

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modulární systém pro řízení minirobotů

Autor práce: **Bc. Jiří Šedivec**
Vedoucí práce: **Ing. Martin Juřík**
Konzultant práce: **Ing. Martin Vítek**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ŠEDIVEC**
Osobní číslo: **E20N0054P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Elektronika**
Téma práce: **Modulární systém pro řízení minirobotů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Vytvořte elektronický modulární systém, který bude umožňovat aktuaci a lokalizaci minirobotů v ploše. Při realizaci oddělte část akuační a část řídicí.
2. Zhodnoťte různé způsoby napájení celého systému a ten nejvhodnější implementujte do řídicí elektroniky.
3. Zachovejte kompatibilitu s již vytvořenými systémy (např. MagNet), které umožňují řízení platform podobného typu.
4. Provedte základní experimenty a ověřte funkčnost systému.

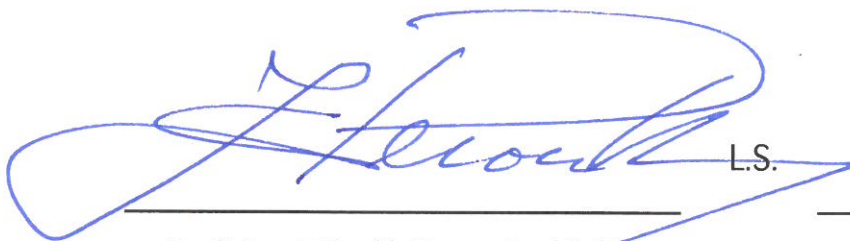
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. JUŘÍK, Martin, et al. Positioning uncertainty reduction of magnetically guided actuation on planar surfaces. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019. p. 1772-1778.
2. VÍTEK, Martin. Zařízení pro mapování stacionárního magnetického pole v rovině. 2019.
3. KUTHAN, Jiří, et al. Collective Planar Actuation of Miniature Magnetic Robots Towards Individual Robot Operation. In: *2020 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE, 2020. p. 1-6.
4. ŠEDIVEC, Jiří. Systém na ovládání miniaturních robotů. 2020.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Juřík**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá návrhem a tvorbou systému, který umožňuje manipulaci miniaturních robotů pomocí magnetického pole. Zařízení se skládá ze 3 částí (aktuace, řízení a sensorika). Aktuální část slouží k tvorbě časově proměnného magnetického pole, které je využíváno pro pohyb minirobotů. Byly otestovány dva koncepty rozložení aktuálních cívek. Řídící část zajišťuje napájení systému, komunikaci v rámci systému, komunikaci s uživatelem, spínání cívek a zpracování dat ze sensorů. Sensorická část umožňuje nevizuální lokalizaci robotů, tedy lokalizaci robota pomocí jeho magnetického pole. Dále práce obsahuje tvorbu nízkoúrovňového kódu (firmware), který je napsán v programovacím jazyce C++. Uživatel ovládá systém přes grafické rozhraní aplikace MagNet, která je vytvořena ve skriptovacím jazyce MATLAB.

Klíčová slova

Minirobotika, magnetická aktuace, kopolární cívky, magnetická sensorika

Abstract

The present work deals with the design and development of a system that enables the manipulation of miniature robots using a magnetic field. The device consists of 3 parts (control, actuation, sensors). The control part deals with the power supply of the system, the communication of the components, the switching of the coils and the processing of the sensor data. The actuation part is used to create the moving magnetic field. Two concepts for the layout of the actuating coils are tested here. The sensor part allows for non-visual robot localization, i.e. localization of the robot's magnetic field. Furthermore, the work includes the creation of low-level code (firmware), which is written in the C++ programming language. The user controls the whole system through the graphical interface of the MagNet application, which is created in the MATLAB scripting language.

Keywords

Minirobotics, magnetic actuation, coplanar coils, magnetic sensing

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Juříkovi a konzultantovi Ing. Martinu Vítkovi za jejich přístup, metodické vedení a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vi
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Aktuační část	3
1.1 Princip tvorby magnetického pole	3
1.2 Napájení aktuačních cívek	5
1.2.1 Dělení dle principu činnosti	5
1.2.2 Dělení dle způsobu dodávání el. energie do zařízení	6
1.2.3 Dostupné varianty zdrojů	7
1.2.4 Použitý elektrický zdroj	8
1.3 Trichoptera	9
1.4 Diptera	12
2 Řídící část	14
2.1 Napájení systému	15
2.1.1 Proudový zdroj	18
2.2 Mikrokontrolér	21
2.3 Komunikace	23
2.3.1 Komunikace s aktuační částí systému	23
2.3.2 Komunikace se senzorickou částí	25
2.3.3 Komunikace s PC	25
2.3.4 Komunikační protokol	26
2.4 Možná vylepšení do budoucna	26
2.4.1 Bluetooth	26
2.4.2 Vizualní lokalizace minirobotů	27
3 Senzorická část	28
3.1 Rozmístění senzorů	28
3.1.1 Matematický model miniaturního robota	29
3.1.2 Verifikace matematického modelu	30
3.1.3 Analýza rozložení senzorů	31
3.2 Dostupné varianty senzorů	32

3.3	Použité magnetické senzory	33
3.4	Mikrokontrolér	34
3.4.1	Kalibrace magnetometrů	36
3.4.2	Sériové číslo	36
3.5	Komunikace	36
3.5.1	Protokol komunikace	36
3.5.2	Komunikace při zapojení v rámci systému	38
3.5.3	Komunikace jako samostatné zařízení	39
3.6	Porovnání s komerčním zařízením	40
4	Experiment	41
4.1	Aktuace robotů	42
4.2	Vývoj teploty Aktuační části při aktuaci	43
4.3	Nevizuální lokalizace robotů v ploše	44
	Závěr	46
	Seznam použité literatury	48
	Přílohy	A

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
I	Elektrický proud	[A]
U	Elektrické napětí	[V]
R	Elektrický odpor	[Ω]
L	Indukčnost	[H]
B	Magnetická indukce	[T]
ρ	Měrný elektrický odpor	[$\Omega \cdot m^{-1}$]
l	Délka	[m]
S	Obsah	[m ²]
P	Činný výkon	[W]
AC	Střídavý proud	
ID	Identifikátor	
PC	Osobní počítač	
DPS	Deska Plošných Spojů	
SMD	Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů	
D/A	Digitálně Analogový	
$UART$	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter	
I^2C	Inter-Integrated Circuit	
$EEPROM$	Electrically Erasable Programmable Read-Only	
LED	Light Emitting Diode	
RGB	Red Green Blue	
SPI	Serial Peripheral Interface	
MCU	Microcontroller (Mikrokontrolér)	

Seznam obrázků

1	Ukázka předchozího systému	1
2	Ukázka vytvořeného systému	2
3	Vlevo tyčový magnet se znázorněnými siločarami [6], vpravo vodič, kterým prochází elektrický proud I a příslušné siločary magnetické indukce B [7]	3
4	Tři různé topologie aktuačního systému [12]	4
5	Základní rozložení aktuačních cívek [12]	5
6	Základní schéma LDO regulátoru [14]	6
7	Blokové schéma proudového zdroje DRV8876 [15]	8
8	Obrzřená Trichoptera od výrobce	9
9	Uspořádání cívek s mrazicí oblastí [16]	9
10	Detail jedné vrstvy systému Trichoptera v okolí prokovů	10
11	Obrzřená Diptera od výrobce před osazením součástek	12
12	Osazená řídicí část	14
13	Schéma vnějšího napájení systému	15
14	Schéma napájení AC adaptérem	16
15	Schéma napájení USB-C	16
16	Ukázka použitých Li-On článků v přípevněných pouzdrech	17
17	Schéma napájení z akumulátoru	17
18	Schéma zapojení napěťových stabilizátorů	18
19	Schéma zapojení proudového zdroje	19
20	Schéma zapojení digitálně analogového převodníku	19
21	Průběhy proudu aktuační cívkou bez a se zapojením přídavné indukčnosti 230 μH	20
22	Schéma zapojení použitého mikrokontroléru	22
23	Schéma zapojení krystalu a programovacího konektoru	23
24	Schéma zapojení první trojice programovatelných LED	24
25	Poslaná data od MCU (kanál 2) a od první LED (kanál 1)	24
26	Záložka Home okenní aplikace MagNet	26
27	Vyrobená a osazená sensorická deska	28
28	Maticové rozmístění sensorů předešlého systému [24]	29
29	Miniaturní robot v porovnání se sirkou	29
30	Model robota, pohled shora	30
31	Grafické znázornění 2D prostoru v okolí robota (plocha X, Z)	31
32	Ukázka 3 z 15 definovaných tvarů uspořádání	31
33	Závislost rozteče sensorů a vzdálenosti sensorů od robota	32

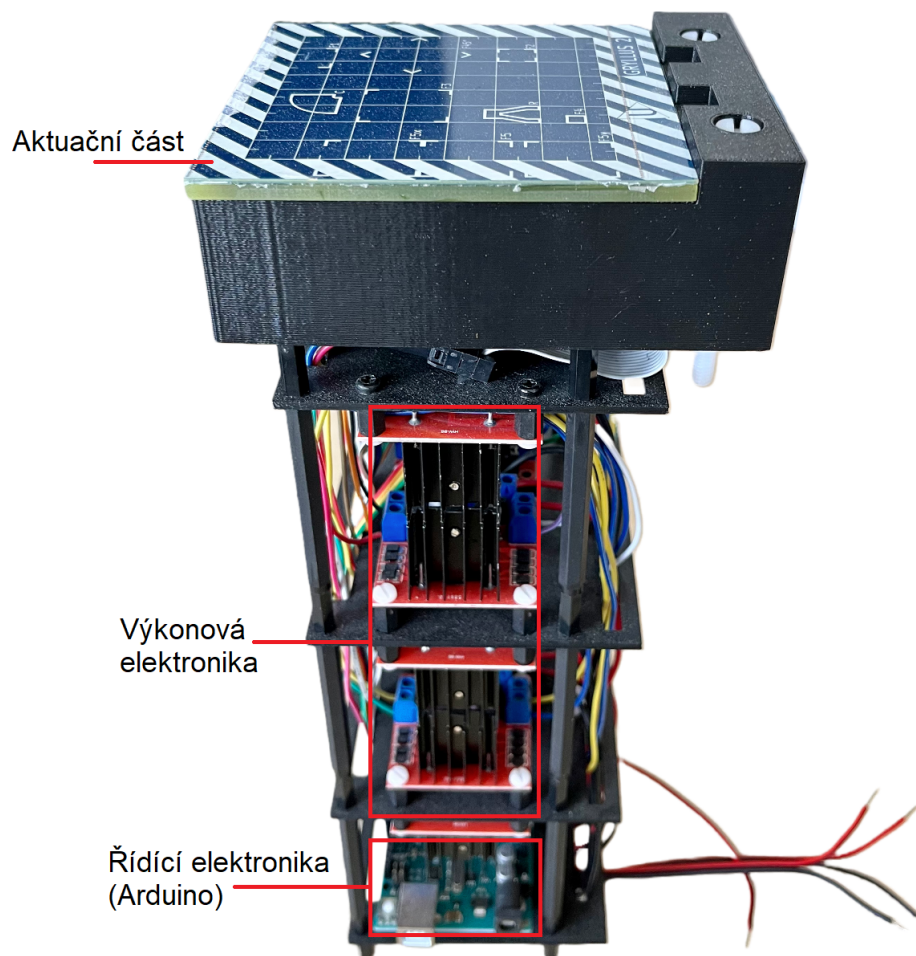
34	Schéma zapojení jednoho senzoru TMAG5170	33
35	SPI rámec (SDI)	34
36	Pinout mikrokontroléru Senzorické části	35
37	Zapojení konektoru J2 (vlevo), zapojení krystalu Y1 (vpravo)	35
38	Flow diagram komunikace při zapojení Senzorické části do minirobotické platformy	38
39	Ukázka aplikace MagDisplay	39
40	Ukázka použitých robotů	41
41	Počet chybných kroků robotů v závislosti na aktuálním proudu	43
42	Vývoj teploty aktuační desky při aktuaci pro různé proudy	44
43	Aplikace MagDisplay a snímek z webkamery	44
44	QR kód s odkazem na video	45

Seznam tabulek

1	Porovnání dostupných variant proudových zdrojů s cenami platnými ke dni 19. 2. 2023	7
2	Porovnání naměřených odporů aktuálních cívek systémů Trichoptera a Gryllus ² .	11
3	Porovnání naměřených odporů aktuálních cívek systémů Diptera a Trichoptera .	12
4	Soupis změřených odebíraných proudů v systému	18
5	Podporované zprávy Řídící části	26
6	Parametry senzorů magnetického pole, ze kterých bylo vybíráno	33
7	Parametry UART rozhraní	36
8	Podporované zprávy Senzorické části	37
9	Příklad zprávy vyčítání magnetické indukce senzoru s ID = 1 v osách X, Y a Z (nT)	37
10	Finální formát zprávy Response při vyčítání magnetické indukce	37
11	Porovnání vyvíjeného a komerčně dostupného zařízení	40
12	Parametry použitých robotů	41
13	Minimální a maximální proudy pro aktuaci	42
14	Počet chybných kroků robotů pro různé aktuální proudy	42

Úvod

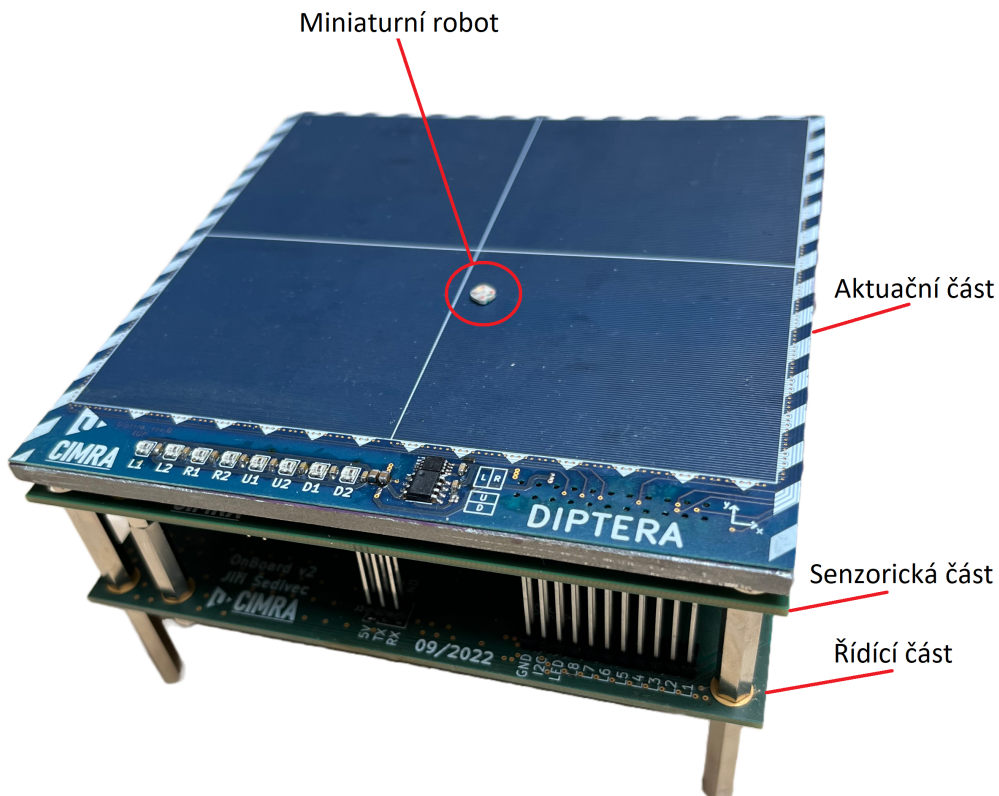
Motivací pro vznik této práce byl návrh modulárního systému pro manipulaci miniaturními roboty. Předchozí systémy podobného typu, viz obr. 1, které byly vytvořeny v rámci výzkumného týmu CIMRA FEL ZČU disponují řadou nevýhod [1]. Mezi jejich nevýhody patří velké rozměry (120 mm x 300 mm x 110 mm), složité napájení, nízká robustnost a obtížná přenositelnost.



Obrázek 1: Ukázka předchozího systému

Při tvorbě nového systému, viz obr. 2, byla snaha o vyšší integraci komponent. Druhým cílem bylo navrhnout systém tak, aby byl (po omezený čas) funkční i bez vnějšího napájecího zdroje, tedy aby disponoval akumulátorem. Dále bylo žádoucí mít v systému senzorickou část, která by umožnila nevizuální lokalizaci robotů. V neposlední řadě jsem chtěl vytvořit systém, který je kompatibilní se softwarovou aplikací *MagNet*, která byla zhotovena v rámci mé bakalářské práce. Mým osobním cílem bylo uplatnit, co možná největší množství nabitých znalostí ze studia.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. První kapitola se věnuje Aktuační části. V této části je nejdříve vysvětlen princip tvorby pohyblivého magnetického pole, které manipuluje s miniaturními roboty. Poté je zde ukázána praktická realizace dvou vytvořených platform. Druhá kapitola se zabývá Řídící částí systému. Ta je zodpovědná za komunikaci (interní i externí) a za ovládání celého zařízení. Třetí kapitola popisuje poslední fyzickou část systému a to Senzorickou část. V této kapitole je nejdříve zmíněna teorie týkající se optimalizace rozmístění senzorů (magnetometrů), následuje návrh a samotné provedení. Ve čtvrté kapitole je demonstrována funkčnost systému na několika experimentech.



Obrázek 2: Ukázka vytvořeného systému

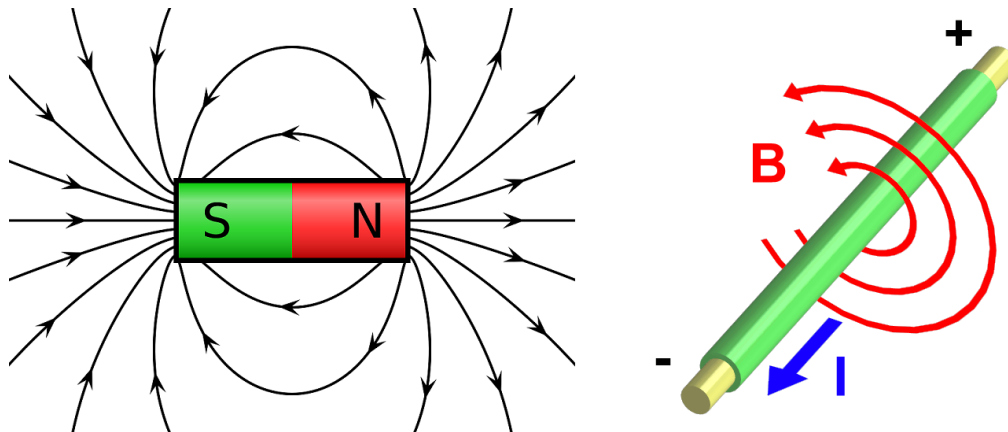
1 Aktuační část

Slovo aktuaace vychází z anglického *actuation*, což lze přeložit jako *pohon* nebo *působení* [2]. Druhý ze zmíněných překladů je velmi výstižný v případě vyvíjeného systému. Aktuační část vytváří magnetické pole, kterým působí na miniaturní roboty. Ty se podle velikosti a místa vzniku tohoto pole začnou pohybovat, nebo se naopak zastaví. Prostor, ve kterém se miniaturní roboty pohybují, je dvourozměrný. Pod pojmem miniaturní robot si lze v našem provedení představit permanentní magnet nebo soustavu magnetů o rozměrech jednotek milimetrů.

Interakce malých feromagnetických objektů s externím magnetickým polem je velmi častý způsob aktuaace miniaturních objektů. Systémy tohoto typu dominují především přesností aktuaace, možností působení na větší vzdálenost a nízkou spotřebou elektrické energie. Další výhodou je poměrově nízká hmotnost ku vysoké energii magnetů [3]. Jako nevýhoda je vnímána vyšší citlivost na vnitřní (více robotů se vzájemně ovlivňuje) i vnější prostředí (nasazení v průmyslu).

1.1 Princip tvorby magnetického pole

Pokud vodičem protéká elektrický proud, tak v jeho okolí (i uvnitř vodiče) vzniká magnetické pole [4]. Vznik tohoto pole popsal již v první polovině 19. století francouzský fyzik André Marie Ampère [5]. Díky Ampérovi a dalším vědcům víme, že vzniklé magnetické pole má (u přímého vodiče) indukční čáry ve tvaru soustředných kružnic. Ampérovo pravidlem (často označováno jako *pravidlo pravé ruky*) lze snadno analyzovat orientaci vzniklých siločar. U přímého vodiče palec směřuje ve směru proudu a prsty ukazují orientaci siločar. Pokud má vodič tvar závitů (cívky), indukované magnetické pole má tvar pole tyčového magnetu. Tedy oproti přímému vodiči obsahuje severní (označován N) a jižní (označován S) pól. Natočíme-li prsty pravé ruky ve směru proudu cívky, tak severní pól je na straně palce.

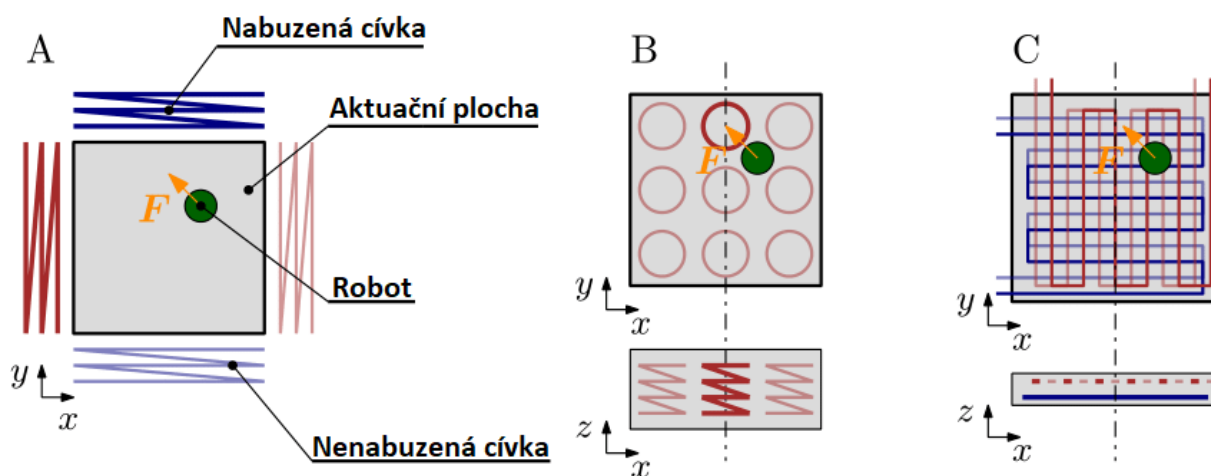


Obrázek 3: Vlevo tyčový magnet se znázorněnými siločarami [6], vpravo vodič, kterým prochází elektrický proud I a příslušné siločary magnetické indukce B [7]

Systémy používající magnetickou aktuaci využívají různé umístění a topologie cívek. První z využívaných způsobů, viz obr. 4 A, používá cívky, které jsou umístěny mimo prostor [8], ve kterém se roboty pohybují. Tento způsob je jednoduchý na tvorbu, nicméně se těžko dosahuje nezávislého pohybu vícero robotů [9]. Pokud chceme takový systém škálovat, je třeba dodávat více energie do cívek. Ta roste s kvadrátem vzdálenosti. Proto se tento druh systému používá hlavně pro systémy mikroskopického měřítka.

Druhá topologie systému se potýká s opačnými problémy, viz obr. 4 B, který má umístěné aktuační cívky pod plochou, na které se roboty mohou pohybovat. Zmenšení tohoto prostoru je technicky náročný problém [10]. Naopak při zvětšení této plochy je komplikované řízení systému, protože počet cívek roste úměrně s plochou [11]. Tento systém je nejčastěji využíván v makroskopickém měřítku.

Poslední používaný typ uspořádání systému se pohybuje na rozmezí dvou předešle zmíněných, viz obr. 4 C. Zde jsou aktuační cívky umístěné v jedné rovině (koplanárně) pod povrchem aktuační plochy. Cívky jsou tedy rozvinuty ve dvoudimenzionálním prostoru. Tento druh systému přebírá jak výhody předešlých uspořádání, tak několik jejich nevýhod. Výhodou je, že pro aktuaci v jakékoli části systému je potřebné konstantní množství energie. Nevýhodou je však obtížně dosažitelná nezávislá manipulace několika robotů ve stejný čas. Tento systém se hodí jak pro mikroskopické, tak makroskopické aplikace.

