojení LED

4.3 Dolní strana

Na spodní straně jsou všechny ostatní součástky. V rozích jsou umístěny multiplexory s operačními zesilovači, aby byly co nejbližší šestnácti senzoru na horní vrstvě. Uprostřed je umístěn mikrokontrolér. Okolo něj jsou rozmístěny pomocné obvody, jako je oscilátor, přesná napěťová reference a regulátor napětí. V levém horním rohu je umístěn převodník napěťových úrovní pro signál ovládající LED. Hlavní zálohovací kondenzátor je umístěn nad rozlitou měď, která souží pro napájení 5 V, ve vnitřní napájecí vrstvě. Konektory jsou rozmístěny do zbylých míst.



Obrázek 4.5: Barevně označené jednotlivé funkční části na spodní straně desky



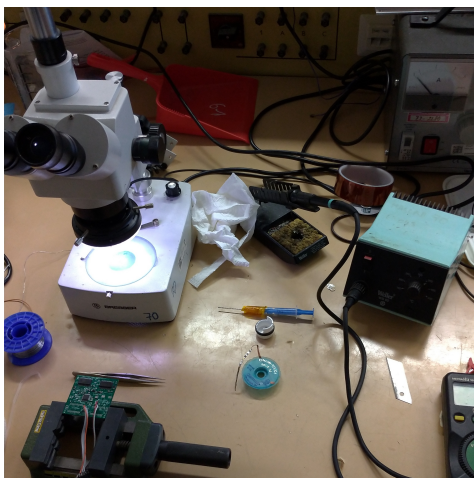
Obrázek 4.6: Spodní strana desky se spoji

Kapitola 5

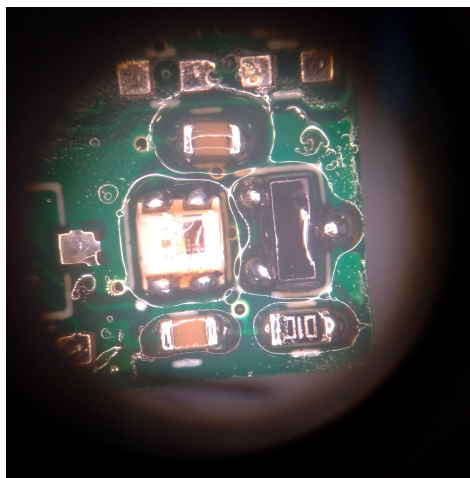
Osazení

5.1 Ruční osazení

První desku jsem osazoval ručně s pomocí mikropáječky a stereoskopického mikroskopu. Prvně jsem osadil spodní stranu s procesorem, multiplexory a pomocnými odvody. Poté jsem postupně osadil horní stranu desky Hallovými senzory, LED, kondenzátory a rezistory. Protože jsou LED určeny pro pájení pomocí pece s maximální teplotou 240 °C, přestalo několik kusů LED po ručním napájení fungovat a musely být vyměněny. Celý tento proces trval asi pět dní celodenní práce, při kterém se muselo vyhodit několik LED, a proto se zbylé tři desky osadily pomocí podtlakového manipulátoru a pájecí pece.



(a) : Mikroskop a mikropájecí stanice



(b) : Pohled do mikroskopu

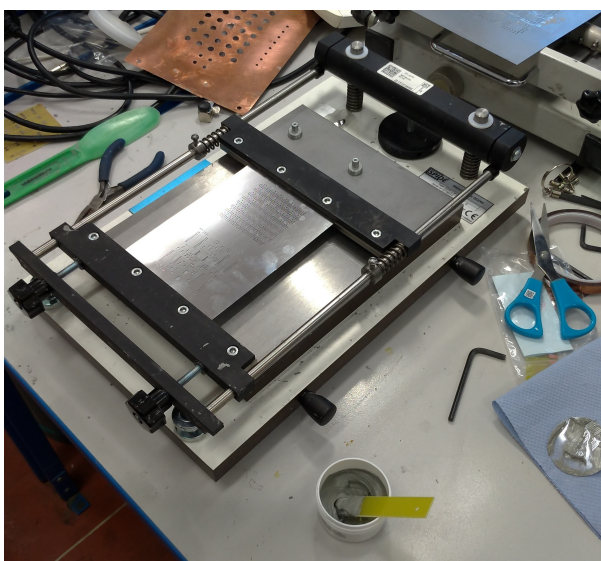
Obrázek 5.1: Fotky z ručního pájení

5.2 Osazení pomocí podtlakového manipulátoru a pájecí pece

Osazení a pájení se podařilo domluvit na Katedře elektrotechnologie, kde mi bylo zapůjčeno potřebné vybavení.

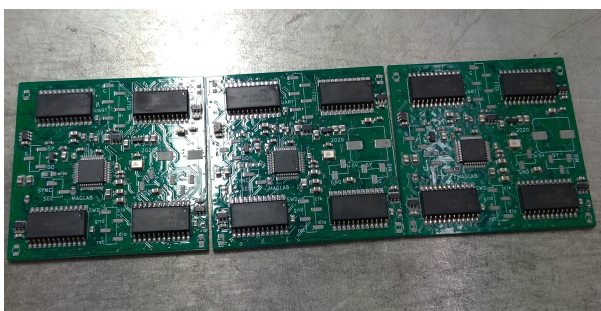
5.2.1 Osazení dolní strany desky plošných spojů

Nejprve se do upínáku připevnila šablona pro nanesení pájecí pasty, pod kterou se přesně vycentruje deska tak, aby se pájecí plošky kryly s dírami v šabloně a nanese se pájecí pasta.