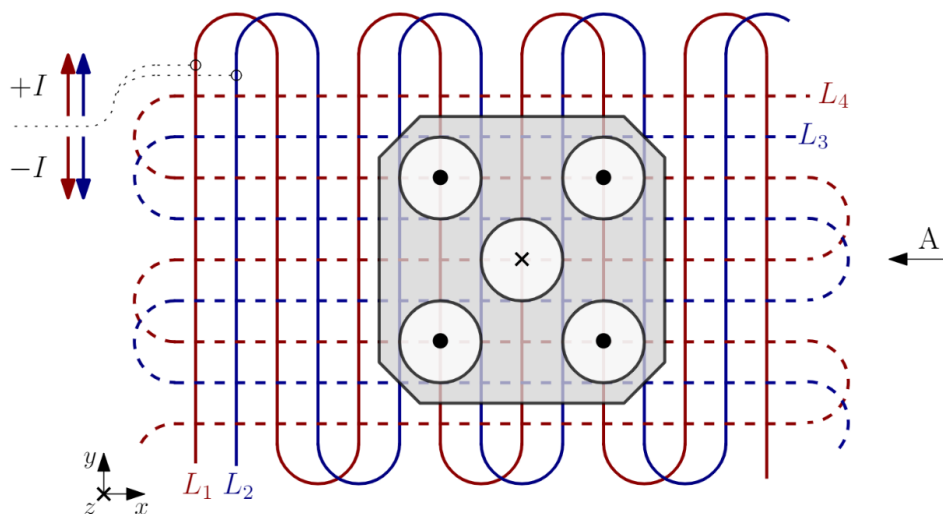


Obrázek 4: Tři různé topologie aktuačního systému [12]

V této práci je využita poslední zmíněná topologie systému. Pro základní funkci je potřeba minimálně dvou koplanárních cívek v každém směru pohybu robota. Jelikož náš systém umožňuje dvoudimenzionální pohyb robotů, tak jsou zapotřebí alespoň čtyři cívky (dvě pro každý směr). Na obrázku 5 lze vidět základní topologii systému. Dvojice cívek L1 a L2 slouží pro horizontální pohyb robota, kdežto dvojice L3 a L4 umožňují vertikální pohyb [12].

Sekvenčním spínáním cívek lze dosáhnout kontinuálního pohybu robota. Pro pohyb robota ve směru X je nutné vykonat tuto spínací frekvenci:

1. nabudíme L1 proudem $+I$
2. nabudíme L2 proudem $+I$
3. nabudíme L1 proudem $-I$
4. nabudíme L2 proudem $-I$



Obrázek 5: Základní rozložení aktuačních cívek [12]

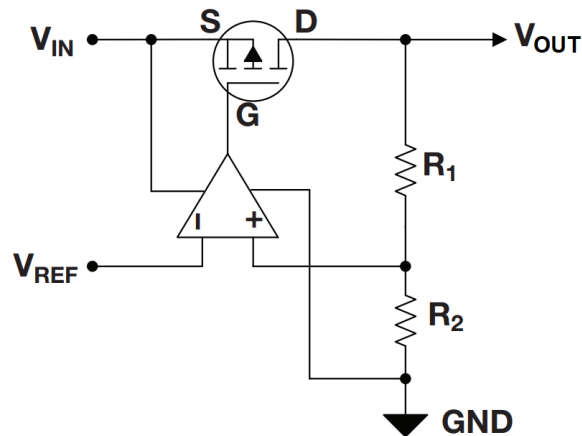
1.2 Napájení aktuačních cívek

Existuje několik různých typů zdrojů elektrické energie používaných v běžné elektronice. Jako elektrický zdroj uvažujeme zařízení dodávající elektrické napětí nebo proud o požadované amplitudě a frekvenci [13]. V této kapitole jsou elektrické zdroje rozděleny dle dvou kritérií, která byla pro tuto aplikaci klíčová – i) princip činnosti, ii) způsob dodávání elektrické energie do zařízení. Při následujícím dělení byla zohledněna aplikace, tedy dělení nezahrnuje zdroje střídavého napětí a proudu.

1.2.1 Dělení dle principu činnosti

Jedním z nejběžnějších typů napájecích zdrojů stejnosměrného napětí a proudu je lineární stabilizátor. Tento zdroj umožňuje stabilizovat výstupní napětí nebo proud při změnách zátěže, vstupního napětí a teploty okolí [14]. Typickým představitelem lineárního zdroje je regulátor napětí, kterým v nejjednodušším případě může být jen rezistor se Zenerovou diodou. Nevýhodou takto jednoduchého napěťového regulátoru je vysoká teplotní závislost a vysoká výkonová ztráta rezistoru stabilizátoru. O něco složitější je regulátor se zpětnou vazbou, který porovnává skutečné

výstupní napětí s pevným referenčním napětím a zesiluje rozdíl, na který reaguje regulační řídicí prvek. Velmi často používaný typ tohoto regulátoru se nazývá Low-dropout regulátor (LDO). Tento regulátor ke své funkci potřebuje napájecí napětí jen o trochu vyšší, než je stabilizované výstupní napětí (oproti běžným regulátorům). Dropout napětí je rovno rozdílu mezi napětím vstupu a výstupu. Velikost tohoto napětí spolu s odebíraným proudem udává celkový ztrátový výkon výkonového prvku [14].



Obrázek 6: Základní schéma LDO regulátoru [14]

Výhodou lineárních zdrojů je stabilní výstupní napětí (proud) s nízkým šumem. Naopak nevýhodou je nižší účinnost spojená s velkou výkonovou ztrátou regulačního členu, který je třeba dostatečně chladit, a z toho vyplývající větší rozměry zdroje.

Spínané zdroje používají mechanismus zpětné vazby podobný lineárním regulátorům. Na základě zpětné vazby je určena doba sepnutí spínacího prvku (transistoru). Jelikož spínací prvek je buď plně otevřený nebo plně uzavřený, tak na něm vznikají minimální ztráty. Spínané zdroje používají k řízení střední hodnoty výstupního napětí nejčastěji pulzně-šířkovou modulaci a akumulací prvek v podobě indukčnosti. Účinnost spínaných regulátorů je velmi vysoká a obvykle se pohybuje v rozmezí 70-90 %.

Spínané zdroje jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují nižší náklady a vysokou účinnost, zatímco lineární zdroje jsou lepší pro aplikace vyžadující vysokou kvalitu výstupního signálu, stabilitu a rychlou odezvu na změnu zátěže.

1.2.2 Dělení dle způsobu dodávání el. energie do zařízení

V ideálním případě napěťový zdroj dodává do zařízení konstantní napětí bez ohledu na proud, který zařízení odebírá. Napětí je tedy konstantní a proud se mění v závislosti na zatížení zdroje.

Proudový zdroj dodává do zařízení konstantní elektrický proud. Jedná se o přesný opak napěťového zdroje. Například pokud zařízení vyžaduje k provozu proud 1 A a může pracovat s libovolným napětím mezi 5 V a 12 V, proudový zdroj bude dodávat konstantní 1 A a napětí se bude měnit mezi 5 V a 12 V.

V plánované aplikaci, spínání koplanárních cívek, je požadována co nejpodobnější magnetická indukce jednotlivých cívek na povrchu aktuální plochy. Ta je závislá na průchozím elektrickém proudu. Ve vyvíjeném systému je 8 cívek (viz podkapitola 1.3 a 1.4), kde každá má trochu rozdílný elektrický odpor z důvodu mechanického uspořádání, nepřesností technologie výroby nebo změny teploty. Z toho důvodu byl použit proudový zdroj, který je podrobně popsán v podkapitole 1.2.4.

1.2.3 Dostupné varianty zdrojů

V plánované aplikaci je potřeba měnit směr a velikost proudu v cívce. Z tohoto důvodu bylo zvažováno několik variant spínaných zdrojů typu H-most používaných pro řízení stejnosměrných motorů. Výhodou vybraných zdrojů je vlastní implementace řízení. Tudíž není nutné psát vlastní firmware pro řízení směru výstupního proudu nebo měření jeho amplitudy, takže není zatížen výpočetní výkon mikrokontroléru. V tabulce 1 lze vidět čtyři varianty zvažovaných zdrojů.

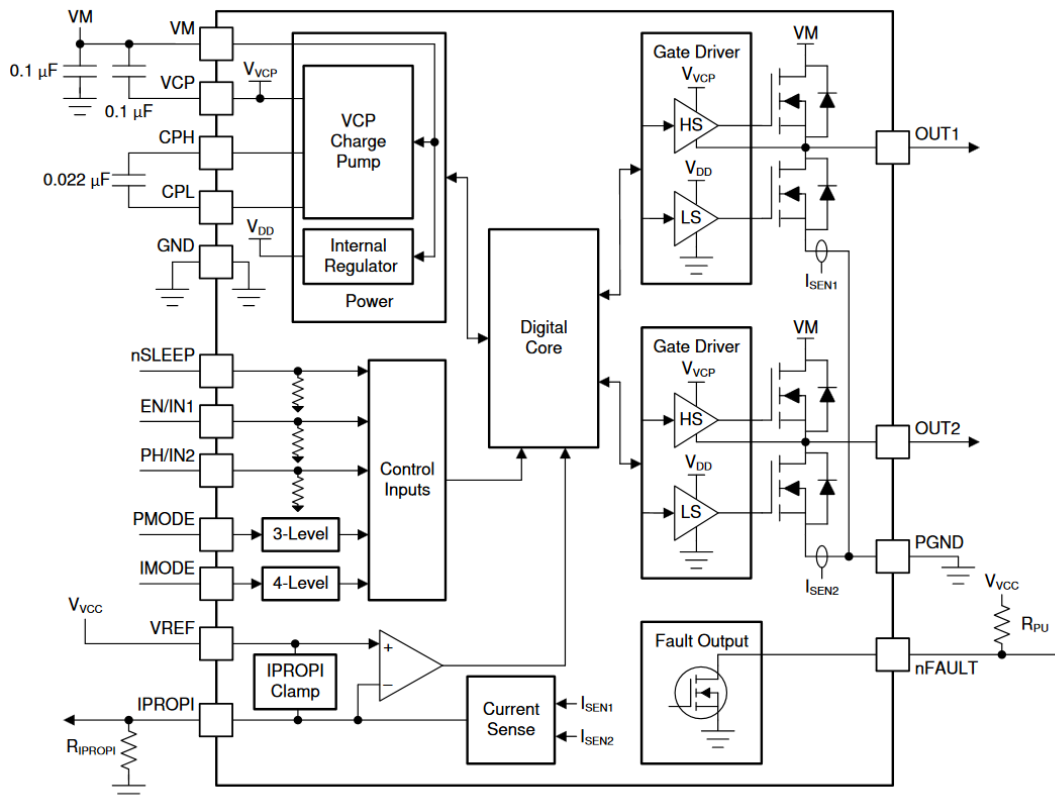
Tabulka 1: Porovnání dostupných variant proudových zdrojů s cenami platnými ke dni 19. 2. 2023

Parametr	TB6568KQ	TB6612FNG	DRV8220	DRV8876
Výstupní proud (A)	3	1	1.76	3.5
Vstupní napětí (V)	50	15	18	37
Spínací frekvence (kHz)	100	44.6	100	20
Pracovní teplota (°C)	-40...85	-20...85	-40...125	-40...125
Technologie	THT	SMD	SMD	SMD
Cena/ks (Kč)	126,50	53,93	16,98	42,48

Nejlépe pro plánovanou aplikaci vyšel typ DRV8876, protože umožňuje vysoký výstupní proud, který je klíčový k aktuaci robotů, viz podkapitola 1.1. Zároveň jako jediný provádí regulaci výstupního proudu. Typ TB6568KQ sice poskytuje vyšší rozsah napětí, ale jak je vysvětleno dále (viz podkapitola 2.1), ten by nebyl plně využit z důvodu použitého napájení systému. Jedinou nevýhodou zdroje DRV8876 je nižší spínací frekvence (20 kHz) v porovnání s ostatními variantami. V plánované aplikaci je nutné zajistit spínání aktuálních se spínací frekvencí 1 kHz. Tu s velkou rezervou splňuje i vybraný typ zdroje.

1.2.4 Použitý elektrický zdroj

Na základě dvou zmíněných a několika dalších kritérií, byl pro systém zvolen proudový spínaný zdroj DRV8876 od výrobce Texas Instruments [15]. Tento zdroj má v sobě integrovaný H-můstek a používá se primárně k řízení stejnosměrných motorů (RL zátěž, stejně jako v našem případě). H-most umožňuje obousměrný tok proudu, což je pro nás důležité, jelikož se při sekvenčním spínání cívek mění orientace proudu. Zdroj je schopný dodávat až 3,5 A při vstupním napětí od 4,5 V do 37 V). Blokové schéma proudového zdroje je na obrázku 7.

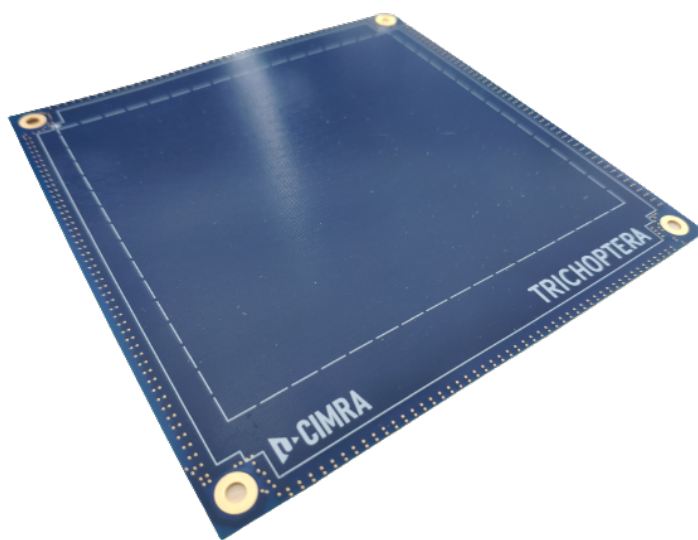


Obrázek 7: Blokové schéma proudového zdroje DRV8876 [15]

Velkou výhodou tohoto spínaného zdroje, kde spínacím prvkem jsou MOSFET tranzistory s indukovaným kanálem typu N, je snadná regulace výstupního proudu díky zpětnovazební smyčce (signál *IPROPI*). Požadovanou hodnotu výstupního proudu lze nastavit signálem *VREF*. Oba signály vedou do komparátoru a následně do řídicího obvodu (*Digital Core*). Ten upravuje střihu spínání výstupních obvodů (signály *OUT1* a *OUT2*). Orientace výstupního proudu je řízena vstupními piny *EN/IN1* a *PH/IN2*. DRV8876 nabízí i možnost módu nízké spotřeby (*nSLEEP* pin), kdy spotřeba tohoto integrovaného obvodu klesá na jednotky μA . DRV8876 nabízí různá další nastavení - např. dva módy regulace výstupního proudu (*IMODE*) nebo různé možnosti spínání H-mostu (*PMODE*).

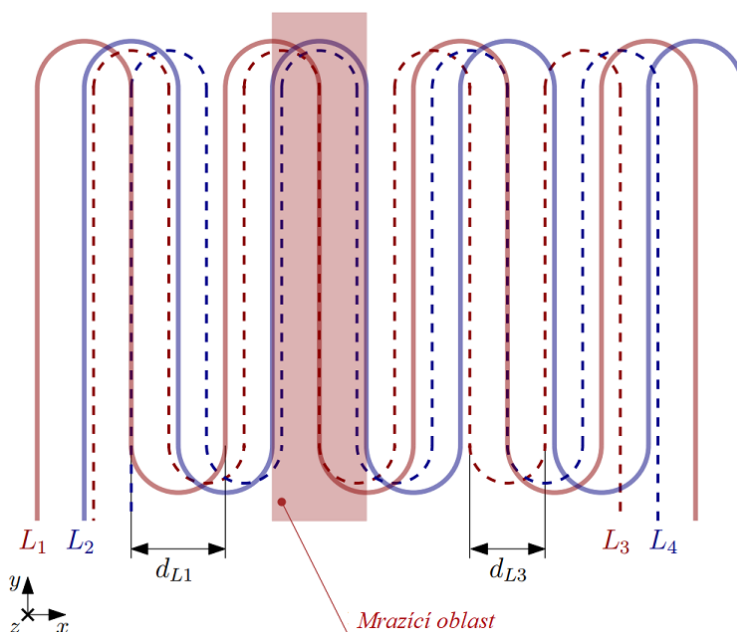
1.3 Trichoptera

První navržená DPS pro aktuaci, která vznikla v rámci této práce, byla pojmenována Trichoptera. Koncept rozvržení aktuačních cívek vycházel z již existujícího předchůdce Gryllus² [16]. Trichoptera je 4vrstvá DPS, kde v každé vrstvě jsou rozvedeny dvě cívky. Aktuační plocha, po které se robot pohybuje, je vyznačena čárkovanou čarou na obr. 8.



Obrázek 8: Obdržená Trichoptera od výrobce

V kapitole 1.1 byla zmíněna potřeba čtyř cívek pro aktuaci robotů. Zde byly přidány další 4 cívky, díky nimž lze vytvářet tzv. *mrazící plochy*. Mrazící plochy jsou oblasti, ve kterých se magnetická pole cívek vzájemně ruší díky vhodnému spínání a jejich uspořádání [16]. Na obr. 9 lze vidět použité uspořádání cívek a vznik mrazící oblasti.



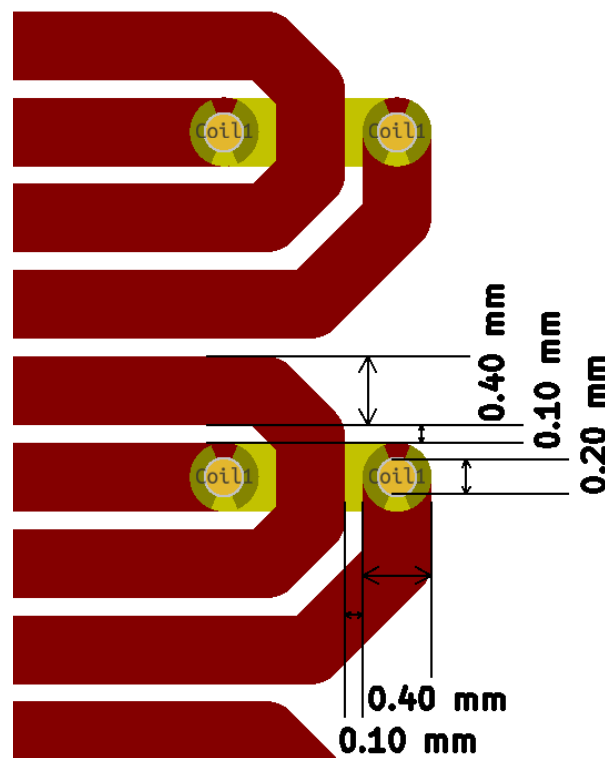
Obrázek 9: Uspořádání cívek s mrazící oblastí [16]

Při návrhu Trichoptery, byla zvolena větší aktuální plocha 120x120 mm (oproti předchozím 100 mm x 100 mm je zvětšení plochy o 44%). Společně s plochou však vzrostl i elektrický odpor, protože se zvětšila celková délka vodičů (12 m), viz následující rovnice

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

kde R (Ω) je výsledný odpor, ρ ($\Omega \cdot m^{-1}$) reprezentuje měrný odpor, l (m) délku vodiče a S (m^2) jeho plochu.

Relativně vysoký elektrický odpor byl jednou z nevýhod předchozího systému a proto pro nový systém byla zvolena menší izolační mezera (0,1 mm) mezi závitů cívky, resp. dvojicí cívek než u systému Gryllus² (0,25 mm), viz obr. 10. Zmenšením této mezery bylo umožněno zvýšit průřez vodiče a tím snížit elektrický odpor. Byla použita standardní tloušťka mědi (18 μm vnější vrstvy, 35 μm vnitřní vrstvy). Systém Trichoptera měl, podle teoretických výpočtů, dosáhnout nižšího odporu cívek. Zároveň díky novému systému řízení nabídnout možnost nastavení amplitud proudů, což by vedlo na plnou kontrolu nad tvorbou mrazících ploch.



Obrázek 10: Detail jedné vrstvy systému Trichoptera v okolí prokovů

Po obdržení DPS od výrobce byly změřeny odpory jednotlivých cívek a bohužel neodpovídaly specifikacím, kdy měly odpory dosáhnout maximálně hodnoty $21\ \Omega$. Z tabulky 2 lze vidět, že specifikace byla splněna pouze u dvou z osmi cívek. Největší odchylka byla u cívek L3 - L6, které jsou ve vnitřních vrstvách DPS. Problémy dle výrobce jsou způsobeny nízkou izolační mezerou v okolí prokůvů. Dalším potenciálním problémem je vysoký počet slepých prokůvů opět s nízkou izolační mezerou.

Tabulka 2: Porovnání naměřených odporů aktuálních cívek systémů Trichoptera a Gryllus²

Cívka	$R_{\text{Trichoptera}}\ (\Omega)$	$R_{\text{Gryllus}^2}\ (\Omega)$	Vrstva
L1	22.5	17.5	1
L2	22.5	17.5	1
L3	47.1	44.5	2
L4	47.0	44.6	2
L5	35.7	70.5	3
L6	35.7	70.5	3
L7	17.0	45.9	4
L8	17.0	45.9	4

Jak bylo zmíněno v podkapitole 1.2.4, použitý proudový zdroj [15] je schopen regulovat napětí od 4,5 V do 37 V. Z Ohmova zákona (rovnice 2) je zřejmé, že cívkami L3 a L4 není možné propustit více než 0,79 A, takže by nebyl využit celý potenciál použitého proudového zdroje (3,5 A).

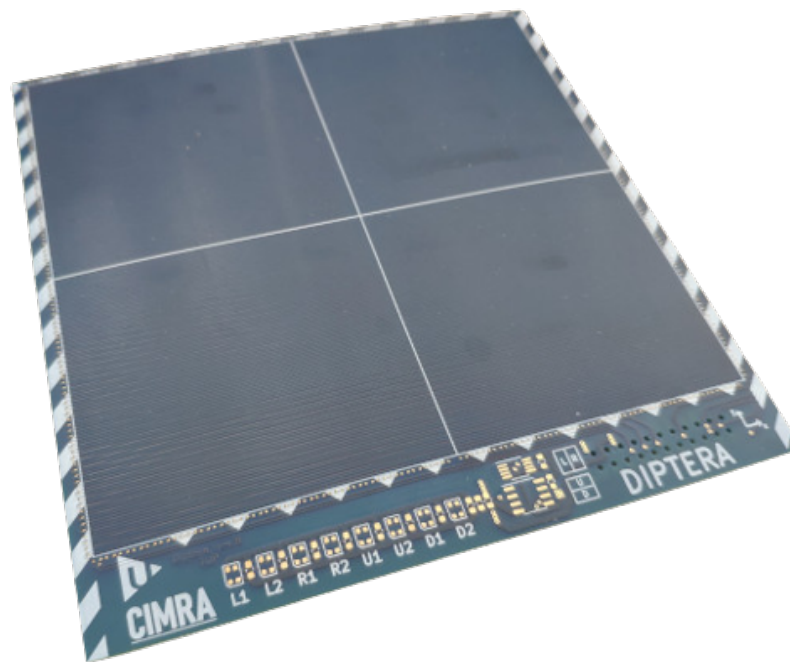
$$I = \frac{U}{R}, \quad (2)$$

kde I (A) je elektrický proud, U (V) je elektrické napětí a R (Ω) je elektrický odpor.

Další nevýhodou systému Trichoptera je již nastíněná vysoká technická náročnost a s tím spojená cena. Posledním handicapem tohoto systému jsou konstrukční otvory v rozích DPS, které vedou na malé nesymetrie cívek u krajů systému. Z těchto důvodů byl navrhnout nový typ systému, který je popsán v následující podkapitole.

1.4 Diptera

Diptera odstraňuje většinu slabých stránek předešlého systému, ale neumožňuje tvorbu mrazících ploch. Tato DPS obsahuje opět 8 aktuačních cívek, ale rozložených do dvou vrstev. Tentokrát každá dvojice cívek pokrývá pouze polovinu plochy systému. Plochu lze tedy rozdělit na dva vertikální a dva horizontální segmenty. Segmenty jsou na DPS označeny písmeny U (horní), D (spodní), resp. R (pravý), L (levý), viz obr. 11. Diptera tedy umožňuje (krom aktuace po celé ploše) aktuaci pouze jedné poloviny DPS.



Obrázek 11: Obdržená Diptera od výrobce před osazením součástek

V tabulce 3 lze vidět velké snížení naměřeného odporu aktuačních cívek při tomto uspořádání. Což je způsobeno přibližně poloviční délkou jednotlivých cívek (6 m) a eliminací vnitřních vrstev, tedy slepých prokovů. Zároveň byla použita širší vrstva mědi (85 μm). Uživateli je signalizováno napájení jednotlivých cívek pomocí osmice programovatelných RGB LED umístěných v dolní části systému.

Tabulka 3: Porovnání naměřených odporů aktuačních cívek systémů Diptera a Trichoptera

Cívka	$R_{\text{Diptera}} (\Omega)$	$R_{\text{Trichoptera}} (\Omega)$
L1	6.2	22.5
L2	6.2	22.5
L3	5.9	47.1
L4	5.9	47.0
L5	5.9	35.7
L6	5.9	35.7
L7	6.4	17.0
L8	6.4	17.0

Při takto nízkém odporu lze cívky napájet maximálním proudem, tedy 3,5 A. Ovšem činný výkon roste s druhou mocninou proudu, což lze vidět z následující rovnice

$$P = RI^2, \quad (3)$$

kde P (W) je činný výkon, R (Ω) je elektrický odpor a I (A) je elektrický proud.

S využitím rovnice 3 lze vypočítat, že činný výkon při napájení jedné cívky (L8) maximálním proudem (3,5 A) je roven 78,4 W. Je tedy vhodné řešit chlazení systému. Jako chladicí materiál byl zvolen hliník. Výhodou hliníku je nízká hmotnost a dobrá tepelná vodivost. Hliník má zároveň vysokou elektrickou vodivost, resp. nízký měrný elektrický odpor [17]. Právě poslední zmíněná vlastnost by mohla způsobit komplikaci a to zkratování průchodek DPS. Z tohoto důvodu byly průchodky natřeny izolačním, resp. těsnícím prostředkem¹. Následně byla nanášena vrstva tepelně vodivého lepidla *WLK DK 10* a hliníková deska s tloušťkou 45 mm byla nalepena na zadní stranu DPS.

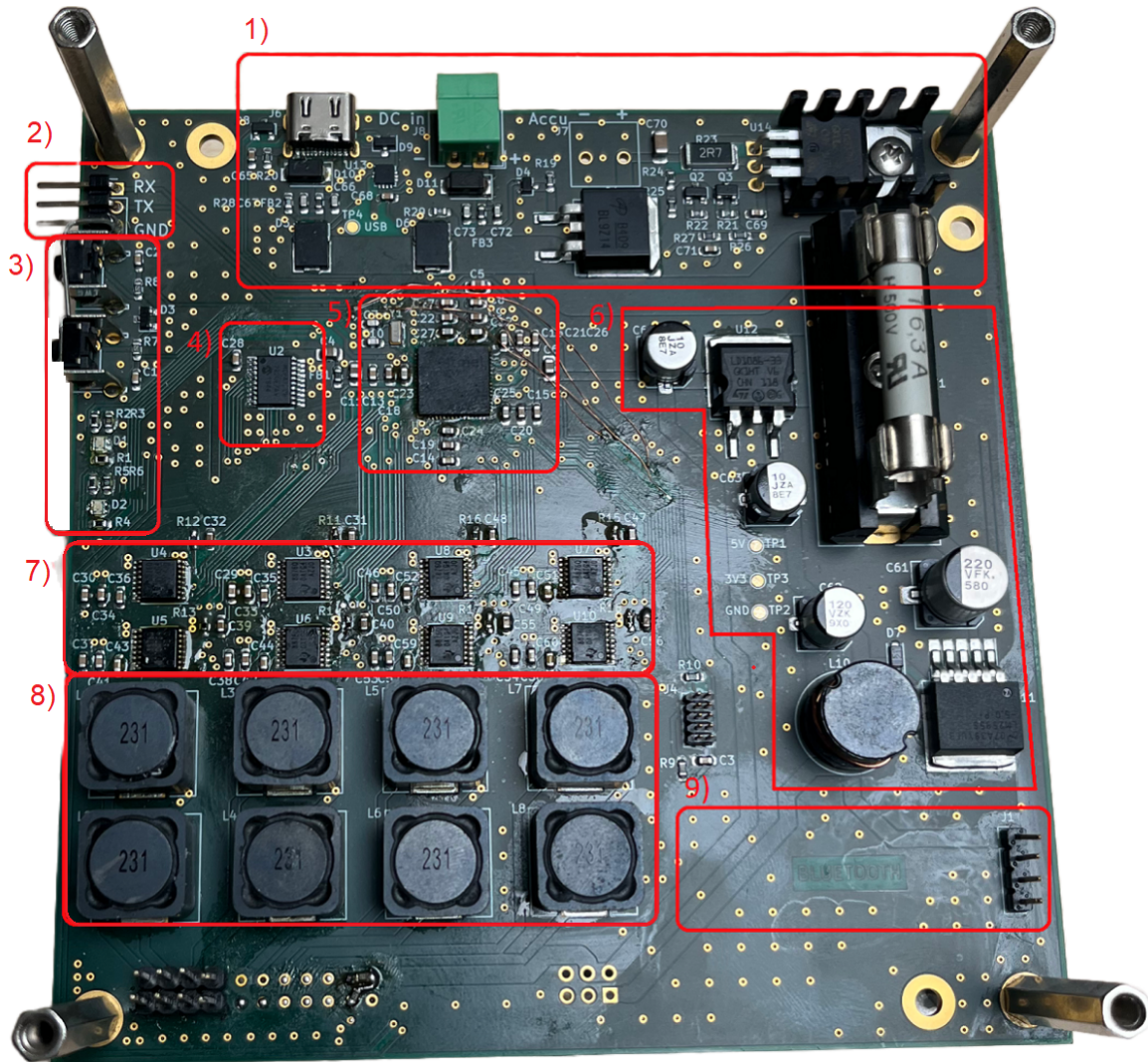
Pro monitorování teploty byl do spodní části přední strany umístěn teplotní senzor, který je připojen na I²C sběrnici. Přes stejnou sběrnici je také připojena elektricky mazatelná paměť (EEPROM), která slouží nejen pro zápis a čtení dat, ale také obsahuje unikátní identifikátor (ID) daný výrobcem. Toto 32bitové ID lze využít pro identifikaci desky. V rámci této práce vznikly tři stejné prototypy, které lze rozlišit právě unikátním identifikačním číslem.

Konstrukční otvory byly vytvořeny na chladiči, takže je nebylo nutné přidávat na samotnou DPS. Díky tomu je zajištěna symetrie aktuálních cívek i v rozích systému.

¹Více informací o těsnícím prostředku zde: <https://www.smooth-on.com/products/superseal/>

2 Řídicí část

Tato část je hlavním stavebním kamenem celého systému a lze ji vidět na obr. 12. Obrázek je rozdělen do 9 oblastí, které jsou označeny číslovkou a v následujícím textu je na ně odkazováno.



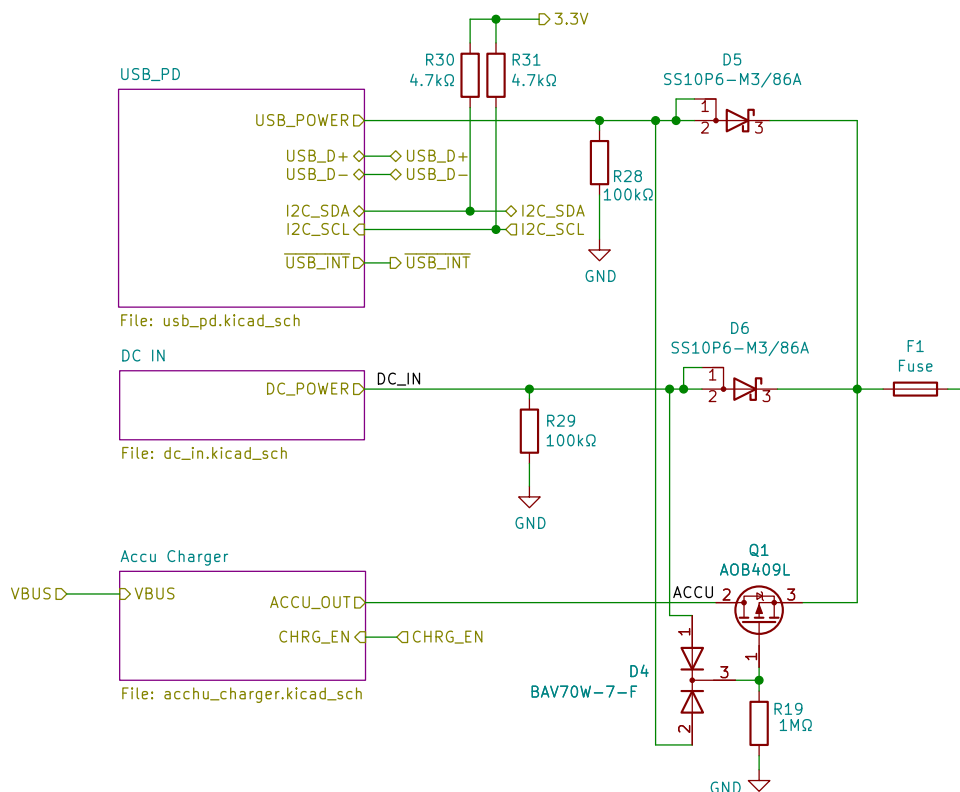
Obrázek 12: Osazená řídicí část

V horní části obrázku (oblast 1) lze vidět konektory pro vnější napájení systému. Kromě konektorů jsou zde také ochranné prvky (zenerovy diody, transily, feritové perly). Vnější napájení je detailně popsáno v podkapitole 2.1. Část napájení pokračuje v pravé části desky (oblast 6), kde probíhá úprava vstupního napětí na dále používané hodnoty. Bližší popis je v poslední části podkapitoly 2.1. V prostřední části desky (oblast 5) je umístěn mikrokontrolér společně s příslušnými součástkami. Popis zvoleného mikrokontroléru a jeho zapojení je v podkapitole 2.2. Veškeré periferie mikrokontroléru byly naprogramovány přímým přístupem do registrů v programovacím jazyce C++20. Mikrokontrolér zajišťuje komunikaci, které je věnována podkapitola 2.3. Dále řídí

spínání aktuálních cívek, resp. proudových zdrojů, které lze vidět na obrázku v oblasti 7. K nastavení požadovaných proudů slouží 8kanálový D/A převodník (oblast 4). Pod proudovými zdroji se nachází osmice SMD cívek (oblast 8) s hodnotou $230\ \mu\text{H}$, které jsou se zdroji zapojeny v sérii. Zapojení proudových zdrojů (včetně DA převodníku a SMD cívek) je popsáno v podkapitole 2.1.1. Řídící část obsahuje několik periférií (dvojici tříbarevných LED a dvojici tlačítek) používaných při ladění programu, které jsou v oblasti 3. Zařízení lze připojit k externímu zařízení (nejčastěji PC) přes UART konektor v levém horním rohu (oblast 2). Komunikace s PC je popsána v podkapitole 2.3.3. Poslední označená oblast (oblast 9) může být využita v budoucím vývoji, viz podkapitola 2.4.

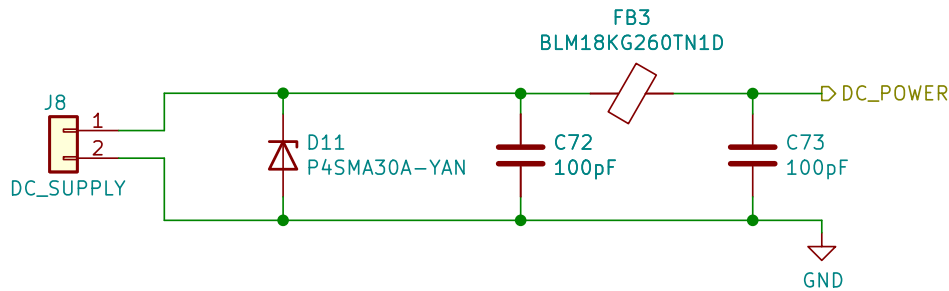
2.1 Napájení systému

Při návrhu bylo myšleno na flexibilitu napájení systému. Proto byly implementovány tři možnosti vnějšího napájení systému. Mezi požadovaná kritéria patřila snadná možnost napájení při vývoji systému. Dalším požadavkem byla možnost dočasného provozu systému bez vnějšího napájení, tedy použít akumulátor. Blokové zapojení všech tří možností lze vidět na obr. 13, jejichž detailní popis je popsán níže. Dále na schematu lze vidět diody D_4 , D_5 a D_6 , které zajišťují napájení pouze jedním z připojených zdrojů.



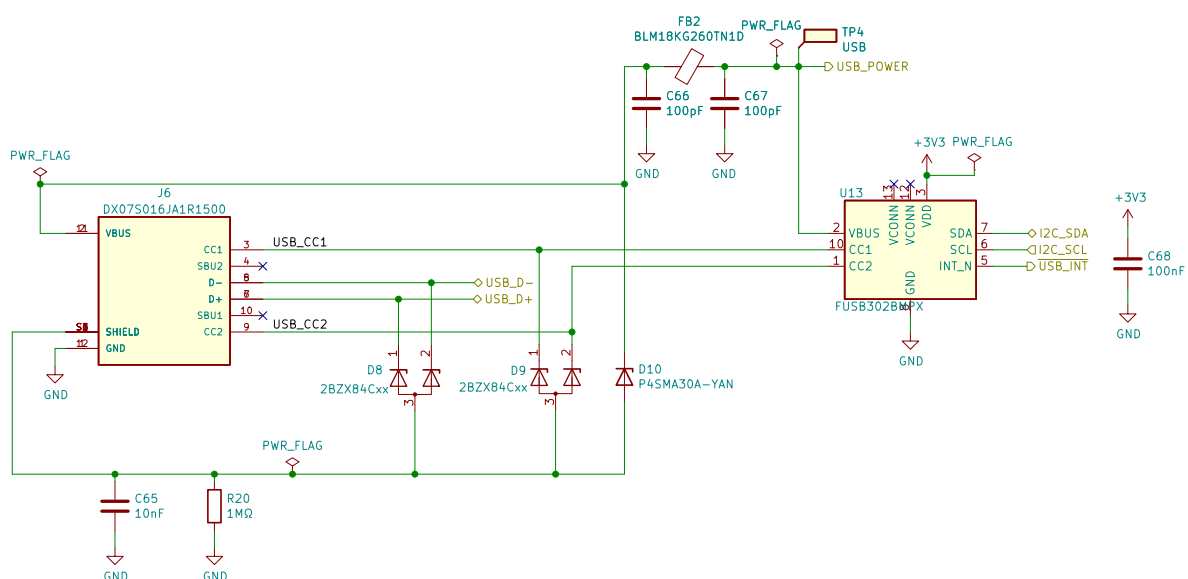
Obrázek 13: Schéma vnějšího napájení systému

První možností, která sloužila primárně pro komfortní vývoj, je napájení pomocí AC adaptéru. Použitý AC adaptér je ve tvaru standardní elektrické zástrčky pro síť nízkého napětí (v ČR 230 V, 50 Hz). Adaptér na svém výstupu poskytuje usměrněné napětí o hodnotě 18 V s maximálním proudem 3,3 A, resp. činným výkonem 60 W. Za konektorem J8 na obr. 14 se nachází transil (D11), který chrání systém před přepětím a feritová perla (FB3) pro filtraci vysokofrekvenčního rušení.



Obrázek 14: Schéma napájení AC adaptérem

Druhá možnost napájení využívá USB-C adaptér (obr. 15). Tento konektor je dnes velmi často používán v (pře)nositelné elektronice. Lze jej využít kromě přenosu dat také k napájení. USB-C na svém výstupu standardně poskytuje usměrněné napětí o hladině 5 V při maximálním proudu 3 A. Pokud však konektor umožňuje standard Power delivery (PD 3.1), tak výstupní napětí lze nastavit na 48 V při proudu až 5 A ($P = 240 \text{ W}$) [18]. Právě s využitím PD standardu lze systém napájet. Pro snazší nastavení tohoto standardu jsou piny *CC1* a *CC2* (Configuration Channel) USB-C konektoru připojeny do *FUSB302B* čipu (U13). Tento integrovaný obvod komunikuje s mikrokontrolérem skrze I²C sběrnici, přes kterou lze USB-PD nakonfigurovat. Dále tento čip provádí automatickou detekci připojení/odpojení konektoru, jeho orientaci atd. Detailní popis lze přečíst v katalogovém listu [19].



Obrázek 15: Schéma napájení USB-C

Poslední možností napájení systému je skrze akumulátor. Použitý akumulátor (Li-Ion) disponuje výstupním napětím 14,4 V (čtyři články o 3,6 V) a kapacitou 3200 mAh s maximálním výstupním proudem 10 A [20]. Články jsou umístěny do pouzder, které jsou zapojeny do série. energii akumulátoru lze vypočítat pomocí vzorce 4.

$$E = UQ, \quad (4)$$

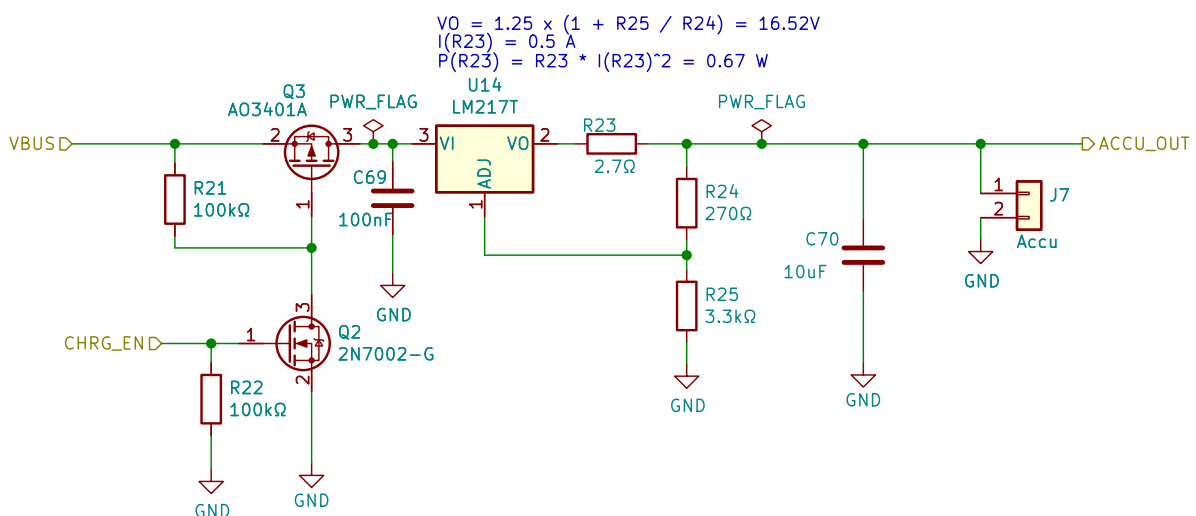
kde E (Wh) je výsledná energie, U (V) je elektrické napětí a Q (Ah) reprezentuje elektrický náboj.

Po dosažení hodnot lze zjistit, že energie akumulátoru je rovna 46,08 Wh. Pro snadnější manipulaci byla tato pouzdra připevněna k držáku vytisknutém pomocí 3D tisku, viz obr. 16.



Obrázek 16: Ukázka použitých Li-On článků v připevněných pouzdrech

Pokud je zároveň systém napájen jedním z předešlých zdrojů, tak je akumulátor odepnut od zbytku systému MOSFET tranzistorem Q1, viz obr. 13. V tu chvíli lze sekundární článek dobíjet skrze napěťový regulátor LM217T. Dobíjení akumulátoru řídí procesor signálem *CHRG_EN*. Nastavení tohoto signálu do vysoké úrovně otevře MOSFET tranzistor Q2, čímž se otevře i tranzistor Q3, viz obr. 17.



Obrázek 17: Schéma napájení z akumulátoru

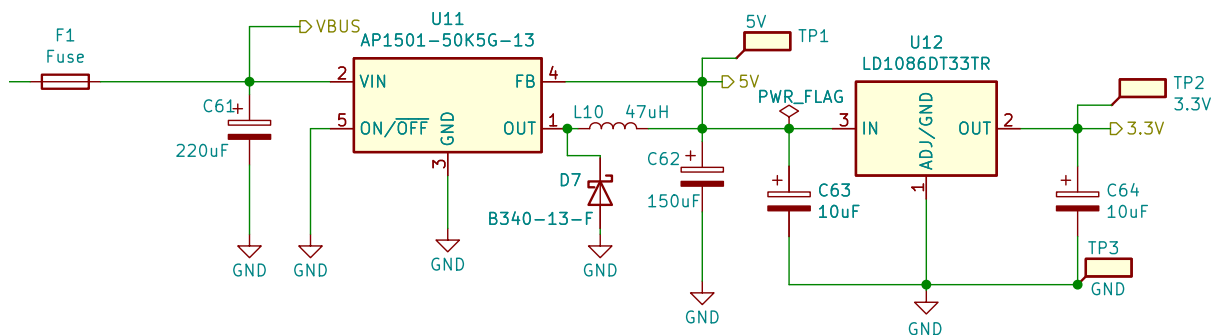
Použitý akumulátor byl vybrán tak, aby umožňoval provoz zařízení po dobu alespoň jedné hodiny, resp. akce miniaturních robotů. V tabulce 4 lze vidět soupis změřených odebíraných proudů jednotlivých částí a dopočítaný činný výkon.

Tabulka 4: Soupis změřených odebíraných proudů v systému

	I (A)	U (V)	P (W)
Aktuační část	2.1	18	37,8
Senzorická část	0.15	3,3	0,495
Rídící část	0.04	18	0,72
Součet	2.29	-	39,015

Při měření¹ byla prováděna akce robotů ve vodorovném/svislém směru. Odběr akuační části by se zdvojnásobil při diagonálním pohybu robotů. Spotřebu akuačních cívek lze nastavit od minimální hodnoty proudu potřebné pro akce (0,25 A) až po maximální hodnotu (3,5 A), kterou umožňuje proudový zdroj (viz podkapitola 1.2.4). Odběr senzorické části byl změřen při kontinuálním měření magnetické indukce všemi senzory. Samotná řídicí část má nejnižší odběr proudu.

Všechny výše zmíněné zdroje napájení poskytují dostatečné napětí, resp. proud pro spínání akuačních cívek. Ovšem pro napájení většiny elektroniky uvnitř systému (za pojistkou F1 na obr. 13) je vyžadována stabilní úroveň stejnosměrného napětí o hladině 3,3 V. Několik komponent (elektronika akuační části) vyžaduje třetí úroveň napětí a to 5 V. Pro dosažení druhé ze zmíněných úrovní byl použit spínaný zdroj (U11 na obr. 18). Naopak úroveň 3,3 V zajišťuje lineární regulátor (U12 na obr. 18), který zajišťuje stabilní hladinu napětí.



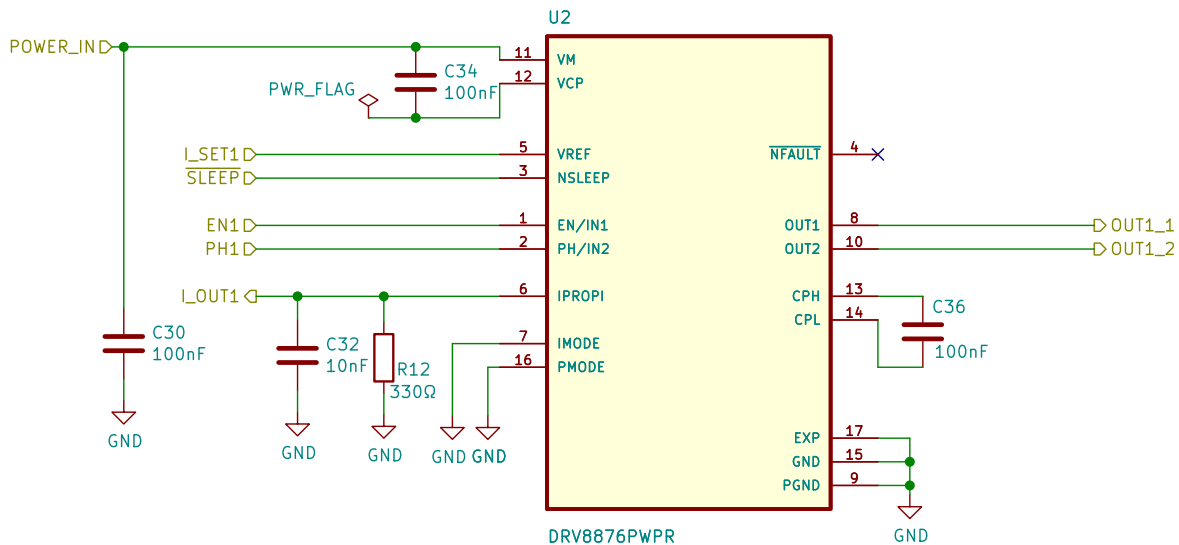
Obrázek 18: Schéma zapojení napěťových stabilizátorů

2.1.1 Proudový zdroj

Princip a vnitřní zapojení použitého proudového zdroje bylo popsáno v předešlé kapitole (podkapitola 1.2.4). V této podkapitole je popsáno zapojení zdroje v rámci systému. Na obr. 19 lze vidět schematické zapojení jednoho z osmi proudových zdrojů. Zapojení zbylých sedmi zdrojů se liší pouze v indexech signálů I_SET , EN , PH , I_OUT a OUT . Signály EN , PH a $SLEEP$ jsou připojeny na univerzální vstupně/výstupní piny mikrokontroléru. Signál I_OUT je připojen na

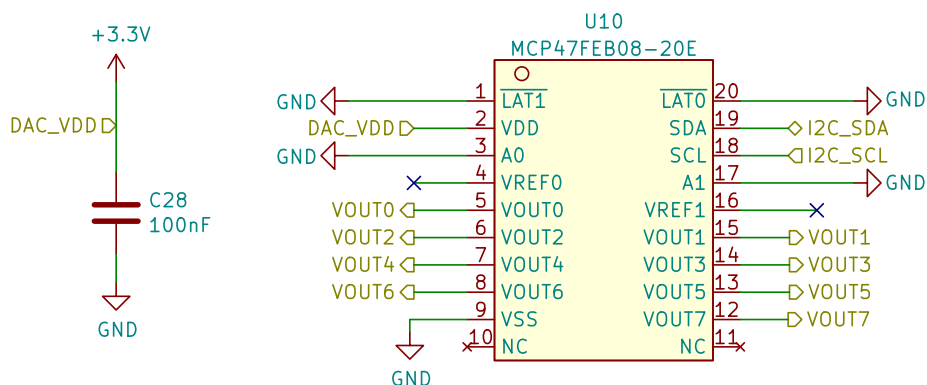
¹Měření probíhalo při okolní teplotě 25 °C

pin interního AD převodníku MCU a slouží jako zpětná vazba. Velikost tohoto signálu je rovna jedné tisícině výstupního proudu (signál OUT_1 , OUT_2).