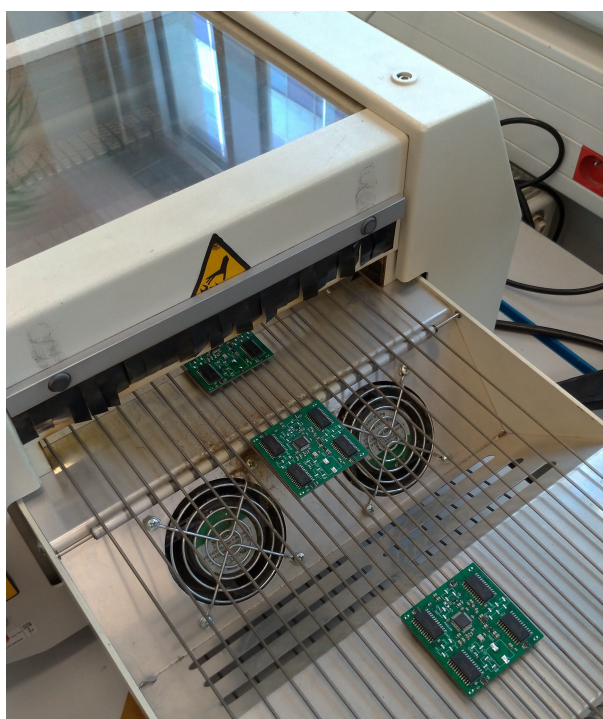
Obrázek 5.2: Upínák na šablony

Pak se pomocí podtlakového manipulátoru umístily všechny součástky na svá místa.



Obrázek 5.3: Desky s nanesenou pastou a s částečně umístěnými součástkami

Po přehřátí pece a natavení potřebného teplotního profilu se jednotlivé desky zapájely.



Obrázek 5.4: Pájecí pec

Protože pouzdro mikrokontroléru má jednotlivé nožičky blízko sebe, tak se během tohoto procesu některé navzájem zkratovaly a musely se ručně opravit.

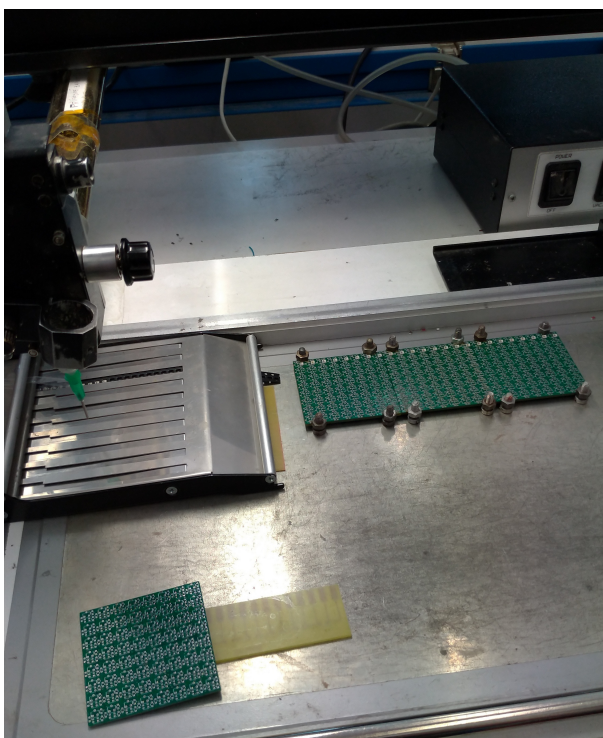
5.2.2 Osazení horní strany desky plošných spojů

Pro osazení horní strany desky se použila pájecí pasta s nižší teplotou tání, aby se neodpály součástky na druhé straně desky při druhém průchodu pecí.

Po vycentrování desek v upínáku se nanasla druhá pájecí pasta. Poté se, na rozdíl od prvního postupu s dolní stranou, musely do rohů každé desky přiroubovat šroubky, které sloužily jako nožičky pro druhý průchod pecí. Ty se postavily na kousky laminátu, takže součástky, které byly na spodní straně, se během pájení v peci nedotýkaly spodku pece.

Deska s nanesenou pájecí pastou se srovnala s pásem součástek tak, aby při umísťování stačilo jen součástku zvednout a položit. Manipulátor totiž zachová úhel, s kterým součástky drží. To umožní rychlé osazení.

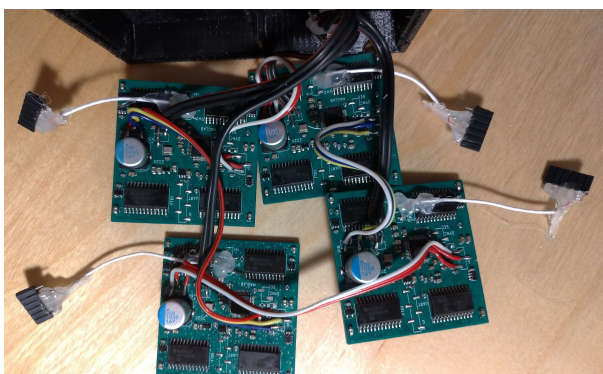
Po umístění všech součástek se deska znovu vložila do pece s jiným teplotním profilem, kde se zapájela horní strana. Po odstranění pomocných šroubů se na uvolněné místo ručně napájely chybějící součástky. Celková doba osazení zbylých tří desek pomocí této metody byla jeden celý den (pro srovnání pájení jedné desky ručně trvalo pět dní).



Obrázek 5.5: Umistování součástek na horní stranu

■ 5.2.3 Propojení desek

Po napájení všech desek se propojily sousední desky pomocí sběrnice UART tak, že se v kruhu mezi sousedními deskami propojily signály UART1_TX a UART1_RX. Z jedné desky se vyvedla sběrnice od jednotky UART2 pro komunikaci s počítačem. Z každé desky se vyvedlo rozhraní SWD pro programování a jednotlivé desky při připojily k napájecímu konektoru.