Obrázek 19: Schéma zapojení proudového zdroje

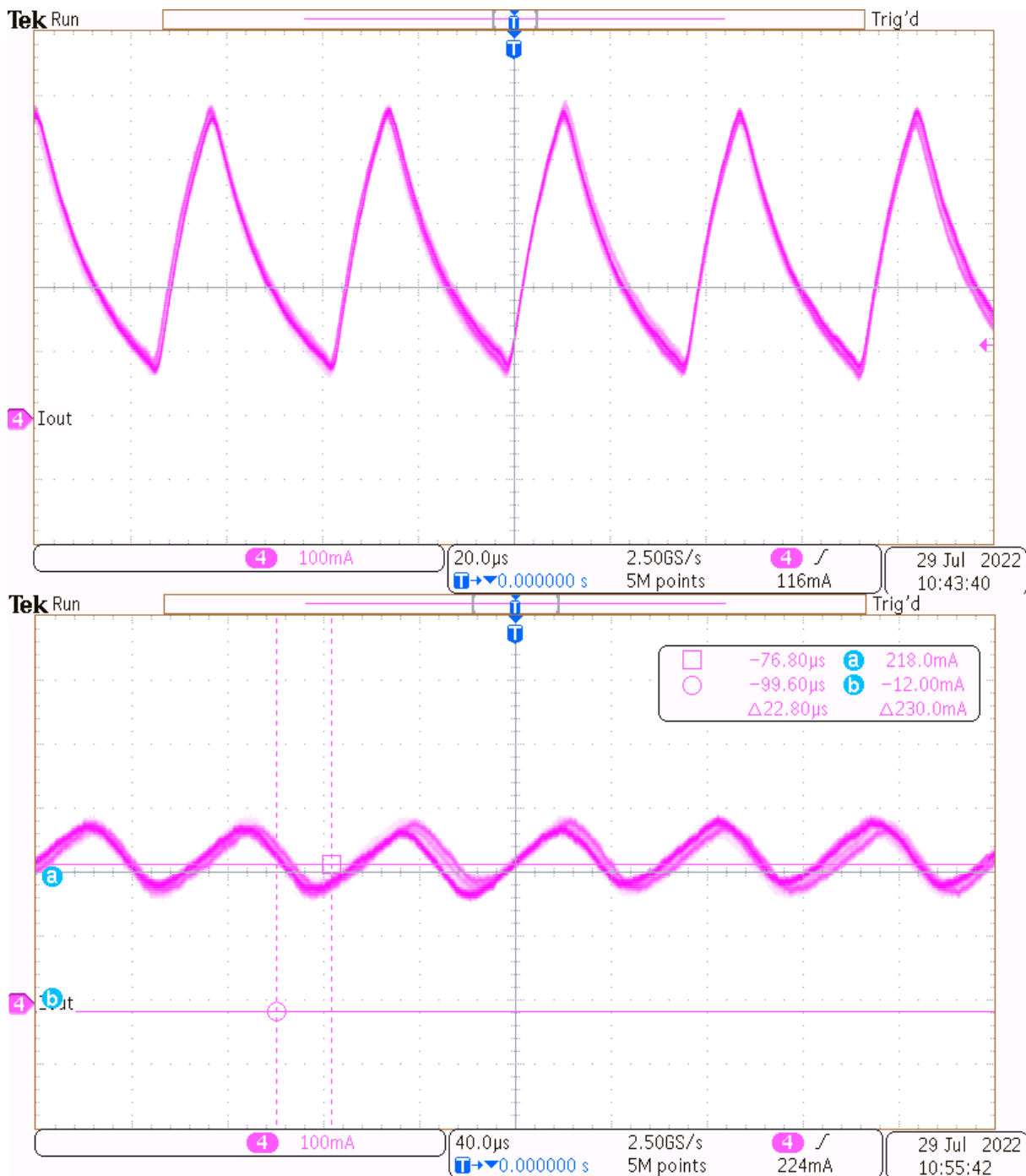
Pro nastavení amplitudy výstupního proudu slouží signál I_SET . Tento signál vede z jednoho výstupního kanálu 12bitového DA převodníku, který lze vidět na obr. 20.



Obrázek 20: Schéma zapojení digitálně analogového převodníku

Jedná se o 8kanalový DA převodník (s výstupy $VOUT0 - VOUT7$), který komunikuje s MCU přes komunikační sběrnici I^2C . Piny $VREF0$ a $VREF1$ lze využít pro připojení externího zdroje referenčního napětí. V této aplikaci byl však využit interní zdroj referenčního napětí (band gap) s katalogovou hodnotou 1,227 V.

Mezi výstupním proudem zdroje (signál I_OUT1) a konektorem k aktuální části je sériově připojena SMD cívka s hodnotou 230 μH . Tato cívka slouží ke snížení zvlnění proudu aktuální cívkou. Před přidáním cívek do návrhu proběhlo několik testů výstupního proudu zdroje do aktuální cívky. Na obr. 21 lze vidět v horní části průběh proudu bez přídavné indukčnosti s nastaveným výstupním proudem 500 mA, v dolní části s přídavnou indukčností a výstupním proudem 200 mA.



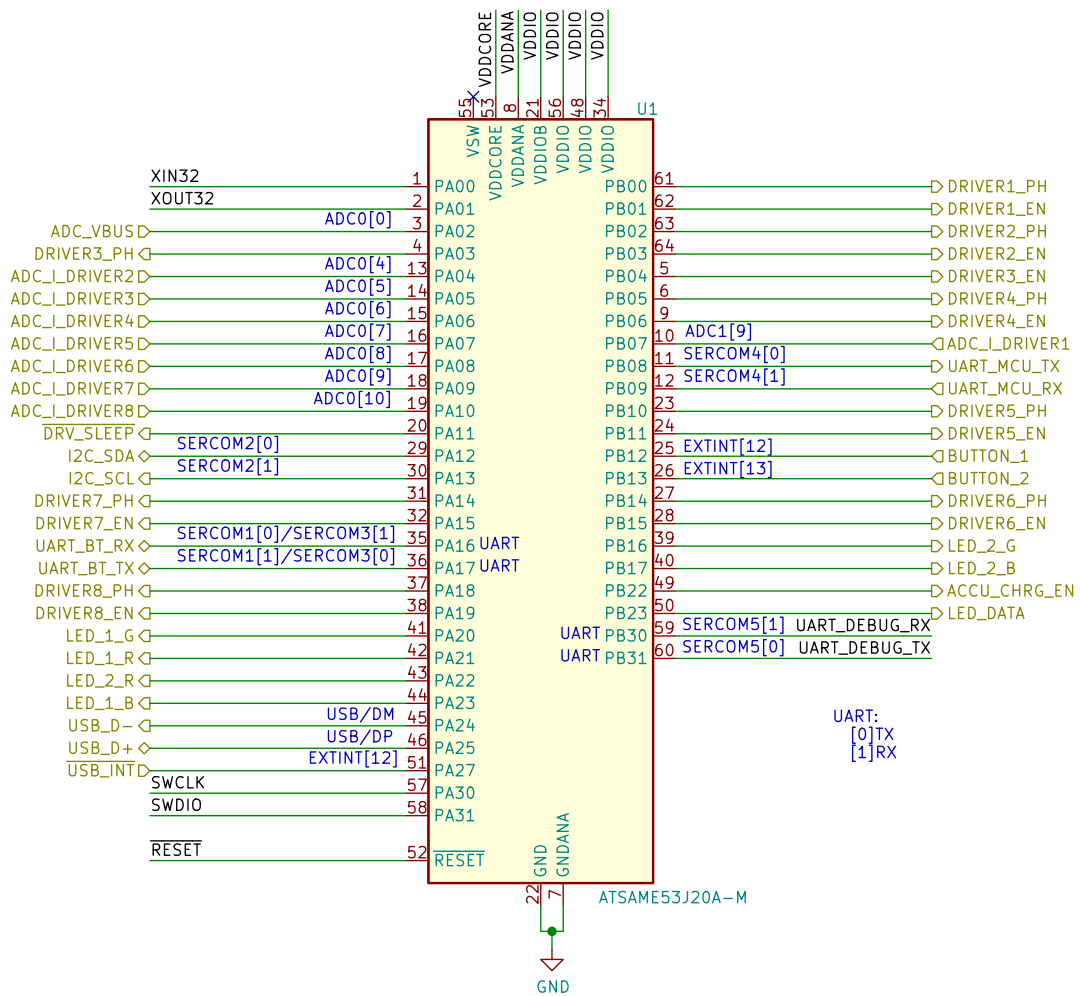
Obrázek 21: Průběhy proudu aktuální cívku bez a se zapojením přídavné indukčnosti 230 µH

2.2 Mikrokontrolér

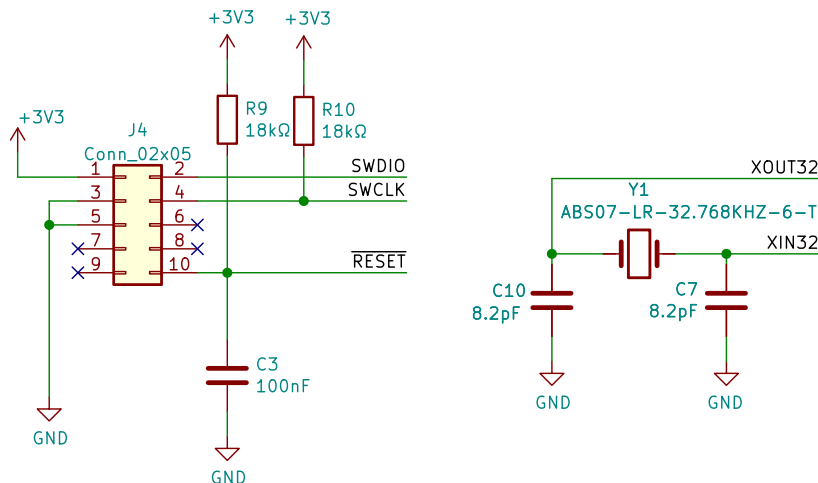
Řídící část společně s aktuální jsou řízeny mikrokontrolérem ATSAME51J19, který je založen na architektuře ARM Cortex M4F. Základní parametry vybraného mikrokontroléru jsou následující:

- 512 kB FLASH
- 192 kB RAM
- 4 kB cache
- 120 MHz maximální pracovní kmitočet
- 6× SERCOM (Serial Communication Interface - UART, SPI, I²C)
- 12 bit A/D převodník, 1 Msps
- 8x čítač/časovač
- 51 vstupně/výstupních pinů

Schematické zapojení mikrokontroléru lze vidět na obr. 22. K mikrokontroléru je připojen krystal Y1 s rezonančním kmitočtem 32,768 kHz, který je následně vynásoben pomocí DFLL (Digital Frequency Locked Loop) na frekvenci 48 MHz, což je hlavní hodinový kmitočet mikrokontroléru. K programování a ladění programu bylo využito standardní SWD rozhraní (konektor J4). Na obrázku 23 lze vidět schematické zapojení SWD rozhraní (vlevo) a krystal Y1 (vpravo).



Obrázek 22: Schéma zapojení použitého mikrokontroléru



Obrázek 23: Schéma zapojení krystalu a programovacího konektoru

2.3 Komunikace

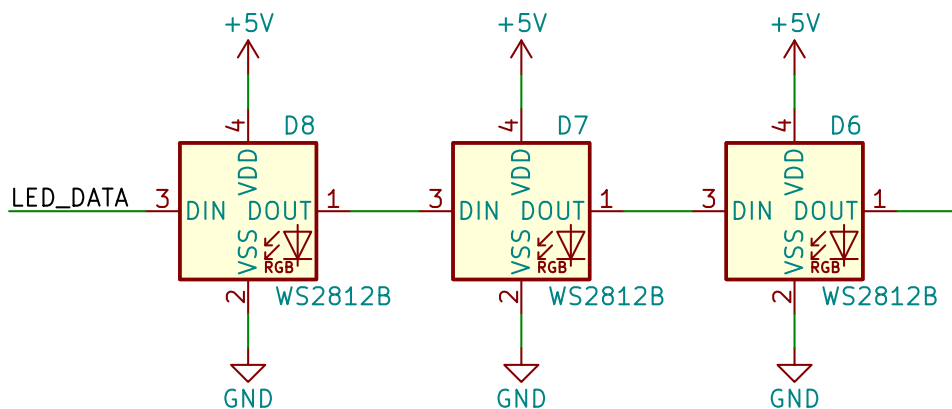
Nedílnou součástí systému je komunikace. V této podkapitole je přiblížena komunikace v rámci systému, kde byla implementována tři sériová rozhraní mikrokontroléru a to I²C, SPI a UART. Dále je zde popsána komunikace s PC, resp. uživatelem přes grafické uživatelské rozhraní MagNet.

2.3.1 Komunikace s aktuální částí systému

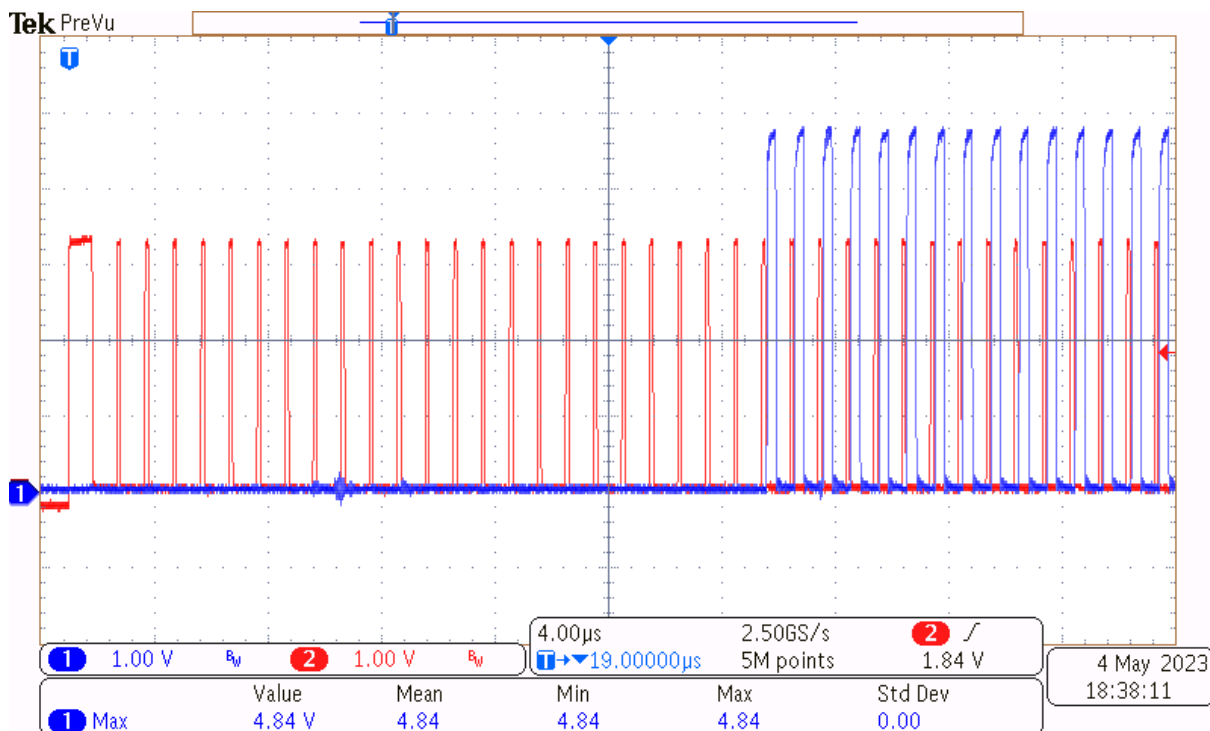
Jak bylo zmíněno v podkapitole 1.4, aktuální část obsahuje kromě koplanárních cívek také teplotní senzor, elektricky mazatelnou paměť (EEPROM) a osmici programovatelných RGB LED. Teplotní čidlo společně s EEPROM jsou připojeny na I²C sběrnici. Periferie I²C je nakonfigurována na režim *fast mode*[21] s přenosovou rychlostí 400 kbit/s.

Použité tříbarevné LED WS2812B jsou zapojeny kaskádně a mají vlastní komunikační protokol, který využívá pouze jeden datový vodič a jsou napájeny hladinou 5 V, viz obr. 24. Každou LED lze nastavit sekvencí 24 bitů s periodou 1,2 μs. Tyto 3 osmice bitů reprezentují jednotlivé barvy (červená, zelená, modrá) a intenzitu svícení. Chceme-li rozsvítit nebo zhasnout všech 8 LED, je nutné přes datový vodič přenést 192 (8*24) bitů dat, kde prvních 24 bitů naprogramuje první LED, následujících 24 bitů druhou LED, apod. (viz obr. 25). Pro generaci relativně krátkých pulzů (400 ns) byla využita sběrnice SPI, resp. pouze pin MOSI (master out, slave in), kterým jsou data posílána do LED.

Signál *LED_DATA* z obr. 24 je řízen pinem mikrokontroléru, tedy při nastavení vysoké logické úrovně je signál roven 3,3 V. Snímek obrazovky osciloskopu, obr. 25, znázorňuje poslaná *LED_DATA* z MCU (kanál 2) a zároveň data z pinu *DIN* LED označené D7 na obr. 24. Ze snímku lze vidět, že LED si interně převede signál *LED_DATA* na úroveň napájecího napětí VDD.



Obrázek 24: Schéma zapojení první trojice programovatelných LED



Obrázek 25: Poslaná data od MCU (kanál 2) a od první LED (kanál 1)

Aktuační a řídicí část jsou mezi sebou spojeny 22pinovým SMT konektorem. Konektor každým pinem umožňuje propouštět proud o amplitudě 4,1 A, což je pro tuto aplikaci dostatečné.

2.3.2 Komunikace se senzorickou částí

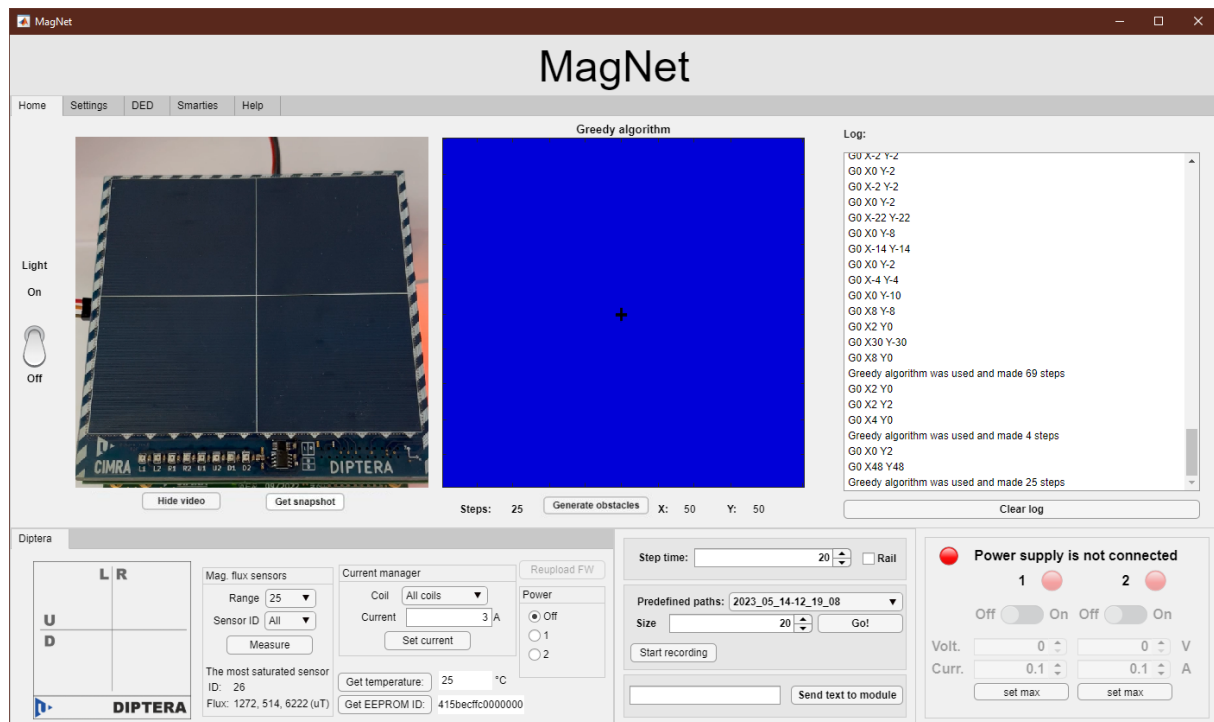
Fyzické propojení obou částí je uskutečněno 6pinovým SMD konektorem. Řídicí část zajišťuje skrze tento konektor jak napájení (3,3 V a 5 V) senzorické části, tak přenos dat pro komunikaci. Sensorická část má vlastní mikrokontrolér (detailní popis v kapitole 3). Pro komunikaci mezi těmito dvěma mikrokontroléry byla zvolena komunikační sběrnice UART. Detailní popis komunikace Sensorické části je popsán v 3.5.

2.3.3 Komunikace s PC

Komunikace s PC probíhá přes sériovou linku. Uživatel může se systémem komunikovat pomocí grafického uživatelského rozhraní *MagNet* [22]. Tato okenní aplikace je vyvíjena v programovacím jazyce MATLAB. Již v době zadání práce byla starší verze této aplikace využívána pro komunikaci s několika již existujícími systémy tohoto typu. Při tvorbě aplikace *MagNet* bylo využito objektivně orientovaný přístup programování. Grafické rozhraní bylo vytvořeno ve vestavěném grafickém editoru App Designer, který je součástí programu MATLAB od roku 2016.

Po prvním spuštění aplikace je nutné detekovat připojené systémy k PC. To lze udělat v záložce *Settings* tlačítkem *Detect devices*. Pokud je připojen jeden ze známých systémů, objeví se jeho název se základními informacemi v tabulce v prostřední části stejné záložky. Kromě tabulky se také objeví ve spodní části aplikace nová záložka, resp. záložky nesoucí názvy detekovaných systémů. Jelikož každý systém je unikátní, tak jednotlivé záložky jsou uzpůsobeny danému systému. Například systémy *Diptera* a *Trichoptera* nabízejí možnost nastavení proudů jednotlivými aktuačními cívkami, viz podkapitola 1.4. Dále obsahují již zmíněný senzor teploty, ze kterého lze zobrazit aktuální teplotu ve stupních Celsia. Také zde lze vyčíst unikátní sériové číslo EEPROM pro identifikaci PCB.

Přepne-li uživatel ze záložky *Settings* na záložku *Home*, viz obr. 26 může například spustit kameru pro sledování minirobotů v aktuační ploše, případně vytvořit videozáznam. Vpravo od přenášeného videa se nachází oblast pro plánování trajektorie minirobotů. Detailní popis aplikace je uveden v [22].



Obrázek 26: Záložka Home okenní aplikace MagNet

2.3.4 Komunikační protokol

Pro komunikaci mezi Řídící částí a aplikací MagNet, resp. uživatelem byl vytvořen komunikační protokol. Použitý protokol je založený na G / M kódech, které jsou používány např. v CNC programování nebo 3D tiskárnách [23]. Definované typy zpráv jsou popsány v tab. 5.

Tabulka 5: Podporované zprávy Řídící části

Příchozí zprávy	Popis
?	Identifikace zařízení
G0 $X_{int16_t(A)}$ $Y_{int16_t(B)}$	Akutace robota o A kroků v ose X a B kroků v ose Y
M1	Zákaz pohybu robota v diagonálním směru
M3 $uint8_t(A)$	Změna doby jednoho kroku robota na A (ms)
M4 $Kuint8_t(A)$ $Cuint16_t(B)$	Nastavení proudu cívky A na amplitudu B (mA)
M5	Vyčtení teploty ve stupních Celsia teplotním senzorem
M6	Vyčtení sériového čísla EEPROM

2.4 Možná vylepšení do budoucna

2.4.1 Bluetooth

Miniaturní roboty lze řídit pomocí aplikace MagNet skrze počítačovou klávesnici, myš nebo gamepad. MagNet je pouze desktopová aplikace, která podporuje operační systémy Windows a Linux. V dalším vývoji by bylo možné vytvořit aplikaci pro mobilní zařízení, která by se systémem komunikovala přes Bluetooth protokol. K tomuto účelu je na řídicí desce vyveden konektor, na

který lze připojit Bluetooth modul. Vybraný modul musí podporovat UART komunikaci (např. HC-06 TTL).

2.4.2 Vizualní lokalizace minirobotů

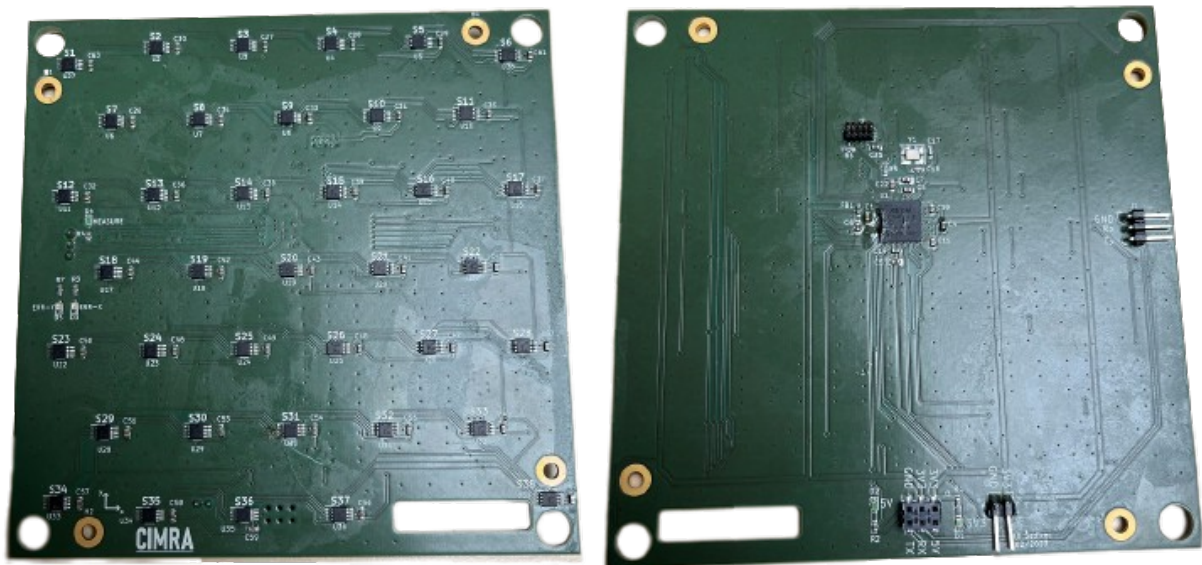
Výše popsaná desktopová aplikace MagNet umožňuje nevizuální lokalizaci miniaturních robotů, viz podkapitola 3.5.2. Další zlepšení by mohlo spočívat ve vizuální lokalizaci robotů. Již nyní aplikace umožňuje spuštění a sledování videokamery připojené k počítači v reálném čase. V dalším vývoji aplikace by mohly být implementovány algoritmy pro rozpoznání obrazu a tedy detekovat miniaturní roboty, případně další objekty.

3 Senzorická část

Poslední fyzická část systému slouží k nevizuální lokalizaci miniaturních robotů nebo např. zobrazení nízkofrekvenčního magnetického pole. Jedná se o DPS s rozměry 120 mm x 120 mm, která je v systému umístěna mezi Aktuační a Řídící částí. Vzdálenost mezi Senzorickou a Aktuační částí je nastavitelná pomocí distančních sloupků.

Na zadní straně senzorické desky (na obr. 27 vpravo) se nachází pouze mikrokontrolér, konektory pro napájení a UART komunikaci. Dále je zde dvojice LED, která signalizuje napájení desky, příslušným napětím (3,3 V a 5 V).

Přední strana senzorické desky (na obr. 27 vlevo) obsahuje 38 senzorů TMAG5170, které jsou blíže popsány v podkapitole 3.3. Sensory byly na desce rozmístěny tak, aby v co největším prostoru byl robot snímán třemi senzory simultánně. Detailní popis rozložení senzorů je vysvětlen v podkapitole 3.1. Sensory komunikují s mikrokontrolérem přes sběrnici SPI. Dále lze na přední straně desky nalézt trojici LED, které byly primárně využívány při ladění programu. Nyní LED signalizují probíhající měření, resp. chyby měření.

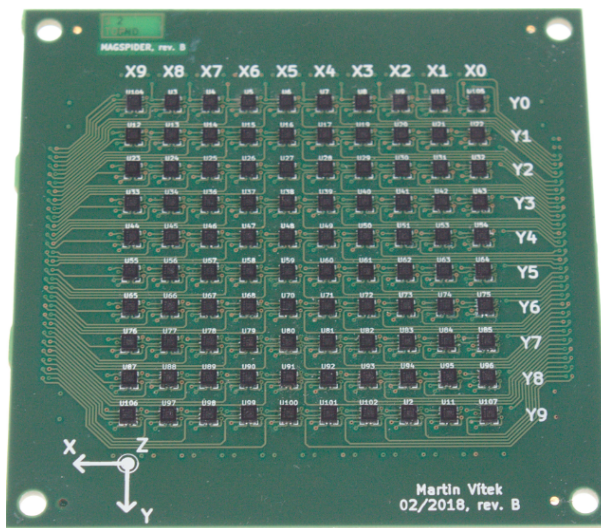


Obrázek 27: Vyrobená a osazená senzorická deska

3.1 Rozmístění senzorů

Před vznikem této práce již bylo vyvinuto zařízení podobného typu, které je využíváno pro nevizuální lokalizaci miniaturních robotů nebo např. pro vizualizaci nízkofrekvenčního magnetického pole [24]. Nevýhodou předešlého systému je relativně malý prostor, na kterém lze magnetické pole snímat (50 mm x 50 mm). Zároveň na této ploše je umístěno vysoké množství magnetome-

trů (matice 10x10) v pouzdře o velikosti 2 mm x 2 mm. To zapříčiňuje vyšší cenu a obtížnější osazení desky. Další nevýhodou tohoto systému je nízká vzorkovací frekvence (100 Hz) použitých magnetometrů a malý měřicí rozsah (4,9 mT).



Obrázek 28: Maticové rozmístění senzorů předešlého systému [24]

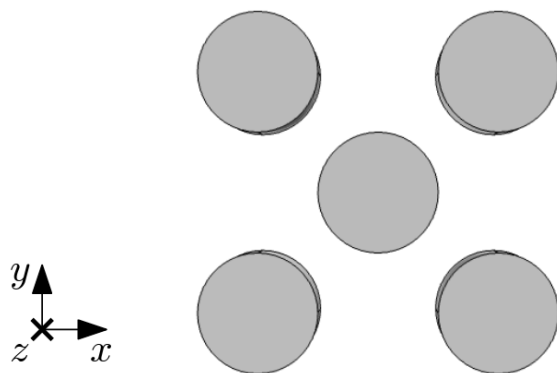
Cílem nově vyvíjeného systému bylo zvětšit snímatelný prostor a zároveň snížit počet použitých magnetometrů. Snížit počet senzorů lze dvěma způsoby. Prvním způsobem by mohlo být využití senzorů s vyšším rozlišením magnetické indukce a tedy dosáhnout vyšší vzdálenosti magnetometrů od snímaného robota. Avšak použité senzory předešlého systému dosahují rozlišení až 150 nT, což je o dva řády jemnější hodnota, než které dosahuje magnetické pole Země na jejím povrchu. Druhá možnost, která vede na snížení počtu senzorů se zaměřuje na optimální rozmístění magnetometrů v ploše, což je problematika, kterou se práce dále zabývá.

3.1.1 Matematický model miniaturního robota

V rámci této práce byl navržen matematický model miniaturního robota v programu *COMSOL Multiphysics*. Simulovaný robot je složen z pěti neodymových permanentních magnetů a PLA pouzdra vytisknutém pomocí 3D tisku. Permanentní magnety jsou uspořádány do čtverce s jedním přídatným magnetem uprostřed, viz obr. 29. Permanentní magnety jsou válcovitého tvaru s průměrem a výškou 1 mm (přesný typ k dohledání v [25]). Při tvorbě matematického modelu bylo zanedbáno plastové pouzdro (viz obr. 30), které je z pohledu magnetického působení srovnatelné se vzduchem.



Obrázek 29: Miniaturní robot v porovnání se sirkou



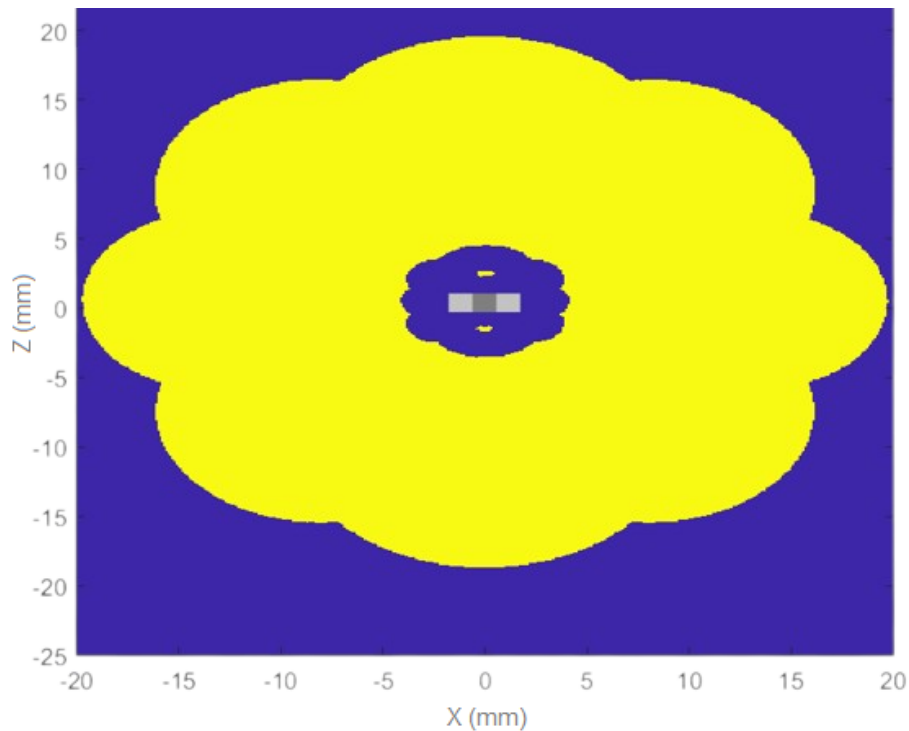
Obrázek 30: Model robota, pohled shora

3.1.2 Verifikace matematického modelu

Po vytvoření matematického modelu robot, viz obr. 30, byla nejdříve uskutečněna zjednodušená analýza k ověření správnosti matematického modelu. Tato analýza byla vypracována s parametry senzoru LSM303AGR který byl použit v předchozím systému. K analýze byl využit skriptovací jazyk MATLAB a rozhraní LiveLink. Toto rozhraní umožňuje přístup MATLAB kódu ke COM-SOL modelu a naopak. Dále byla definována minimální hodnota změřitelné magnetické indukce $50 \mu\text{T}$, která je rovna magnetické indukci Země na jejím povrchu. Zároveň byla zvolena maximální hodnota $4,9 \text{ mT}$, při které dochází k přesycení senzoru.

Skript na základě těchto hodnot definoval plochu v okolí robota v osách X, Z, ve které jsou hodnoty magnetického pole vytvářené robotem v daných mezích (krok analýzy = $0,1 \text{ mm}$). Díky souměrnému tvaru robota není nutné provést analýzu v ploše Y, Z. Vypočítaná data byla vykreslena do 2D grafu. Tuto vizualizaci lze vidět na obr. 31, kde žlutá oblast reprezentuje okolí robota, do kterého lze senzor umístit. Naopak modrá barva značí plochu, kde by byl senzor přesycen (uprostřed) nebo naopak okolí, kde je magnetická indukce nižší než definované minimum.

Z této analýzy bylo zjištěno, že senzor lze nejbližší k robotu umístit (bez přesycení senzoru) do vzdálenosti $3,5 \text{ mm}$. Změřená data předešlým zařízením [24], využívající simulovaný senzor, odpovídala minimální výšce $3,52 \text{ mm}$. Simulovaná data modelem jsou shodná (v přesnosti definované krokem simulace) s měřením a tudíž bylo ověřeno, že model správně reflektuje reálné rozložení magnetického pole. Skript dále spočítal maximální rozteč senzorů pro všechny úrovně osy Z (výška). Při minimální vypočítané výšce ($3,5 \text{ mm}$) by senzory mohly být rozmístěny s roztečí $36,4 \text{ mm}$ a v každém místě by byl robot snímán alespoň jedním senzorem. Avšak jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, cílem je snímat robota třemi senzory ve stejný okamžik, proto následovaly další analýzy.

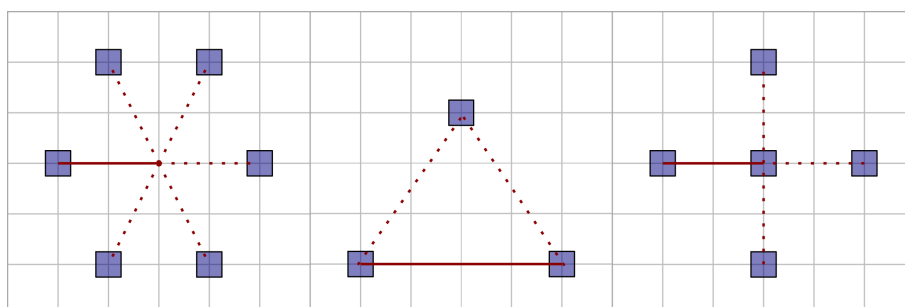


Obrázek 31: Grafické znázornění 2D prostoru v okolí robota (plocha X, Z)

3.1.3 Analýza rozložení senzorů

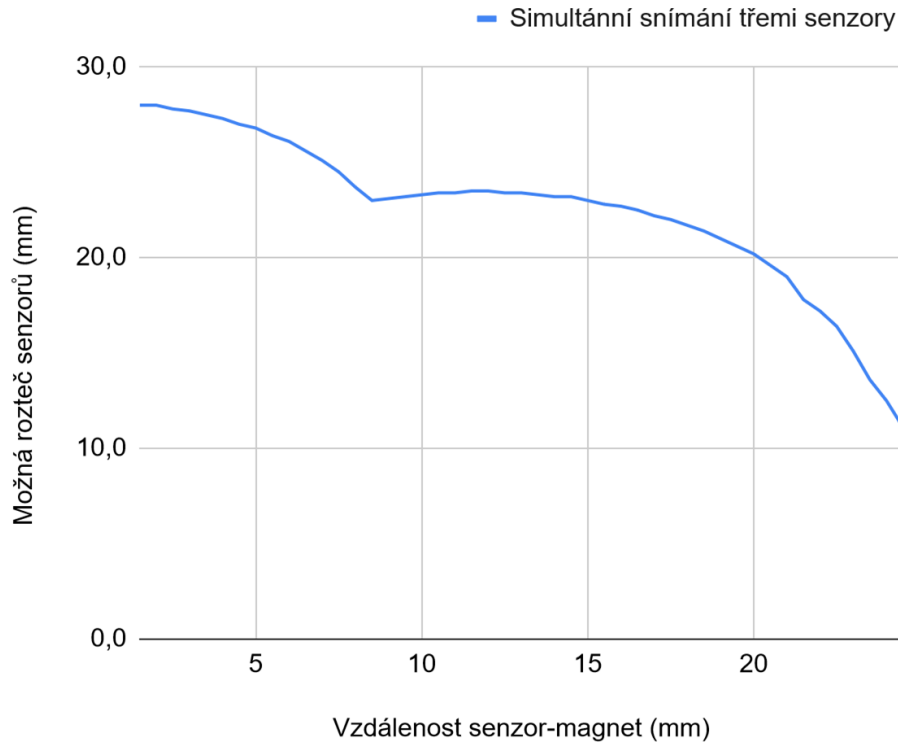
Po ověření vhodně navrženého modelu byl zvolen magnetický senzor TMAG5170A, kterému je věnována podkapitola 3.3. Následovala druhá analýza, která byla rozšířena do 3D prostoru. V této analýze bylo změněno kritérium minimální změřitelné magnetické indukce z $50 \mu\text{T}$ na $5 \mu\text{T}$, protože se předpokládá s kalibrací senzorů na začátku měření, která je popsána v 3.4.1. Zároveň byla změněna i maximální hodnota změřitelné magnetické indukce z $4,9 \text{ mT}$ na 100 mT , kterou nový senzor nabízí. Zároveň byla určena minimální vzdálenost senzorů a robota na 8 mm , která vyplývá z tloušťky aktuální části Diptera (6 mm) a 2 mm rezervy.

Algoritmus analýzy byl vyvinut v našem výzkumném týmu CIMRA FEL [1]. Algoritmus hledá pomocí metody bisekce největší vzájemnou vzdálenost senzorů tak, aby byla stále splněna podmínka simultánního snímání robota alespoň třemi senzory. Tato vzdálenost je hledána pro 15 definovaných tvarů uspořádání, které svým tvarem umožňují periodickou kopii do plochy libovolné velikosti. Některé příklady uspořádání lze vidět na obr. 32.



Obrázek 32: Ukázka 3 z 15 definovaných tvarů uspořádání

Z analýzy vyplynul ideální tvar rozložení senzorů jako rovnostranný trojúhelník, viz prostřední tvar na obr. 32. Výsledkem výpočtů je závislost vzdálenosti sensorové desky od aktuální desky na rozteči senzorů. Tato vzájemná vzdálenost je zobrazena na obr. 33. Důvodem poklesu v hodnotě kolem 8 mm je tvar magnetického pole a podmínky prahování v daných mezích, kdy každá z os magnetické indukce je zkoumána samostatně. V levé části křivky je tedy dominantní vliv magnetické indukce v osách X a Y, zatímco v pravé části křivky je dominantní vliv osy Z.



Obrázek 33: Závislost rozteče senzorů a vzdálenosti senzorů od robota

Analýza probíhala na výpočetním clusteru FEL s čistým časem běhu 3194 hodin (133 dní) na 8 jádrovém procesoru s 8 GB RAM v MATLABu 2022a. Výsledkem je nalezení optimálního tvaru rozložení senzorů jako rovnostranný trojúhelník s délkou strany 23 mm.

3.2 Dostupné varianty senzorů

Na trhu je dostupná velká škála magnetometrů. Běžně dostupné jsou Hallové sondy s analogovým výstupem nebo magnetometry v integrovaných obvodech s digitálním výstupem. Pro plánovanou aplikaci byla klíčová následující kritéria:

- Měření mag. indukce ve všech třech osách prostoru
- Rozsah alespoň 50 mT
- Rozlišení nižší než 5 μ T
- Komunikace přes SPI

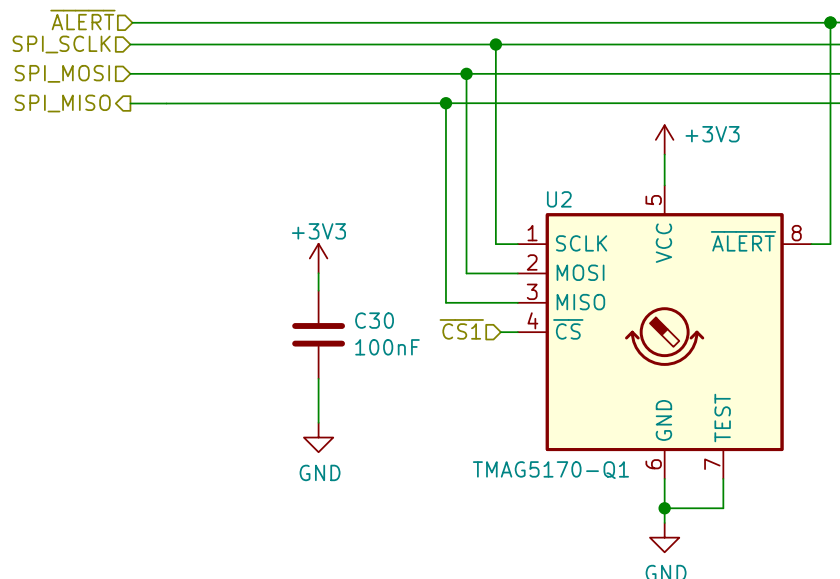
První kritérium je důležité pro následnou lokalizaci miniaturních robotů. Druhé kritérium vyplývá z použitých permanentních magnetů robotů. Rozlišení senzorů bylo určeno v podkapitole 3.1.1. Pro komunikaci s mikrokontrolérem je preferována sběrnice SPI, protože umožňuje přenosovou rychlost až 10 Mbit/s (maximální rychlost I²C = 3,4 Mbit/s). Dále SPI sběrnice používá pro adresování signály CS (Chip Select), takže není nutné řešit adresaci periférií a zároveň při přenosu dat nejsou posílány adresy. Je tedy větší prostor pro přenos měřených dat, což umožňuje vyšší rychlost vyčítání změřených hodnot. Na základě těchto kritérií byl zvolen senzor TMAG5170A. Parametry senzorů, ze kterých bylo vybíráno, jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Parametry senzorů magnetického pole, ze kterých bylo vybíráno

Označení	Typ	Rozhraní	Rozsah (mT)	Rozlišení	Cena (Kč)
LSM303AGR	3osý magnetometr	SPI/I ² C/SPI	±4,9	16b	180
MLX90397RLQ	3osý magnetometr	SPI/I ² C/SPI	±50	16b	85
TMAG5170A	3osý magnetometr	SPI	±100	16b	78
A1326	Hallova sonda	analog	±100	-	52
DRV5053OA	Hallova sonda	analog	±73	-	31

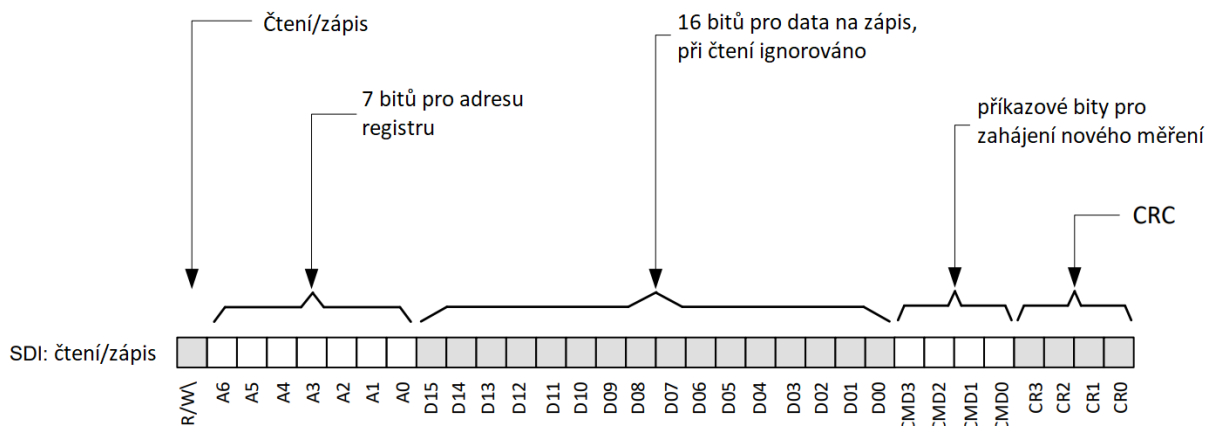
3.3 Použité magnetické senzory

Zvolený senzor TMAG5170A od firmy Texas Instruments umožňuje měření magnetické indukce ve všech třech osách prostoru (X, Y, Z). Pro každou osu je použit samostatný Hallův senzor. Při měření magnetické indukce lze vybrat jeden ze tří rozsahů a to 25 mT, 50 mT a 100 mT. Při nejmenším rozsahu senzor dosahuje rozlišení 763 nT. Pokud je zvolen nejvyšší rozsah, tak senzor má rozlišení 3,05 μ T, což stále splňuje požadavky definované v podkapitole 3.2. Dále tento senzor obsahuje integrovaný 16bitový AD převodník s maximální vzorkovací frekvencí 20 ksp/s. Pro kompenzaci chyby měření způsobené teplotním driftem lze využít data z integrovaného teplotního senzoru. Schematické zapojení senzoru lze vidět na obr. 34.



Obrázek 34: Schéma zapojení jednoho senzoru TMAG5170

Senzor komunikuje s mikrokontrolérem přes SPI sběrnici s frekvencí hodinového signálu 10 MHz. Pro komunikaci se používají 32 bitové rámce. Na obr. 35 lze vidět ukázkou SDI (serial data in) rámce, tedy rámce poslaného od mikrokontroléru do senzoru.