Obrázek 5.6: Propojení všech desek

Kapitola 6

Komunikace

6.1 Komunikace LED

Komunikace mezi mikrořadičem a LED probíhá pomocí proprietárního protokolu výrobce, kde jednotlivé bity jsou kódovány do delších, pro logickou jedničku, nebo kratších, pro logickou nulu, impulzů. Tento protokol jsem neobjevil v žádném standardu. Dokonce se může lišit v různých parametrech pro odlišné série LED. Například v pořadí kódování barvy a délce pulzů.

6.1.1 Zapojení

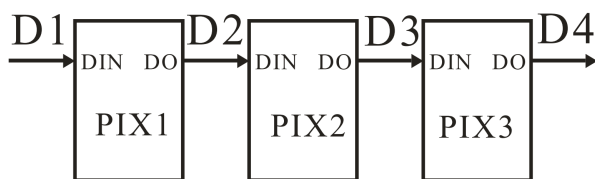
Jednotlivé LED mají jeden digitální vstup a jeden digitální výstup, a tak se dají řetězit za sebe do dlouhého řetězce. Podle výrobce se dá za sebe zapojit 1024 LED při obnovovací frekvenci 30 Hz. Celková délka řetězce, ale není teoreticky omezena.

6.1.2 Metoda komunikace

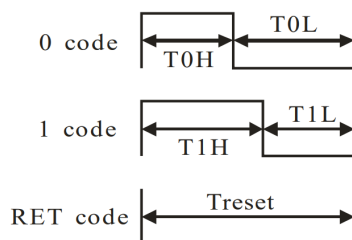
Jednotlivé bity jsou přenášeny, jak už bylo zmíněno, šířkou pulzu, viz tabulka. Pro ukončení přenosu se zařadí delší pulz (RESET) s hodnotou logické nuly, čímž se přenos ukončí.

Z jednotlivých bitů se skládá 24 bitů dlouhá informace pro určení intenzity svitu pro jednotlivé barevné kanály LED. U tohoto modelu prvních osm bitů udává intenzitu pro zelenou barvu, dalších osm bitů pro červenou barvu a posledních osm bitů pro modrou barvu.

Při nastavování více LED za sebou si první LED uloží prvních 24 bitů do svého registru a zbylé bity posílá na svůj výstup. Následná LED se chová stejně a dalších 24 bitů informace vyslaných mikrokontrolérem je pro ni prvních 24 bitů. Takto jednotlivé LED v řetězci pokračují, dokud mikrokontrolér posílá další informace. Po zařazení delšího pulzu RESET se hodnota z registru použije na nastavení intenzity svitu jednotlivých barevných složek LED.



Obrázek 6.1: Propojení LED [5]

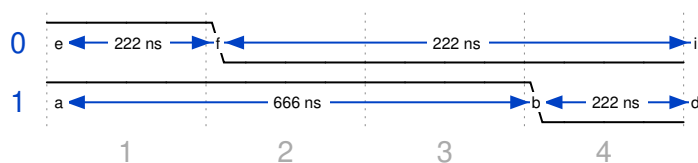


Obrázek 6.2: Kódování bitů do pulzů [5]

6.1.3 Využití SPI jednotky mikrokontroléru ke generování signálu

Pro generování signálu se dá použít hardwarová jednotka SPI. Jednotlivé pulzy kódující bity při komunikaci s LED se zakódují do více bitů, které posílá SPI jednotka na pin MOSI. Tedy jeden bit informace pro LED je kódován více bity na straně SPI. Pro toto použití SPI je potřeba najít vhodnou frekvenci odesílání, aby se z jednotlivých bitů dal poskládat správně dlouhý pulz pro LED.

Rozhodl jsem se, že pulz pro LED budu skládat ze čtyř bitů na straně SPI. Tedy do jednoho bajtu se zakódují dva bity pro LED. Bit pro logickou nulu LED se tedy skládá z bitů 1000 na straně SPI. Z toho vychází rozsah frekvencí SPI mezi 2,63 MHz a 4,54 MHz. Pro kódování logické jedničky LED se dá použít buď sekvence 1110 nebo 1100 na straně SPI. Pro první možnost vyjdou frekvence mezi 3 MHz a 5,17 MHz. Pro druhou pak 2 až 3,44 MHz. Výsledná vybraná frekvence PSI musí být v průniku s frekvencí pro kódování jak logické nuly LED, tak logické jedničky LED.



Obrázek 6.3: Výchozí délky pulzů

Frekvence pro SPI jednotku je odvozena předděličkou z hodinového signálu PCKLK2, který se odvozen z hlavního hodinového signálu mikrokontroléru. Ten se získá pomocí fázového závěsu (PLL ang. Phase-Locked Loop) z externího oscilátoru na frekvenci 16 MHz.

Označení	Popis	Délka trvání
T0H	Nulový bit, vysoká úroveň	220–380 ns
T1H	Jedničkový bit, vysoká úroveň	580–1000 ns
T0L	Nulový bit, nízká úroveň	580–1000 ns
T1L	Jedničkový bit, nízká úroveň	220–420 ns
RES	Ukončení přenosu	280 µs

Tabulka 6.1: Jednotlivé časy pro kódování bitů pro komunikaci s LED [5]

K zachování co nejvyššího výpočetního výkonu je potřeba zvolit hodnoty nastavení předděliček a fázového závěsu tak, aby hlavní frekvence mikrokontroléru zůstala co největší.

Maximální frekvence mikrokontroléru je 72 MHz. Před SPI jednotkou jsou dvě předděličky, které se dají nastavit na mocniny dvojky. Jedna v rozsahu 1 až 16. Druhá v rozsahu 1 až 256. Při nastavení předděličky SPI na hodnotu 16 vyjde frekvence 4,5 MHz. Tato frekvence se vejde do požadovaného rozsahu, když se pro kódování logické jedničky LED použije sekvence 1110. Hodnotu 16 jsem nastavil pro druhou předděličku, protože první je společná pro větší část hardware. Výsledné délky pulzů jdou 222 ns pro logickou nulu a 666 ns pro logickou jedničku a vyhovují požadavkům v tabulce 6.1.



Obrázek 6.4: Příklad zprávy o osmi bitech (11001010)

6.2 Komunikace mezi deskami

Pro komunikaci mezi deskami se používá hardwarová UART1 jednotka. Používá se jak pro příjem z předchozí desky, tak k odesílání dat na další desku. Komunikace mezi deskami slouží ke dvěma účelům. Prvním účelem je, aby nevznikaly rozdíly v intenzitě (poměru) svitu LED mezi deskami, viz kapitola 7.5 Zobrazení dat. Druhým účelem je dostat všechna data ze všech desek do počítače prostřednictvím pouze jednoho UART rozhraní. Mezi deskami je potřeba přenášet přibližně 323 kb za sekundu. Minimální potřebná rychlost UART je 321600 baud. Jeden identifikační bajt, dva bajty pro nastavení intenzity svitu, maximální hodnota dva bajty, minimální hodnota dva bajty, 64 x 2 bajty od senzorů. Každá deska produkuje 60 zpráv za sekundu a pro přenos jednoho bajtu po UART je potřeba 10 bitů. $(1 + 2 + 2 + 2 + 64 \times 2) \times 4 \times 60 \times 10 = 331200$. Nejbližší standardní rychlost je 460800 baud, ale kvůli rezervě jsem zvolil o něco vyšší standardní rychlost 921600 baud.

6.2.1 Komunikační protokol

Komunikační protokol jsem vymyslel tak, aby byl co nejjednodušší a umožnil v toku dat identifikovat začátek zprávy. Naměřená data jsou hodnoty od 0

Kapitola 7

Firmware mikrokontroléru

Pro vývoj jsem použil vývojová prostředí STM32CubeIDE a STM32CubeMX od firmy STMicroelectronics, od které pochází použitý procesor.

Program STM32CubeMX slouží k vygenerování projektu se zvolenými parametry a hardwarovou abstraktní vrstvou (HAL). To usnadňuje programování a nemusí se přímo pracovat s registry mikrokontroléru, pokud danou funkci poskytuje HAL.

Pro programování mikrokontroléru se používá rozhraní SWD, které taky umožňuje ladění a krokování programu.

Všechny mnou napsané funkce jsou deklarované v hlavičkovém souboru *myFunctions.h* a jsou definované v souboru *myFunctions.c*. Zbytek kódu je ve funkci *main* a HAL funkcích obsluhující přerušování SDAD převodníků jedna a dva a časovače 16.

7.1 Hlavní smyčka firmwaru, zpracování příchozích dat a odesílání dat

V hlavní funkci firmwaru prvně inicializují mnou definované proměnné. Poté se inicializuje HAL a zavolají se vygenerované funkce inicializující hardware. Následuje aktivace DMA jednotky, která se stará o příjem dat na UART1, tedy od sousední desky. Pro otestování všech LED se postupně rozsvítí jednotlivé barvy na poloviční výkon na dobu 500 ms. Následně se všechny zhasnou, aby se snížil proud při kalibraci, která probíhá jednou po zapnutí. Při ní se uloží klidové hodnoty (offsety/posunutí) ze všech senzorů, které se pak od měření odečítají. Následuje hlavní smyčka, která se stará o odesílání dat na další desku, popřípadě do počítače.

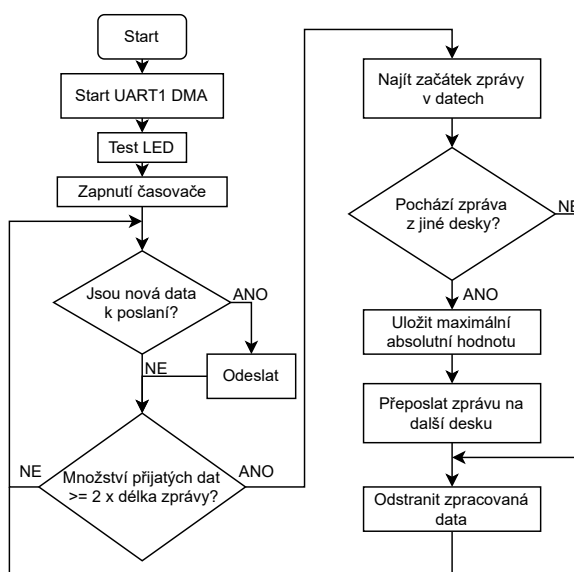
V hlavní smyčce se nejdříve zkontroluje, jestli jsou k dispozici nová data k odeslání vygenerovaná touto deskou. Pokud jsou, tak počká, dokud není UART1 jednotka volná k odeslání a odešlou se pomocí neblokující HAL funkce. To umožní v průběhu odesílání dat pokračovat v běhu hlavní smyčky programu a zpracovat tak další data k odeslání. Deska, která je připojená k počítači, provede to samé s jednotkou UART2. Tak se dostanou stejná data i do počítače.

Následně se zkontroluje, jestli je přijato alespoň dvakrát tolik dat, než je velikost zprávy, která se používá na komunikaci mezi deskami. To zaručí, že

i po ztrátě synchronizace komunikace je ve vyrovnávací paměti přijatých dat alespoň jedna celá zpráva.