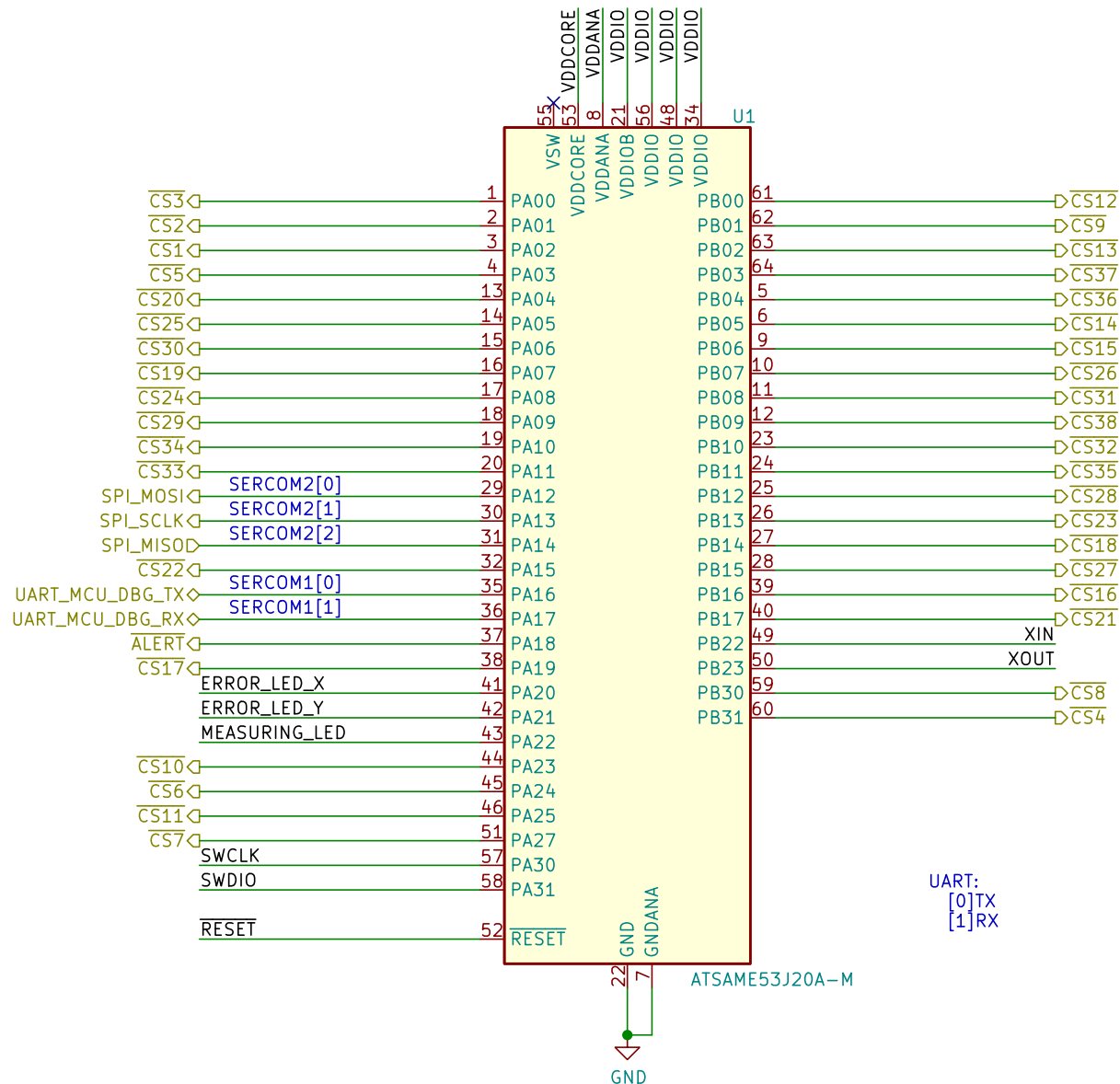


Obrázek 35: SPI rámec (SDI)

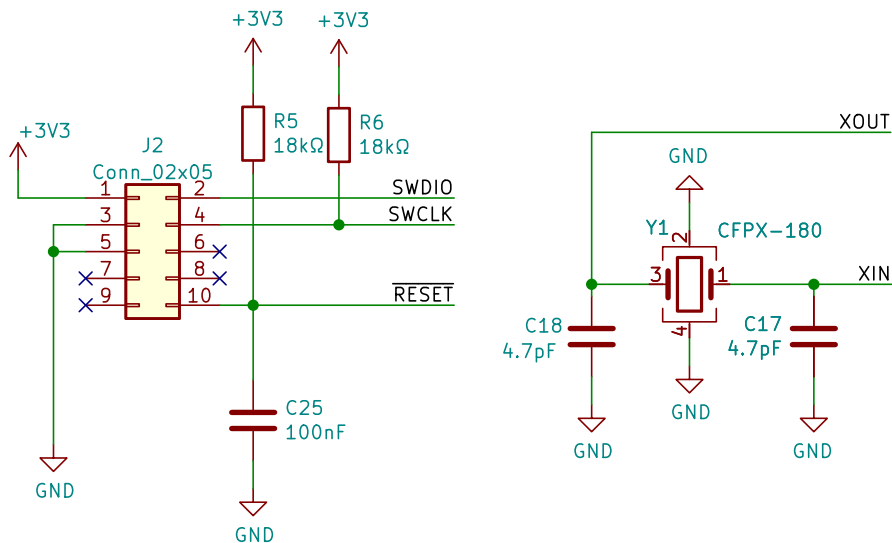
Při následném SDO (serial data out) rámci je přenášeno 12 stavových bitů, 16 bitů dat a opět 4 bity cyklicky redundantního součtu (CRC) pro detekci chyb. Stavové bity obsahují informaci například o vzniklých chybách v posledním měření o chybném CRC nebo zda registry, do kterých se ukládají změřená data mají aktuální hodnoty.

3.4 Mikrokontrolér

Řízení této části má na starosti mikrokontrolér, který je stejného typu jako v kapitole 2.2. Tentokrát byl však zvolen krystal Y1 s rezonanční frekvencí 20 MHz. Většina vstupně výstupních pinů byla využita pro CS (chip select) signály senzorů. K programování mikrokontroléru a ladění programu bylo opět využito standardní rozhraní SWD. Využití pinů MCU lze vidět na obr. 36. Zapojení krystalu Y1 a programovacího rozhraní SWD na konektoru J2 je na obrázku 37.



Obrázek 36: Pinout mikrokontroléru Sensorické části



Obrázek 37: Zapojení konektoru J2 (vlevo), zapojení krystalu Y1 (vpravo)

3.4.1 Kalibrace magnetometrů

Před měřením magnetické indukce zkoumaného objektu, případně na vyžádání přes UART rozhraní, je provedena kalibrace senzorů, která odstraňuje vliv magnetického pole Země a blízkého okolí. Mikrokontrolér přečte 10krát změřenou magnetickou indukci všech senzorů a provede její aritmetický průměr. Následně je tento výsledek pro každou měřenou osu všech senzorů odečten od právě změřené hodnoty.

3.4.2 Sériové číslo

Pro rozpoznání používaného prototypu může uživatel přečíst sériové číslo mikrokontroléru. Pro získání sériového čísla je přečteno 32 bitů na čtyřech, výrobcem definovaných, adresách.

```
void transmitMcuSerialNumber () {
    std::array<uint32_t, 4> serialNum {};
    serialNum.at(0) = *(uint32_t*)(0x008061FC);
    serialNum.at(1) = *(uint32_t*)(0x00806010);
    serialNum.at(2) = *(uint32_t*)(0x00806014);
    serialNum.at(3) = *(uint32_t*)(0x00806018);

    transmit_hex128(serialNum);
}
```

3.5 Komunikace

Senzorická část umožňuje komunikaci s uživatelem jako samostatné zařízení nebo v rámci celého systému, tedy skrze řídicí část. V obou případech probíhá komunikace přes rozhraní UART jehož parametry udává tabulka 7.

Tabulka 7: Parametry UART rozhraní

Parametr	Hodnota
Baudrate	115 200 Bd
Počet datových bitů	8
Počet stop bitů	1
Parita	-

3.5.1 Protokol komunikace

Jedná se o jednoduchý protokol, který usnadňuje komunikaci v rámci systému. Prvním znakem je vždy '#', který definuje, že se jedná o zprávu Senzorické části a zároveň začátek zprávy. Druhý znak určuje typ zprávy, tedy *request* (požadavek) nebo *response* (odpověď). Požadavek je vždy

velké písmeno abecedy, naopak odpověď je malé písmeno. Krom typu zprávy určuje druhý znak také příkaz. Po odeslání těchto dvou znaků již následují data, jejichž délka je definována typem zprávy. Přehled všech podporovaných zpráv lze vidět v tabulce 8.

Tabulka 8: Podporované zprávy Sensorické části

Příchozí zprávy	Popis
#M <i>ID senzoru</i>	Vyčtení magnetické indukce senzoru s $ID = ID\ senzoru$
#P	Nalezení a vyčtení nejvíce nasyceného magnetometru
#S	Vyžádání sériového čísla MCU
#R <i>rozsah</i>	Změna rozsahu na <i>rozsah</i> (25/50/100 mT)
#K	Zapnutí/vypnutí kontinuálního měření všech senzorů
#C	Provedení kalibrace senzorů
Odchozí zprávy	Popis
#m <i>ID senzoru Bx By Bz</i>	Magnetická indukce senzoru s $ID = ID\ senzoru$
#p <i>ID senzoru Bx By Bz</i>	ID a Magnetická indukce nejvíce nasyceného senzoru
#s 16B	Sériové číslo MCU (16 bajtů)
#r	Potvrzení změny rozsahu na <i>rozsah</i> (25/50/100 mT)
#c	Potvrzení provedení kalibrace senzorů

3.5.1.1 Vývojový protokol

V tabulce 9 je pro názornost ukázka Response při vývoji, kdy data byla posílána v ASCII formátu a oddělena znakem ','. Takový typ zprávy obsahuje mnoho dat, které není třeba posílat a zároveň je délka zprávy silně závislá na změřených hodnotách. Při změření maximálních záporných hodnot mag. indukce ($-100\,000\,000\text{ nT}$) ve všech třech osách by zpráva dosahovala délky 39 B.

Tabulka 9: Příklad zprávy vyčítání magnetické indukce senzoru s $ID = 1$ v osách X, Y a Z (nT)

Typ zprávy	Poslaná data	Délka (B)
Request	#M1	3
Response	#m;1;543;-235;321	17

3.5.1.2 Datově optimalizovaný protokol

Ve výsledný optimalizovaném protokolu byla zpráva upravena do formátu znázorněném v tab. 10, kdy celková délka přenášené zprávy je fixních 15 B.

Tabulka 10: Finální formát zprávy Response při vyčítání magnetické indukce

Typ dat	Data	Délka (B)
Start zprávy	'#'	1
Typ + příkaz	'm'	1
ID senzoru	(uint8_t) 1	1
Mag. indukce v ose X (nT)	(int32_t) 543	4
Mag. indukce v ose Y (nT)	(int32_t) -235	4
Mag. indukce v ose Z (nT)	(int32_t) 321	4

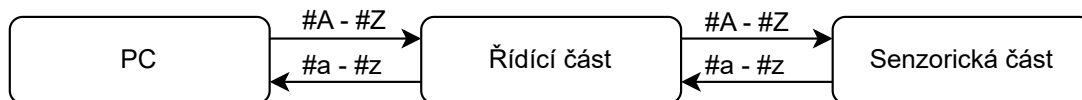
Při přenosu 15 B dat přes definované UART rozhraní (tabulka 7) je odesláno 150 bitů (data + start/stop bity). Následující rovnice udává obnovovací frekvenci (Hz) jakou jsou *data* (bit) počtu senzorů N (-) aktualizována:

$$f_{N \text{ senzorů}} = \frac{\text{Baudrate}}{N \cdot \text{data}}. \quad (5)$$

Dosadíme-li za N počet všech senzorů (38), tak $f_{38 \text{ senzorů}} = 20,21$ Hz. Naopak při měření mag. indukce pouze jedním senzorem, tak $f_{1 \text{ senzoru}} = 768$ Hz. Tyto údaje jsou důležité jak při nastavení měřicí rychlosti senzorů, tak při následné vizualizaci dat. Rychlost vyčítání hodnot je možné významně zrychlit zvýšením rychlosti UART rozhraní a to až na 3 MBd ($f_{38 \text{ senzorů}} = 526$ Hz). Dále lze snížit rozlišení z nT na μ T (změna datového typu) a tedy zkrátit délku zprávy na 70 bitů ($f_{38 \text{ senzorů}} = 1128$ Hz). Tato možná zvýšení vzorkovací frekvence nejsou nyní kritická, protože snímaná data jsou vizualizována pomocí skriptovacího jazyku MATLAB, který vykreslování omezuje na 20 snímků za sekundu [26].

3.5.2 Komunikace při zapojení v rámci systému

V případě použití Sensorické části v zapojení minirobotické platformy uživatel komunikuje pouze s Řídicí částí systému. Ta slouží jako prostředník komunikace, který zprávy přeposílá Sensorické části. Řídicí část dokáže snadno rozlišit zprávy určené pro Sensorickou část díky protokolu vysvětlenému v podkapitole 3.5.1.



Obrázek 38: Flow diagram komunikace při zapojení Sensorické části do minirobotické platformy

Uživatel komunikuje se Sensorickou částí přes již zmíněnou aplikaci MagNet (podkapitola 2.3.3). V případě, že aplikace detekuje připojené zařízení se jménem *Diptera* nebo *Trichoptera*, tak je ve spodní části aplikace vygenerována záložka s příslušným jménem, viz obr. 26. V této záložce se nachází sekce s názvem *Mag. flux sensors*, která je uživateli přístupná pouze pokud je v systému detekována sensorická část. Ovládání je potom velmi jednoduché, uživatel vybere požadovaný rozsah z rozbalovací nabídky s popiskem *Range* a klikne na tlačítko *Measure*. Po stisku tlačítka Sensorická část změří magnetickou indukci všemi senzory ve všech třech osách a uživateli zobrazí informace o nejvíce nasyceném senzoru (ID, hodnoty mag. indukce), čemuž odpovídá přibližná pozice robota.

Algoritmus nalezení nejvíce nasyceného magnetometru je proveden ve dvou krocích. V prvním kroku je zavolána metoda *calcAccumulateFlux*, která sečte absolutní hodnoty změřené magnetické indukce ve všech třech osách každého magnetometru. Následně je zavolána metoda *findPeakFluxIndex*, která sestupně seřadí výsledky předchozí metody pomocí algoritmu introspektivního

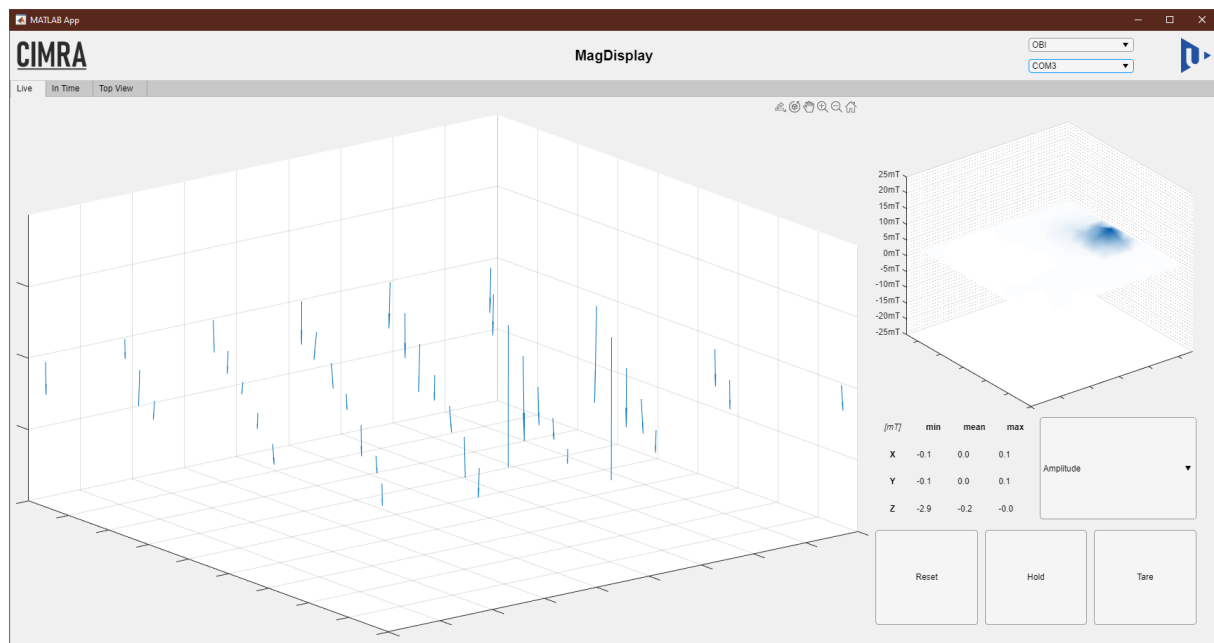
třídění¹ a navrátí pole tří nejvíce nasycených sensorů, viz kód níže. Trojice nejvíce nasycených sensorů je žádaná pro možnou přesnější lokalizaci robotů s využitím metody triangulace, která může být v budoucnu implementována.

```
std::array<std::size_t, 3> findPeakMagSensorIndex() {
    auto sensorsAcmlt = calcAccumulateFlux();
    auto maxSensorsIDs = findPeakFluxIndex(sensorsAcmlt);

    return maxSensorsIDs;
}
```

3.5.3 Komunikace jako samostatné zařízení

Pokud je Sensorická část používána jako samostatné zařízení, tak ji lze využít i k dalším účelům krom již zmíněné lokalizace miniaturních robotů. Další aplikací může být například vizualizace nízkofrekvenčního magnetického pole. Za tímto účelem byla vytvořena okenní aplikace *MagDisplay*. K tvorbě této aplikace byl použit programovací jazyk MATLAB. Po spuštění aplikace a připojení k zařízení přes sériový port je uživateli vizualizováno magnetické pole snímané Sensorickou částí v reálném čase, viz obr. 39.



Obrázek 39: Ukázka aplikace MagDisplay

V hlavní části aplikace lze vidět 38 vektorů jejichž počáteční pozice odpovídají pozici magnetometrů na DPS. Tyto vektory reprezentují změřenou magnetickou indukci magnetometrem. Uživatel si může v rozbalovací nabídce v pravé části aplikace zvolit, zda chce zobrazit výsledný vektor nebo jednu z jeho složek (X, Y nebo Z). Stejná data jsou vizualizována na ploše simulované ve 3D prostoru, kde osa Z je omezena zvoleným rozsahem sensorů. Při pořizování snímku aplikace byl pro ilustraci umístěn neodymový permanentní magnet na pravý okraj přední strany DPS.

¹Ilustrační video introspektivního třídění: <https://www.youtube.com/watch?v=67ta5WTjjUo>.

3.6 Porovnání s komerčním zařízením

Komerční sféra nabízí zařízení podobného typu pro různé aplikace. Parametry Senzorické části se blíží například komerčně dostupnému zařízení *MHLS-80-3* [27]. Jedná se o senzor s aktivním měřením v jedné ose 3osými Hallovými senzory. Výrobce kromě zařízení poskytuje software k ovládání zařízení a zároveň zajišťuje kalibraci. Tabulka 11 porovnává parametry obou zařízení.

Tabulka 11: Porovnání vyvíjeného a komerčně dostupného zařízení

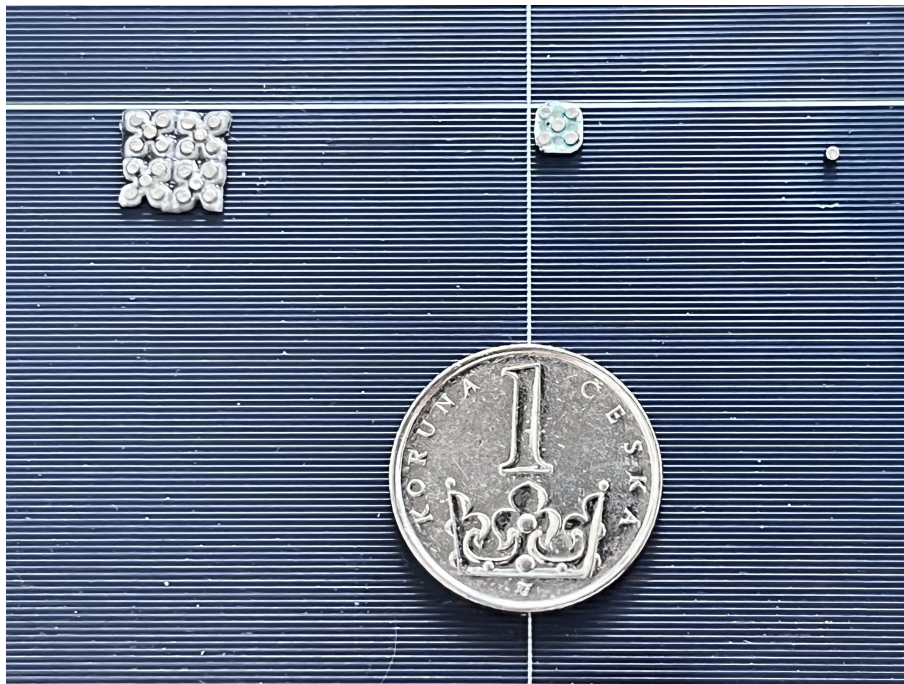
Parametr	Vyvíjené zařízení	MHLS-80-3
Měřená plocha/délka	120 mm × 120 mm	77,5 mm
Počet senzorů	38	32
Měřicí rozsah	±100 mT	±800 mT
Vzorkovací frekvence	20 Hz ¹	200 Hz
Rozhraní	UART	UART/USB
Cena	4229 Kč	7600 € (180 000 Kč)

Do ceny vyvíjeného zařízení je započítána pouze nákupní cena komponent. Nejdražší položkou byly samotné magnetometry (2964 Kč). Ve vyvíjeném zařízení oproti komerčnímu produktu není provedena kalibrace vzájemné polohy magnetometrů, čímž může docházet k nepřesnostem při kalibraci.

¹Teoreticky až 1128 Hz.

4 Experiment

Při experimentech, které vyžadovaly použití minirobotů, byly vždy otestovány tři druhy, které lze vidět na obr. 40.



Obrázek 40: Ukázka použitých robotů

Nejmenší robot z obrázku bude dále nazýván jako *Jednobot*, protože je složen pouze z jednoho permanentního magnetu. Robot nacházející se uprostřed je složen z 5 *Jednobotů* a proto bude referován jako *Pětibot*. Největší robot je složen ze 4 *Pětibotů* a proto bude dále označován jako *Dvacetibot*. Základní vlastnosti těchto konkrétních minirobotů lze vyčíst z tabulky 12.

Tabulka 12: Parametry použitých robotů

Robot	Dvacetibot	Pětibot	Jednobot
Rozměry (š x v x h) (mm)	8,01 x 1,1 x 7,98	3,65 x 1,38 x 3,74	1,00 x 1,00 x 1,00
Hmotnost (mg)	154,1	39,5	5,8
Magnetická indukce (mT)	2,7	1,1	0,7

Magnetická indukce robotů byla měřena Hallovou sondou, která byla připevněna na spodní stranu aktuální části *Diptera*. Na horní stranu byl položen robot, následně byla odečtena změřená maximální hodnota magnetické indukce.

4.1 Aktuace robotů

První provedený experiment byl zaměřený na aktuaci miniaturních robotů. Každý robot byl testován samostatně a test byl považován za úspěšný, pokud byl robot schopen pohybu ve všech směrech (4směrný systém). Chybovost pohybu nebyla v tomto experimentu brána v potaz. Tabulka 13 shrnuje při jakém minimálním proudu (I_{\min}) a maximálním I_{\max} protékajícím aktuačními cívkami byly roboty schopny aktuace. Proud byl inkrementován s krokem 50 mA.