V přijatých datech se nalezne začátek zprávy, která vždy začíná třemi bajty s hodnotou 0xFF. Přečte se ID desky, která zprávu odeslala. Když zprávu odeslala stejná deska, tak se zpráva zahodí. Tím se odstraňují staré zprávy z oběhu a nedojde k postupnému zahlcení komunikace. Pro zprávy z jiné desky se uloží nejvyšší absolutní hodnota z dat, která je uložena v následujících dvou bajtech. Poté je celá zpráva přeposlána na další desku, popřípadě i počítač, stejným způsobem jako to probíhalo u nových dat.

Nakonec se zpracovaná data odstraní z přijatých dat a hlavní smyčka programu se opakuje.



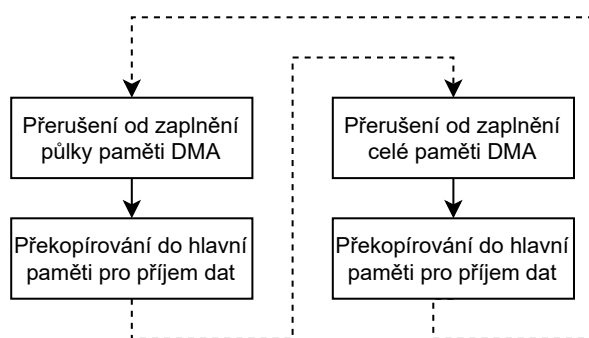
Obrázek 7.1: Hlavní smyčka firmwaru, zpracování příchozích dat a odesílání dat

7.2 Příjem dat

O příjem dat se stará jednotka DMA v nepřetržitém módu. Když je vyrovnávací paměť plná, začne zase přepisovat data na začátku paměti. Vyrovnávací paměť má velikost dvou zpráv. Když je paměť plná nebo z poloviny plná, zavolá se funkce, která danou půlku dat zkopíruje do větší vyrovnávací paměti. Tu poté zpracovává hlavní smyčka programu. Tento mezikrok s využitím DMA zaručuje to, že se všechny data přenesou.

7.3 Čtení hodnot z magnetických senzorů

Při čtení se využívá dvojitě vyrovnávací paměti. Jedna slouží k ukládání hodnot a z druhé se v mezech zobrazují data na LED. Tím se zobrazování a čtení hodnot navzájem neblokují.



Obrázek 7.2: Příjem dat

Pro čtení hodnot napětí na senzorech se využívají dva ze tří SDAD převodníků v módu s přerušením. Aby se využilo všech 16 bitů převodníku, je potřeba nastavit mód na signalizaci se společnou zemí s referenčním napětím nula voltů. Tím se dosáhne toho, že se využije všech 16 bitů převodníku, ale data získaná z převodníku jsou ve formátu posunutého znaménkového 32bitového celého čísla, kde je využito jen 16 bitů. Nula poté odpovídá polovině mezi nulou a referenčním napětím. Shodou okolností je to napětí odpovídající nulovému magnetickému poli. HAL funkce sloužící k získání naměřené hodnoty, ale vrací proměnou typu neznaménkové 32bitové celé číslo, i když binární reprezentace odpovídá znaménkovému typu. Zde se nedá použít standardní přetypování, protože by se změnila i binární reprezentace, a je potřeba změnit typ proměnné pomocí ukazatelů.

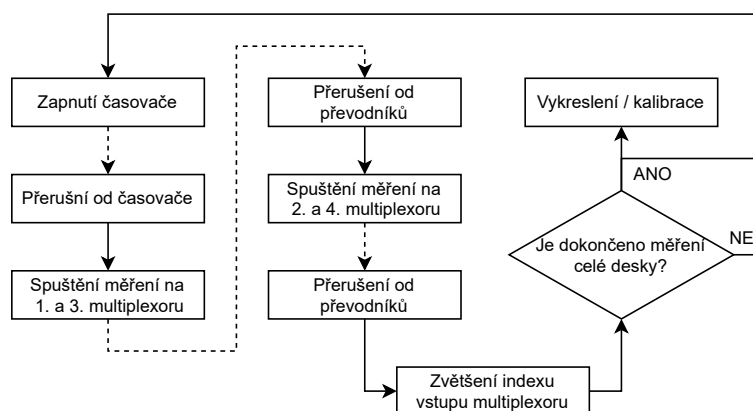
1. Napětí na vstupu převodníků
2. Změření napětí na prvním a třetím multiplexoru
3. Změření napětí na druhém a čtvrtém multiplexoru
4. Zvýšení indexu vstupu na multiplexoru o jedna

Každý převodník se stará o převod čtyř řádků senzorů, tedy ze dvou multiplexorů. Celý cyklus čtení se skládá z opakování čtyř koků.

Nejdříve se aktivuje časovač, který po 880 μ s vyvolá přerušení. V tomto čase se ustálí napětí na vstupu SDAD převodníků. V přerušení od časovače se vypne časovač a spustí se převod na obou převodních kanálech, kde jsou připojeny první a třetí multiplexor. Po dokončení převodu se vyvolá přerušení. Od naměřených dat se odečte hodnota posunu změřená při kalibraci a data se uloží. Poté se spustí převod na kanálech, kde jsou připojeny druhý a čtvrtý multiplexor. Až skončí druhá dvojice převodu, data se po odečtení posunu opět uloží. Zvýší se index vstupu na multiplexorech a znovu se zapne časovač. Celý cyklus se opakuje, dokud nejsou uloženy data ze všech senzorů.

Po přečtení napětí na všech senzorech se prohodí vyrovnávací paměť pro čtení a zobrazování a začne se s převodem znovu od začátku. Po zapnutí časovače se navíc zavolá funkce pro zobrazení naměřených dat nebo funkce na kalibraci, pokud ještě nebyla provedena.

Délka časovače je nastavena tak, aby výsledná frekvence přečtení hodnoty všech senzorů byla 60 Hz.



Obrázek 7.3: Čtení hodnot z magnetických senzorů

7.4 Kalibrace

Po zapnutí je na Hallových senzorech malé posunutí výstupního napětí od základní hodnoty (1 V), která by měla odpovídat nulovému magnetickému poli. To je způsobeno chybou senzoru již z výroby, tepelným posunem a přirozeně se vyskytujícím magnetickým polem. Protože cílem je měřit a zobrazovat magnetické pole předmětů přiložených do blízkosti desek, tak je nezbytné toto posunutí změřit a odečítat od naměřených dat.

Kalibrace se provádí po zapnutí. Využívá se toho, že odečítané posunutí po zapnutí je rovno nule, a proto se změřená data rovnají tomuto posunutí. Prvních 120 měření se data nepoužijí pro zobrazení, ale ukládají se do pole pro každý senzor zvlášť. Poté se hodnoty vydělí 120 a uloží se do pole, ze kterého se berou data o posunu pro jednotlivé senzory.

Protože je frekvence čtení dat 60 Hz, kalibrace zabere dvě sekundy.

Problém je, že se posunutí mění postupně s teplotou. Po zapnutí senzory a LED generují teplo, které způsobí další posun. Po zahřátí je tedy nutné celý přístroj restartovat, aby se znovu změřilo posunutí na ustálené teplotě.

7.5 Zobrazení dat

O zobrazení dat se stará funkce volaná po přečtení dat ze všech senzorů. Cílem je zobrazit naměřená data na LED tak, aby se co nejvíce využil celý rozsah intenzity svitu LED, intenzita lineárně odpovídala síle magnetického pole a kladné magnetické pole se zobrazovalo červeně a záporné modře, což je zvyklost u obarvování magnetů.

Funkce tedy nalezne v datech hodnotu odpovídající maximální intenzitě magnetického pole. Porovná se s maximálními intenzitami neměřených na

ostatních deskách, které se získávají při komunikaci a nalezené globální maximum se použije jako referenční hodnota, které odpovídá maximální intenzita svitu. Pokud je tato hodnota nižší než 400, což odpovídá přibližně 111 μT , tak se jako reference použije tato hodnota. Po kalibraci je změřená hodnota na všech senzorech blízka nule a toto omezení zabrání tomu, aby bez přiloženého magnetického předmětu svítily skoro všechny LED na maximum.

Pomocí dat a referenční hodnoty se spočítá, jaká má být intenzita pro každou LED a hodnoty se zakódují do výstupní vyrovnávací paměti tak, aby odpovídaly kódu používající LED, viz kapitola 6.1.3. Výstupní vyrovnávací paměť se odešle pomocí SPI a DMA jednotky v neblokujícím režimu na pin připojený k LED. Během zobrazování může tedy dále probíhat program. Poté se zkontroluje, zda byla zpráva z předchozího přečtení hodnot odeslána. Pokud ne, toto měření se neodešle. To zajistí nezahlcení sběrnice tím, že se nebudou hromadit staré zprávy. Při testování tato situace nenastala. Pokud byla data z předchozího měření odeslána, vytvoří se nová zpráva podle komunikačního protokolu.

7.6 Měření počtu snímků za sekundu

Měření počtu snímků se provádí pomocí ladění programu. Když je definované makro `FPS_METR`, tak se do kódu přidají části, které slouží pouze k měření počtu snímků za sekundu. Do funkce zobrazující data se přidá proměnná, která se při každém volání zvýší o jedna. Před začátkem hlavní smyčky programu se uloží počet milisekund, které uběhly od spuštění. S využitím tohoto údaje se v hlavní smyčce kontroluje, zda už neuplynulo 10 sekund a poté se z napočítaných snímků spočítá kolik jich připadá na jednu sekundu. Poté se proces opakuje. Protože se výsledek uloží jen do lokální proměnné a nikam se neposílá, je přístupný pouze skrz ladění programu přes SWD. S pomocí tohoto údaje jsem nastavil délku přerušení do časovače tak, aby výsledná frekvence obnovení byla 60 Hz.

Kapitola 8

Vizualizace na PC

Pro zobrazení maxima a minima intenzity magnetického pole slouží program v počítači napsaný v Pythonu. Pro vykreslování jsem využil open-source knihovnu PyGame. Program je postaven na třech vláknech. První se stará o vykreslování a inicializace dalších vláken, druhé o příjem dat ze zařízení po sériové lince a třetí o zpracování dat. Jako argument programu je potřeba uvést název portu, na kterém probíhá komunikace.