Tabulka 13: Minimální a maximální proudy pro aktuaci

Robot	Jednobot	Pětibot	Dvacetibot
I_{\min} (mA)	1000	500	250
I_{\max} (mA)	3500	3500	3500

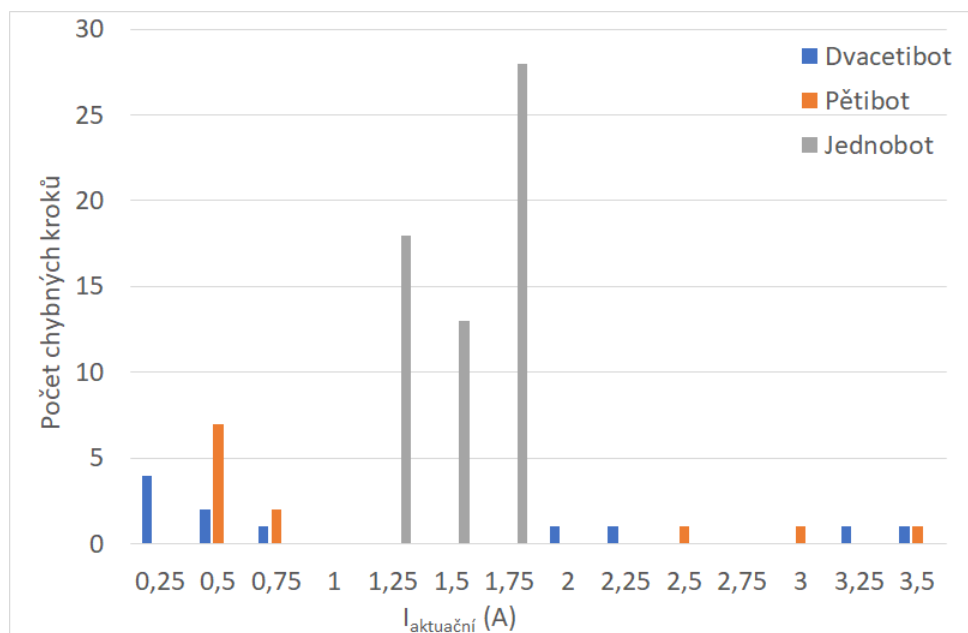
Vliv amplitudy elektrického proudu na aktuaci

Následně byla změřena chybovost aktuace pro různé amplitudy aktuačních proudů. Chybovost byla měřena způsobem, kdy robot byl umístěn do definovaného bodu a následně byla zadána cesta jedním směrem s délkou 50 mm (100 kroků). Následně byla odečtena vzdálenost od cílového bodu, ze které byl následně vypočítán počet chybných kroků. Stejný postup následoval pro zbylé tři směry pohybu. Celé měření bylo opakováno třikrát. Aritmetický průměr (zaokrouhlený na celé číslo) chybných kroků je zaznamenán v tabulce 14, kde znak '-' reprezentuje nedostatečný proud k aktuaci, viz tab. 13. Znak '#' byl použit, pokud robot udělal více než 50 chybných kroků.

Tabulka 14: Počet chybných kroků robotů pro různé aktuační proudy

I (A)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
Chyby _{20bot}	4	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
Chyby _{5bot}	-	7	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Chyby _{1bot}	-	-	-	-	18	13	28	#	#	#	#	#	#	#

Z tabulky 14 lze vidět, že Jednobot je při aktuaci nestabilní. Při jeho pohybu dochází k neustálému převalování, což často vede na změnu směru trajektorie a tedy nepřesnou aktuaci. Naopak Pětibot a Dvacetibot dosahují při dostatečných proudech velmi dobrých a stabilních výsledků. V mnoha provedených experimentech byl jejich pohyb bez chyby. Naměřená data byla následně vynesena do grafu, viz obr. 41.

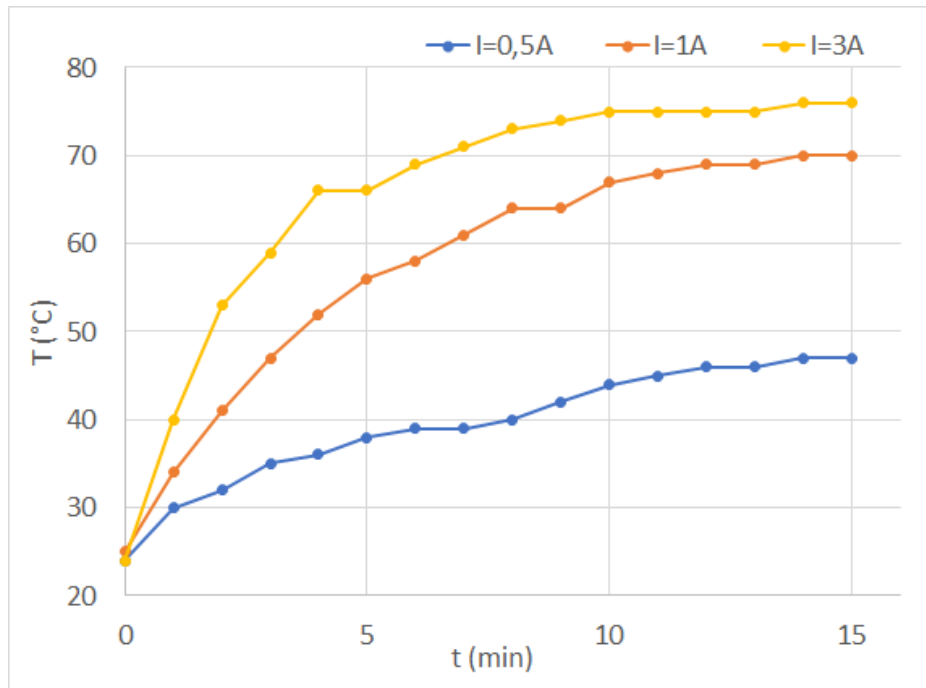


Obrázek 41: Počet chybných kroků robotů v závislosti na aktuálním proudu

4.2 Vývoj teploty Aktuační části při aktuaci

V tomto experimentu byla snímána teplota Aktuační části osazeným digitálním teploměrem, viz. 1.4. Pomocí aplikace MagNet byla zadána cyklická aktuace s daným proudem. Při aktuaci robot prováděl opakovaný pohyb po trajektorii ve tvaru čtverce s délkou strany 25 mm (50 kroků), což odpovídá jedné sekundě (doba kroku byla nastavena na 20 ms). Následně byla každou minutu odečtena teplota. Změřená teplota byla vynesena do grafu, viz obr. 42.

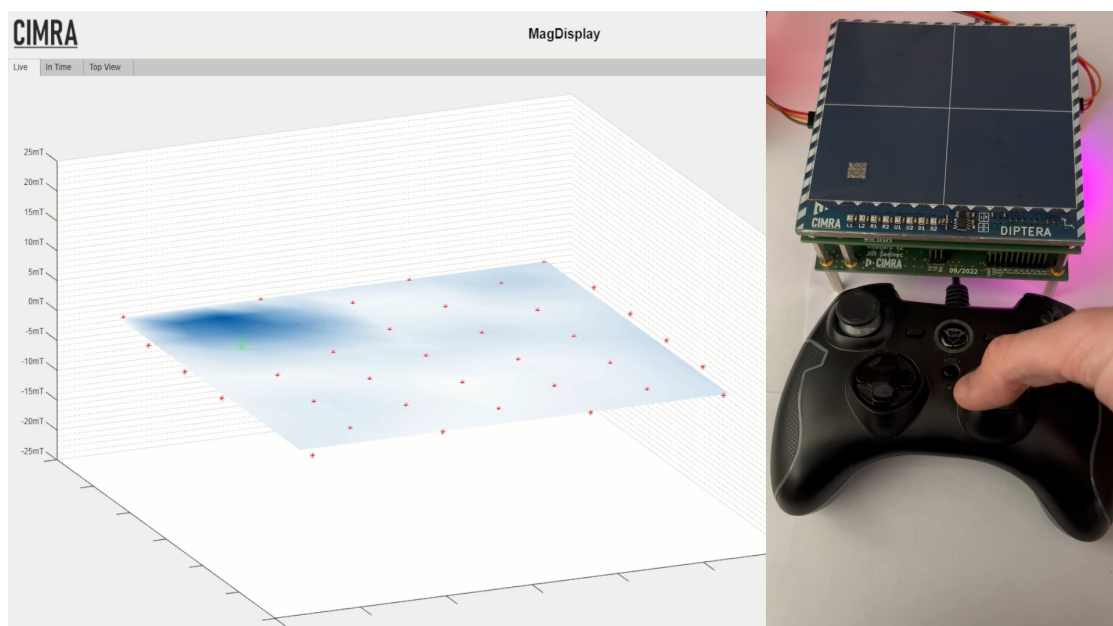
Aktuace robotů téměř maximálním výkonem nepřetržitě po dobu 15 minut se v praktickém využití neočekává. Proto se jedná spíše o zátěžový test platformy. Maximální změřená teplota dosahovala hodnoty 76 °C. Ta se blíží k teplotě 80 °C, při které dochází k odmagnetování použitých magnetů [25]. Je důležité zmínit, že v reálné aplikaci je žádoucí použít co možná nejnižší výkon potřebný k aktuaci, což pro nezatížené roboty odpovídá modré křivce, která dosahuje maximální teploty 47 °C.



Obrázek 42: Vývoj teploty aktuální desky při aktuaci pro různé proudy

4.3 Nevizuální lokalizace robotů v ploše

Poslední provedený experiment se zabýval nevizuální lokalizací miniaturních robotů a vizualizací magnetického pole tvořeného ať už robotem nebo jiným objektem. Pro lokalizaci lze využít aplikaci MagNet nebo MagDisplay. Výhodou aplikace MagDisplay je i vizualizace vytvářeného pole, proto byla v tomto experimentu upřednostněna. Na obr. 43 lze vidět screenshot z pořázeného videozáznamu, kde v levé části lze vidět aplikaci MagDisplay a v pravé části snímek z webkamery.



Obrázek 43: Aplikace MagDisplay a snímek z webkamery

Na obr. 43 se robot nachází v levé dolní části aktuální plochy, tato pozice je reflektována v aplikaci MagDisplay tmavě modrou barvou. Zároveň lze v aplikaci vidět fyzické rozmístění magnetometrů, kde senzory jsou znázorněny červenými znaky '*'. Nejvíce nasycený senzor je znázorněn větším zeleným znakem '*'. Experiment ověřil schopnost systému lokalizovat roboty i při samotné aktuaci, resp. tvorbě magnetického pole aktuálními cívkami.

V dalším testu byla vyzkoušena manipulace s robotem se zakrytou aktuální plochou. Uživatel s robotem manipuloval pouze na základě lokalizace v aplikaci MagDisplay. Všechny provedené testy včetně testování vizualizace magnetického pole jiných objektů než robotů lze vidět na pořízeném videu, které je možné nalézt na odkazu: <https://cimra.fel.zcu.cz/1/obvi>.



Obrázek 44: QR kód s odkazem na video

Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a tvorbou systému umožňujícího manipulaci miniaturními roboty v ploše. Vytvořené zařízení se skládá ze tří fyzických částí - Aktuální, Řídící a Senzorické.

Aktuační část slouží k tvorbě magnetického pole, které způsobuje aktuaci robotů. Pole je vytvářeno osmicí koplanárních cívek, které jsou rozmístěny v aktuační podložce. Byly navrženy dva prototypy s různým rozvržením koplanárních cívek - Trichoptera a Diptera. Oba prototypy byly experimentálně ověřeny, avšak Diptera má nižší elektrický odpor jednotlivých cívek, což je v této aplikaci výhodné a proto většina vývoje probíhala s tímto prototypem.

Řídící část obsahuje řídicí elektroniku, zajišťuje rozvod napájení a komunikaci v celém systému. Ovládacím prvkem je mikrokontrolér s architekturou ARM. Implementace firmwaru byla provedena v programovacím jazyce C++20 s využitím objektově orientovaného přístupu. Systém lze napájet třemi způsoby včetně vytvořeného akumulátoru, který lze ze zařízení i dobít. Řídící část dále obsahuje osmici proudových zdrojů, které individuálně regulují amplitudy proudů každé z aktuačních cívek.

Senzorická část systému slouží primárně k nevizuální lokalizaci robotů. Nejdříve byly provedeny analýzy optimálního rozmístění magnetometrů na základě matematických modelů miniaturních robotů. Pomocí vypočítaných dat byl vytvořen funkční prototyp, který na ploše 144 cm² obsahuje 38 magnetometrů. Předcházející zařízení podobného typu, které bylo vyvinuté na KEP FEL ZČU, obsahovalo 100 magnetometrů na ploše 25 cm². Dále byla vytvořena aplikace MagDisplay, která vizualizuje lokalizaci robotů a nízkofrekvenční magnetické pole.

Vytvořený prototyp je mechanicky chráněn navrženým krytem, viz příloha A, který byl vytisknut pomocí 3D tisku. Celý systém má rozměry 128 mm x 77 mm x 128 mm, což odpovídá přibližně 32 % objemu předchozího systému. Uživatel komunikuje se systémem přes grafické uživatelské rozhraní MagNet, které je využíváno pro řízení dříve vyvinutých systémů podobného typu. Funkčnost systému byla otestována několika experimenty.

Zařízení bylo prezentováno v rámci [článku](#)¹ publikovaném veřejnoprávní institucí Český rozhlas, který se zabýval možným využitím miniaturních robotů v budoucnosti. Byla vyrobena tři celá zařízení, kdy jeden prototyp je určen pro výzkumný tým prof. Ing. Jana Faigla, Ph.D. z FEL ČVUT.

¹Odkaz na článek: <https://radiozurnal.rozhlas.cz/velikost-jen-milimetr-ale-unesou-mnohonasobne-vic-nez-vazi-hmyzi-roboti-muzou-8968308>

Seznam použité literatury

- [1] *CIMRA*. URL: <https://cimra.fel.zcu.cz/> (cit. 20.05.2023).
- [2] *actuation - Český překlad - TechDico*. URL: <https://cs.techdico.com/p%C5%99eklad/angli%C4%8Dtina-%C4%8De%C5%A1tina/actuation.html> (cit. 23.02.2023).
- [3] O. Cugat, J. Delamare a G. Reyne, „Magnetic micro-actuators & systems (MAGMAS),“ GB-04, 2003. DOI: [10.1109/INTMAG.2003.1230784](https://doi.org/10.1109/INTMAG.2003.1230784).
- [4] *Magnetické pole vodiče s proudem*. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/286-magneticke-pole-vodice-s-proudem> (cit. 23.02.2023).
- [5] *André-Marie Ampère*. URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie_Amp%C3%A9re (cit. 23.02.2023).
- [6] *Magnet*. URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnet> (cit. 23.02.2023).
- [7] *Magnetické pole*. URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A9_pole (cit. 17.12.2022).
- [8] I. A. Ivan, G. Hwang, J. Agnus, M. Rakotondrabe, N. Chaillet a S. Régnier, „First experiments on MagPieR: A planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot,“ s. 102–108, 2011. DOI: [10.1109/ICRA.2011.5979885](https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979885).
- [9] M. Salehizadeh a E. Diller, „Two-agent formation control of magnetic microrobots,“ s. 1–6, 2016. DOI: [10.1109/MARSS.2016.7561726](https://doi.org/10.1109/MARSS.2016.7561726).
- [10] S. Chowdhury, B. Johnson, W. Jing a D. Cappelleri, „Designing local magnetic fields and path planning for independent actuation of multiple mobile microrobots,“ *Journal of Micro-Bio Robotics*, roč. 12, čvn. 2017. DOI: [10.1007/s12213-017-0094-6](https://doi.org/10.1007/s12213-017-0094-6).
- [11] J. Zemánek, „Distributed manipulation by controlling force fields through arrays of actuators,“ Disertační práce, Czech technical university in Prague, 2018.
- [12] M. Juřík, J. Kuthan, J. Vlček a F. Mach, „Positioning Uncertainty Reduction of Magnetically Guided Actuation on Planar Surfaces,“ s. 1772–1778, 2019. DOI: [10.1109/ICRA.2019.8794190](https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794190).
- [13] *Power supply*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_supply (cit. 07.03.2023).
- [14] *LDO basics*. URL: <https://www.ti.com/lit/eb/slyy151a/slyy151a.pdf> (cit. 23.01.2023).
- [15] *40-V, 3.5-A H-bridge motor driver with integrated current sensing & current-sense feedback*, SLVSDS7B, Rev. B, Texas Instruments, 2019. URL: <https://www.ti.com/document-viewer/drv8876/datasheet>.
- [16] J. Kuthan, M. Juřík, M. Vitek a F. Mach, „Collective planar actuation of miniature magnetic robots towards individual robot operation,“ s. 1–6, 2020.
- [17] *Elektrotechnické materiály I*. URL: <https://publi.cz/books/353/Cover.html> (cit. 06.03.2023).

-
- [18] *USB Charger (USB Power Delivery)*. URL: <https://www.usb.org/usb-charger-pd> (cit. 23. 02. 2023).
- [19] *USB rozhraní IC USB-C PORT CONTROL W/ PD*, FUSB302, Rev. 1.10, onsemi / Fairchild, lis. 2015. URL: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/onsemi-Fairchild/FUSB302?qs=kt7ai0Z8qUVvnu5pYTefGQ%5C%3D%5C%3D>.
- [20] *Rechargeable Lithium Ion Battery Model : INR18650 MH1 3200mAh*, LRB-PSCY3200_MH1_Tentative, Rev. 0, LG CHEM, led. 2014. URL: <https://www.tme.eu/Document/21ae98ff53f5d39fe5ebfe42dfc0a574/INR18650MH1.pdf>.
- [21] *I2C Fast Mode*. URL: <https://www.i2c-bus.org/fastmode/> (cit. 17. 03. 2023).
- [22] J. Šedivec, „Systém na ovládání miniaturních robotů,“ Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [23] *G-code*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code> (cit. 10. 04. 2023).
- [24] M. Vítek, „Zařízení pro mapování stacionárního magnetického pole v rovině,“ Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [25] *Neodymový magnet válec pr.1x1 N 80 °C*. URL: <https://e-shop.magsy.cz/neodymovy-magnet-valec-pr-1x1-n/> (cit. 02. 04. 2023).
- [26] *Update figures and process callbacks*. URL: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/drawnow.html> (cit. 19. 05. 2023).
- [27] *MHLS Matesy Hall Line Sensor*. URL: <https://matesy.de/en/products/magnet-measurement-calibration/mhls-matesy-hall-line-sensor-array> (cit. 11. 05. 2023).

Přílohy

Mechanický kryt



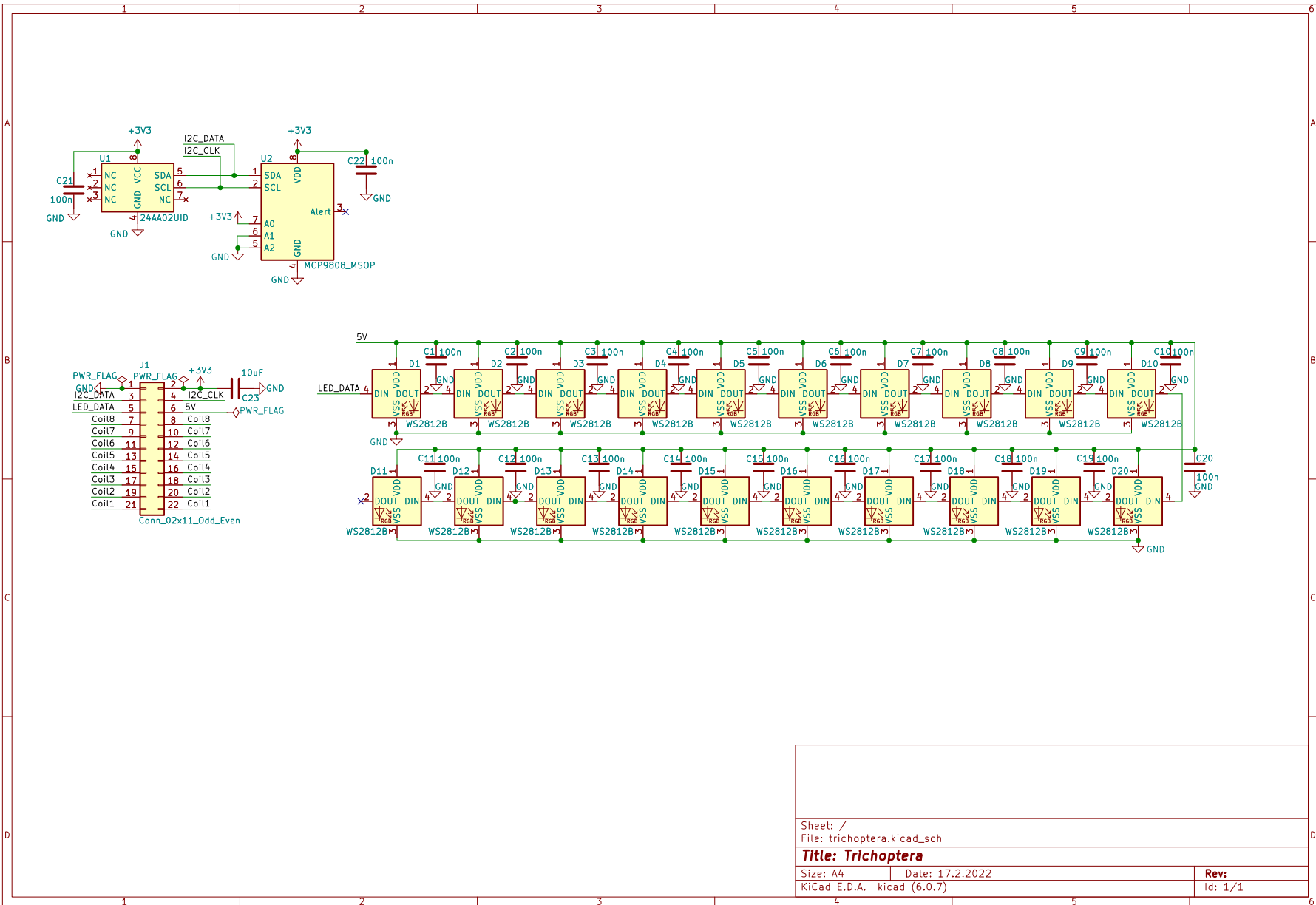
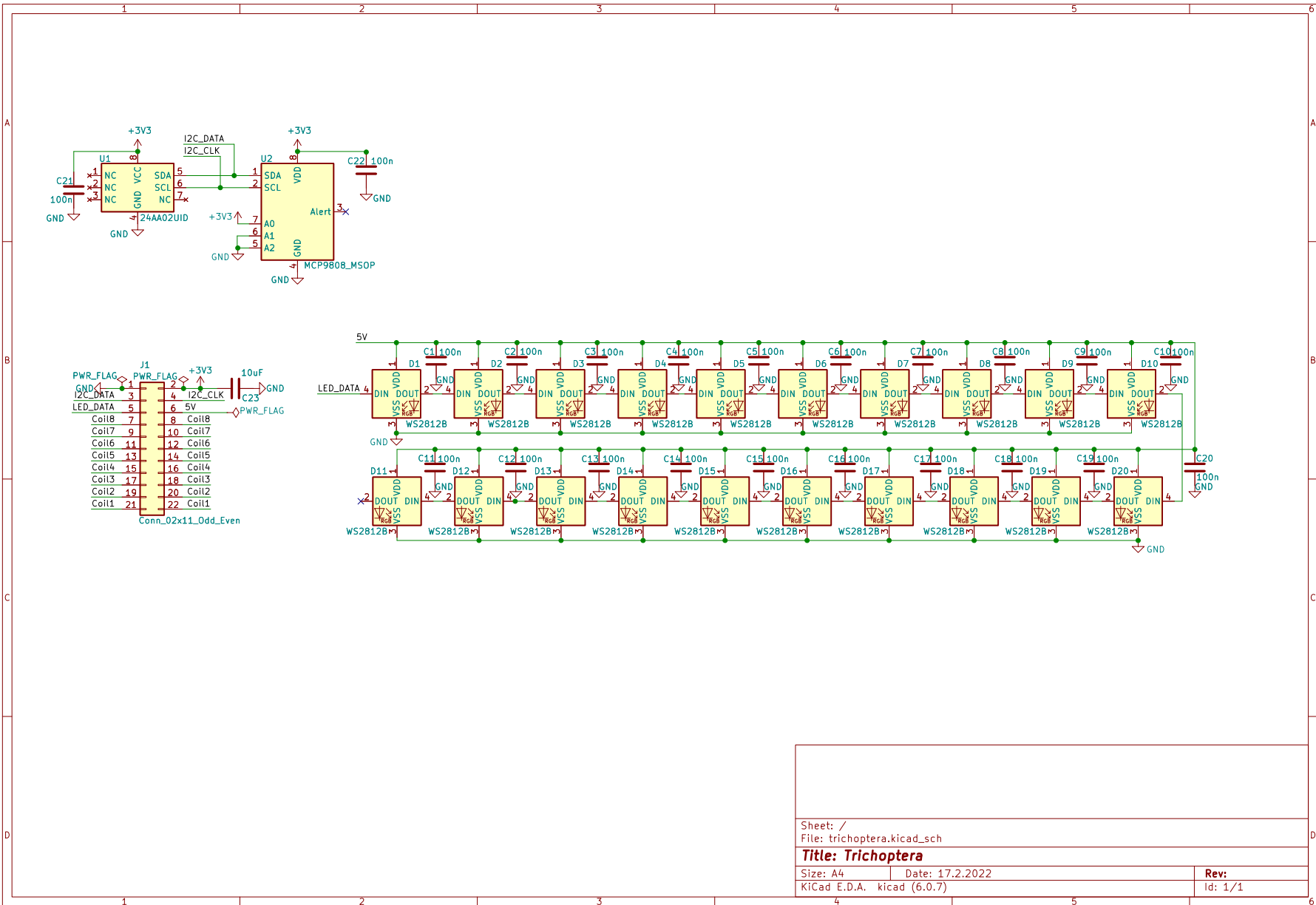
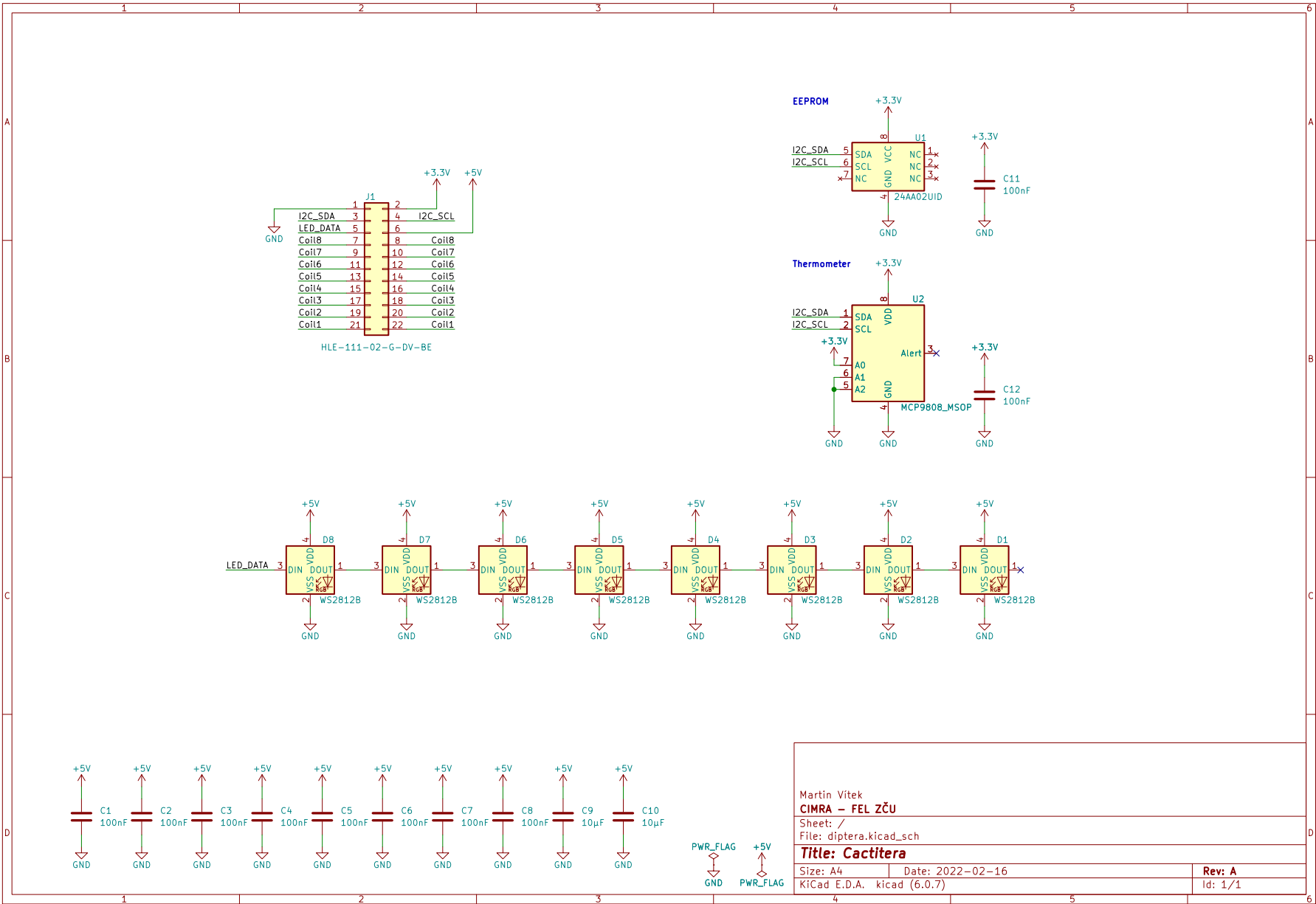