8.1 Vykreslování a inicializace

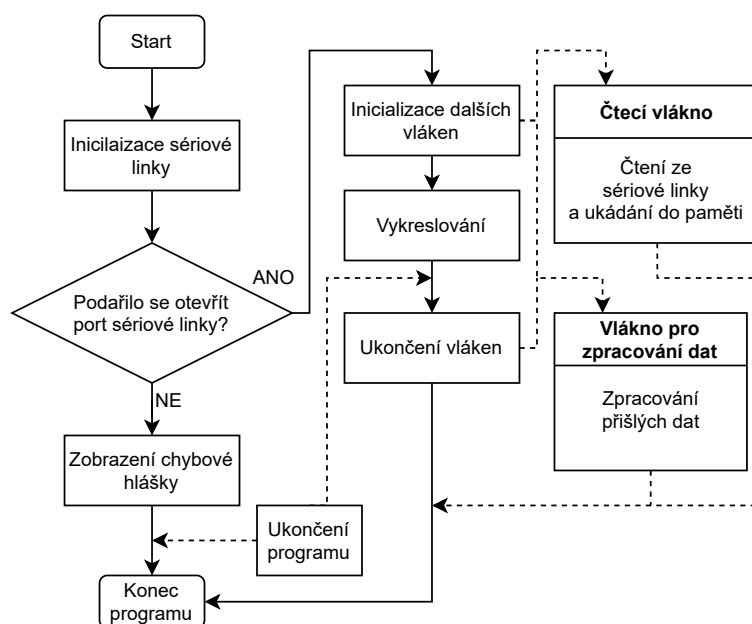
Před začátkem hlavní smyčky programu, kde probíhá vykreslování, se zkontroluje, jestli je uveden název portu, jako první argument programu. Poté se zkusí otevřít s daným názvem. V případě, že by nastaly problémy v některém z těchto kroků, vypíše se chybová hláška s důvodem chyby. Pokud vše proběhlo v pořádku, vytvoří se dvě vlákna pro čtení a zpracování dat. Poté se vstoupí do nekonečné hlavní smyčky programu, kde se z frekvencí 30 Hz vypisuje minimální a maximální aktuální hodnota magnetického pole. Po požadavku na zavření programu se pošle zpráva ostatním vláknům, aby se ukončily. Po jejich skončení se zavře celý program.

8.2 Příjem dat

Ve vlákně pro příjem dat se v nekonečné smyčce čtou data ze sériové linky. Port je již inicializovaný z hlavního vlákna, a tak může rovnou začít čtení. Najednou se čtou data o velikosti čtyř zpráv, jelikož knihovna je moc pomalá pro čtení menších zpráv při tak vysoké rychlosti komunikace. Při čtení je nastaven časový limit na jednu sekundu. Vlákno je při čtení blokováno. Tímto způsobem se alespoň jednou za sekundu zkontroluje, jestli se nemá vlákno ukončit. V případě že během jedné sekundy nepřijdou žádná data, tak funkce na čtení ze sériové linky vrátí nulu. Nula se i tak uloží do přijatých dat, protože nejde odlišit, jestli se jedná o nulu, která přišla po sériové lince. O její odstranění se postará vlákno pro zpracování dat. Data se ukládají do kruhové vyrovnávací paměti.

8.3 Zpracování dat

Data se zpracovávají obdobně jako v mikrokontroléru. Pokud je množství přijatých dat alespoň dvojnásobný, než je délka zprávy, tak se nalezne začátek zprávy a uloží se maximum a minimum intenzity magnetického pole pro danou desku, ze které zpráva pochází. Z těchto dat se vybírá globální minimum a maximum, které se používá při výpisu na obrazovku.



Obrázek 8.1: Vývojový diagram programu, který běží na počítači



Obrázek 8.2: Okno, které na počítači zobrazuje data

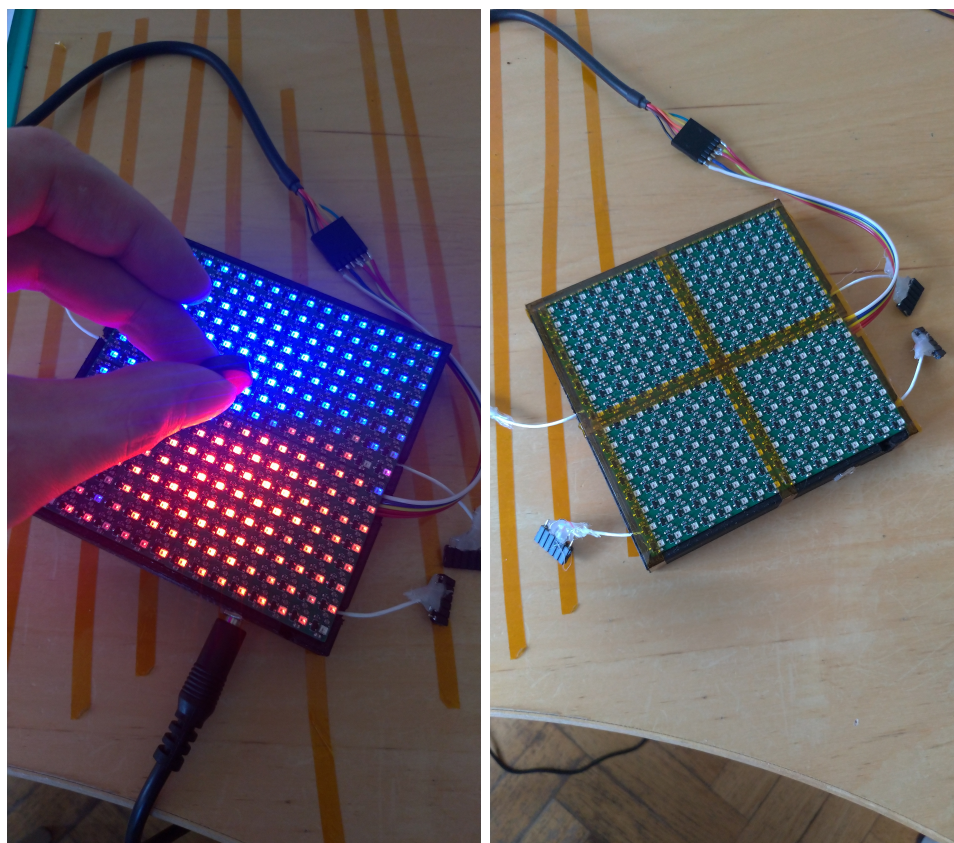
Kapitola 9

Ovládání

Před zapnutím je potřeba odstranit z okolí magnetické předměty, které by mohly ovlivnit kalibraci. Poté stačí zapojit 5 V zdroj se souosím 5,5/2,1 mm konektorem o výkonu alespoň 12 wattů. To je spotřeba při svitu celé desky jednou barvou na maximální výkon, což je maximální výkon, kterého může dosáhnout. Pro maximální svit by byl potřeba potenciálně výkon 29 wattů, ale tam se již vyskytují velké problémy s chlazením.

Po zapojení postupně probliknou všechny barvy a následuje dvou sekundová kalibrace, při které jsou všechny LED vypnuté. Následně začnou všechny LED poblikávat, což značí, že je zařízení připraveno. Za pár minut provozu dochází k mírnému posunutí napětí u Hallových senzorů vlivem vznikajícího tepla. Pro správné zobrazení nulového pole je nutné zařízení restartovat odpojením a zapojením napájecího konektoru, aby se znovu provedla kalibrace. Tento neduh bude pravděpodobně odstraněn přidáním krycího skla, které by mělo teplo dostatečně rychle odvádět.

Pro zobrazení dat na počítači je potřeba propojit počítač a zařízení pomocí převodníku UART USB a spustit program zobrazující intenzitu magnetického pole.



(a) : Zapnuté s přiblíženým magnetem

(b) : Vypnuté

Obrázek 9.1: Celé zařízení

Kapitola 10

Možnosti rozšíření

Možností rozšíření v oblasti softwaru je hned několik. Velká část této práce bylo fyzické sestavení a zprovoznění a na softwarovou implementaci nad rámec zadání nezbylo moc času. Implementoval jsem funkci, která rychle spočítá odmocniny ze všech naměřených dat. Takto upravená data se hodí pro zobrazení silnějších magnetických polí, kde by se s normálním lineárním zobrazením rozsvítilo jen pár LED, protože intenzita magnetického pole dipólu klesá s třetí mocninou vzdálenosti. Tato funkce se dá zapnout jen přímo úpravou kódu programu a přeprogramováním.

Další možností rozšíření je předzpracování dat pomocí příkazu z počítače. Eventuálně měnit barevné profily příkazem z počítače nebo implementovat algoritmus, který by se pokusil v naměřených datech nalézt jednotlivé zdroje magnetického pole a ty různě barevně odlišit.

Zařízení je v podstatě displej s rozlišením 16 x 16 pixelů, a proto by se dalo nalézt uplatnění i pro tento účel. Například implementace animace, když by se zařízení zrovna nepoužívalo. Další možnost je zvětšit počet desek, které tvoří zařízení na 3 x 3 a tím zvýšit rozlišení na 24 x 24 buněk.



Kapitola 11

Závěr

Touto prací se mi podařilo vytvořit zobrazovač magnetického pole s Hallovyými senzory a programovatelnými LED na bázi mikrokontroléru STM32 s celkovým rozlišením 16 x 16 bodů. Jedna deska o rozměrech s rozlišením 8 x 8 má velikost pouhých 52 x 52 mm, tedy velikost jedné buňky je 6,5 x 6,5 mm. Osadil jsem celkem čtyři desky, tedy celková velikost zobrazovací plochy zařízení je 104 x 104 mm. Rozsah měřeného magnetického pole je ± 73 mT. Obnovovací frekvence je nastavena na 60 Hz, v případě potřeby se dá ještě zvýšit. Desky mezi sebou komunikují pomocí sběrnice UART a jedna se stará pomocí sběrnice UART o komunikaci s počítačem. Na něm se zobrazují maximální a minimální hodnoty magnetického pole. Napájení je realizované pomocí externího 5V zdroje. Celému zařízení se dají potenciálně přidat další funkce úpravou kódu běžícího na mikrokontrolérech a na počítači.



Literatura

- [1] STMicroelectronics, *STM32F373VC*, [Online] [Citace: 16. 05 2016.] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f373vc.html>
- [2] Jansen, Peter, *A Third, High-Speed Magnetic Imager Tile*. *hackaday.io*, [Online] 2. 12 2018, [Citace: 16. 5 2021.] <https://hackaday.io/project/18518-iteration-8/log/91551-a-third-high-speed-magnetic-imager-tile-draft>.
- [3] Pavel Ripka, Michal Janosek. *Advances in Magnetic Field Sensors*, IEEE SENSORS JOURNAL, 6 2010, Sv. 10, 6, DOI 10.1109/jsen.2010.2043429.
- [4] MEFANET, síť lékařských fakult ČR a SR, *Hallův jev*, WikiSkripta, [Online] [Citace: 16. 5 2020.] https://www.wikiskripta.eu/w/Hallův_jev.
- [5] Worldsemi Co., *WS2812C-2020*, [Online] [Citace: 16. 05 2016.] <http://www.world-semi.com/Certifications/details-139-4.html>
- [6] Texas Instruments, *DRV5053 Analog-Bipolar Hall Effect Sensor* [Online] [Citace: 16. 05 2016.] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5053.pdf>
- [7] Texas Instruments, *CD74HC4067 data sheet, product information and support* [Online] [Citace: 16. 05 2016.] <https://www.ti.com/product/CD74HC4067>
- [8] STMicroelectronics, *Getting started with STM32F37/38xxx SDADC (sigma-delta ADC)*, [Online] [Citace: 16. 05 2016.] https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00070480-getting-started-with-stm32f3738xxx-sdadc-sigmadelta\-adc-stmicroelectronics.pdf



Příloha A

Seznam příloh

1. KiCad projekt
2. STM32Cube projekt
3. Schéma ve formě PDF