Schéma aktuační části Trichoptera



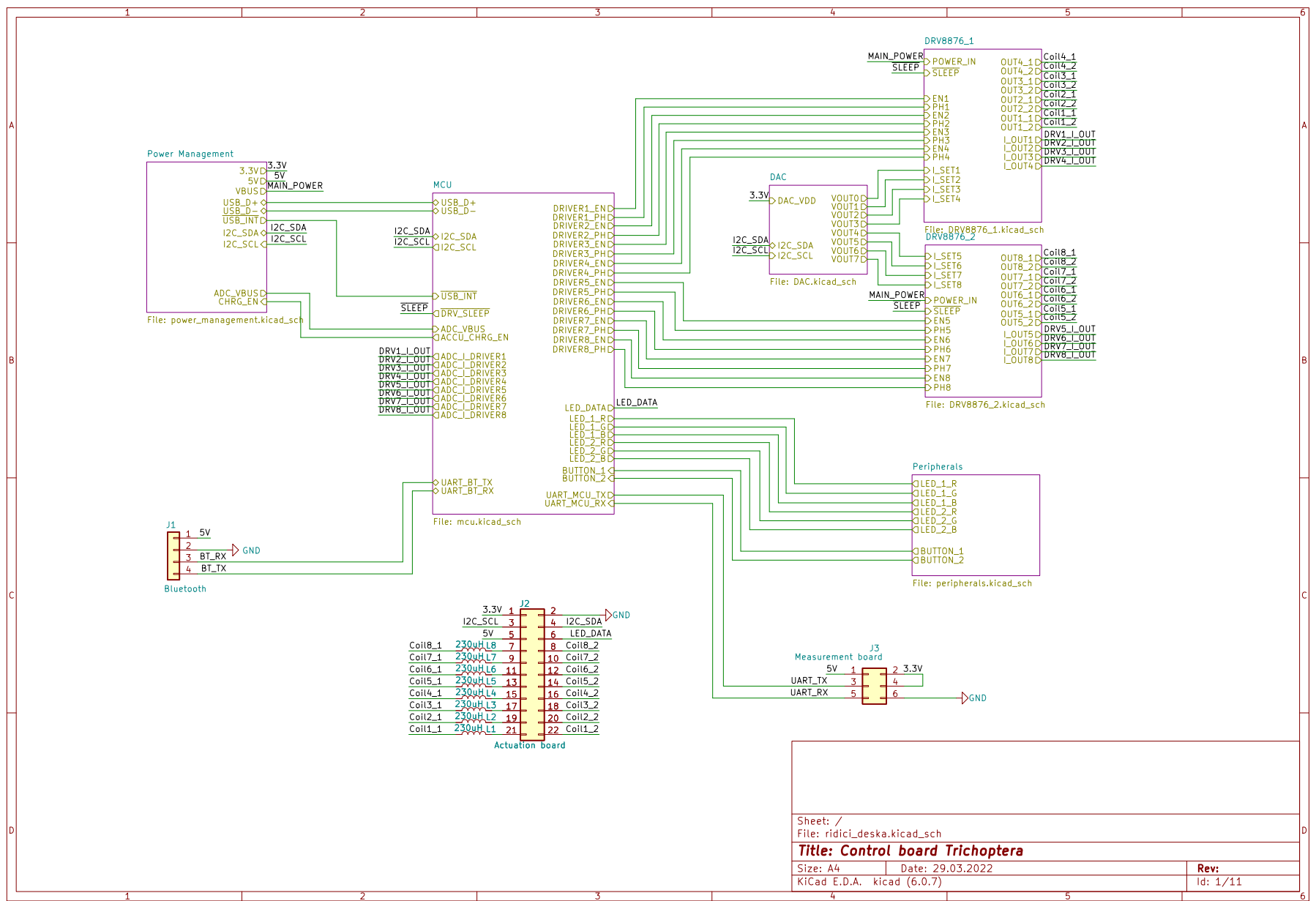
D

Schéma aktuační části Diptera



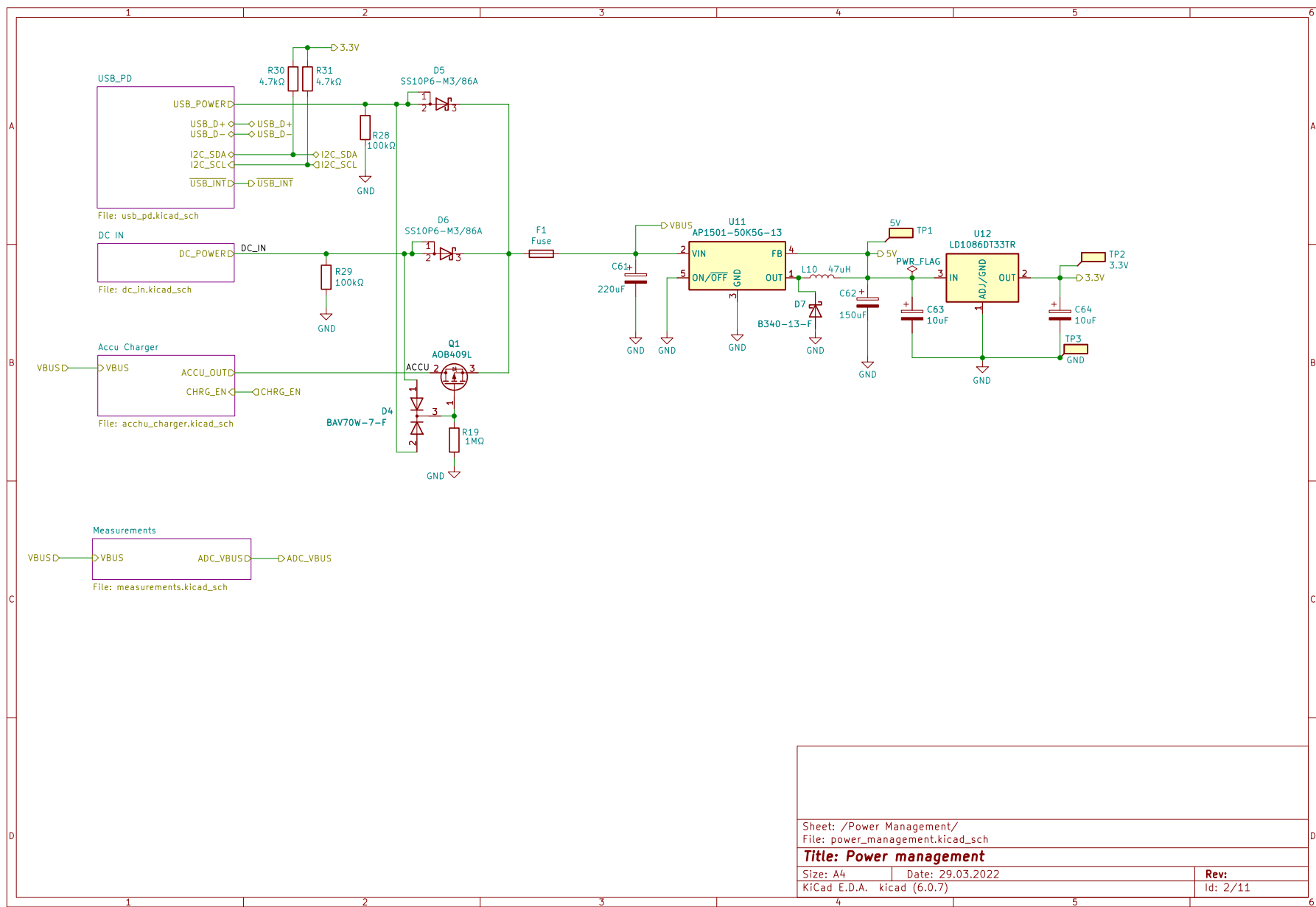
Martin Vitek		
CIMRA – FEL ZČU		
Sheet: /		
File: diptera.kicad_sch		
Title: Cactitera		
Size: A4	Date: 2022-02-16	Rev: A
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		Id: 1/1

Schéma Řídící části zařízení

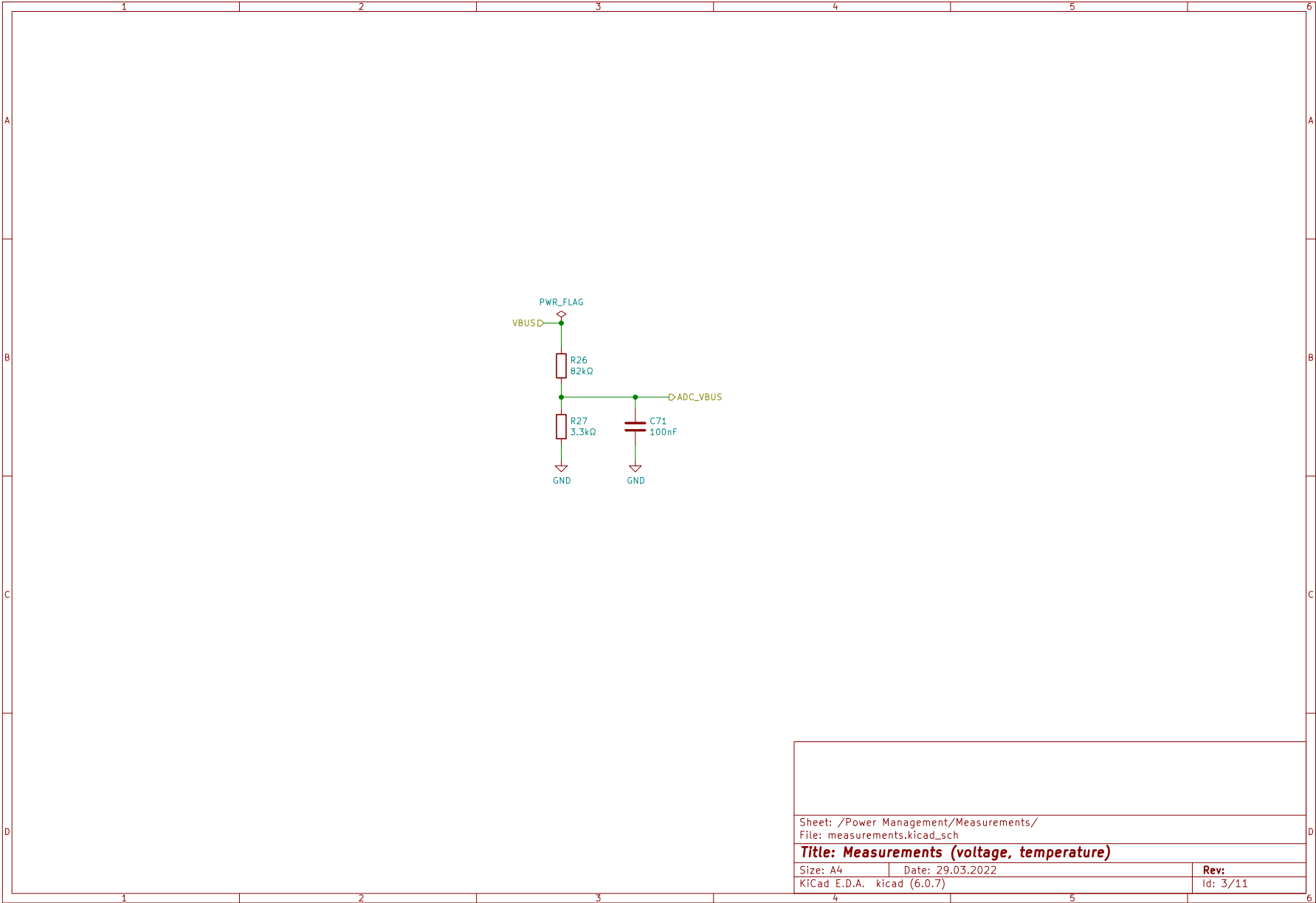


Sheet: /		File: ridici_deska.kicad_sch	
Title: Control board Trichoptera			
Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:	
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)			Id: 1/11

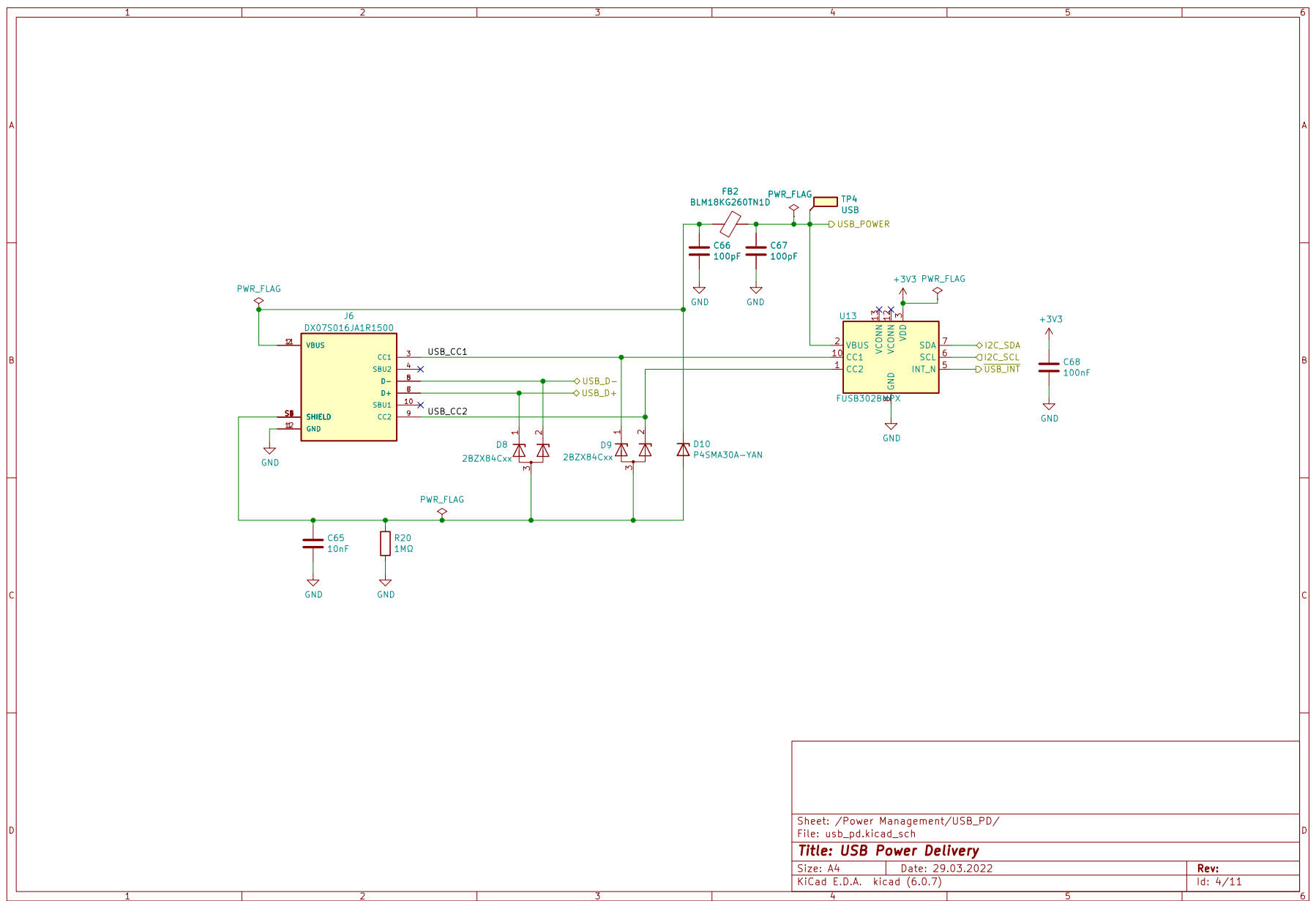
H



Sheet: /Power Management/ File: power_management.kicad_sch		
Title: Power management		
Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		Id: 2/11



Sheet: /Power Management/Measurements/ File: measurements.kicad_sch		
Title: Measurements (voltage, temperature)		
Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		Id: 3/11



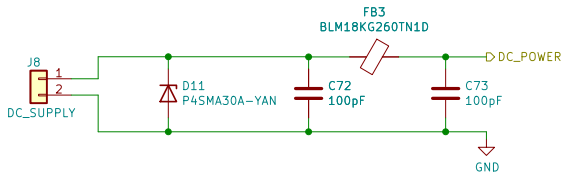
Sheet: /Power Management/USB_PD/
File: usb_pd.kicad_sch

Title: USB Power Delivery

Size: A4 Date: 29.03.2022
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

Rev:
Id: 4/11

K

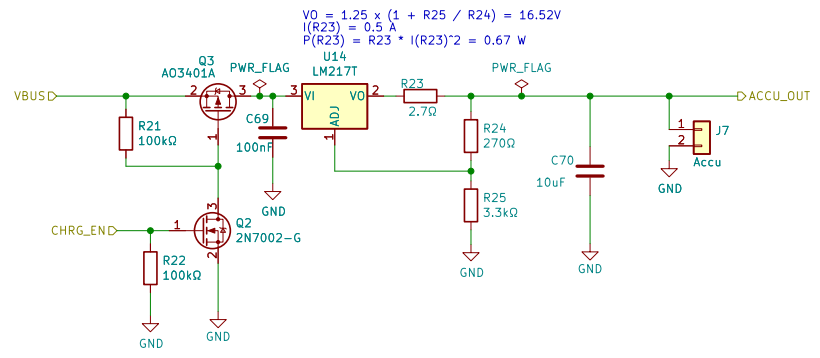


Sheet: /Power Management/DC IN/
File: dc_in.kicad_sch

Title: DC power supply

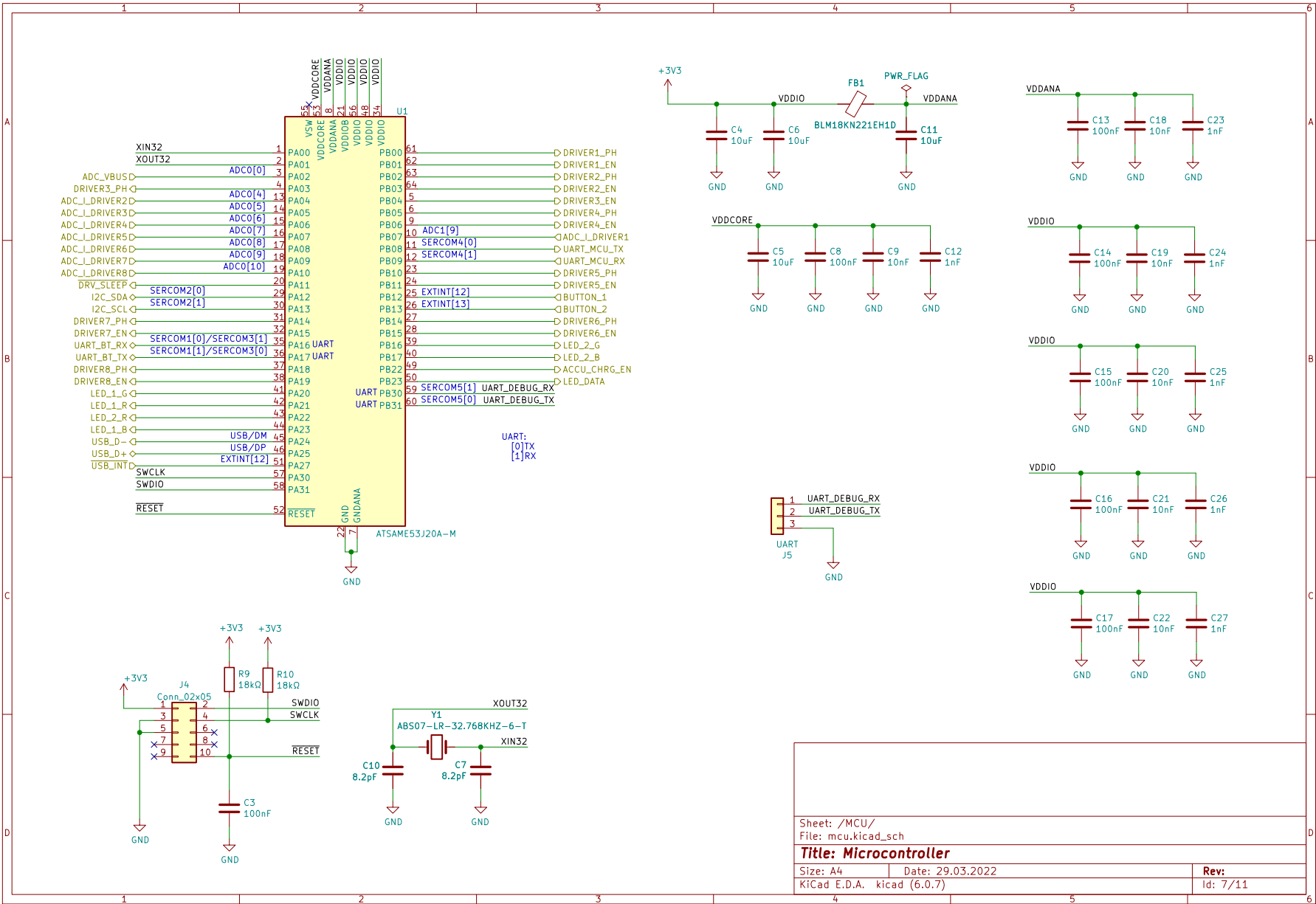
Size: A4 Date: 29.03.2022
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

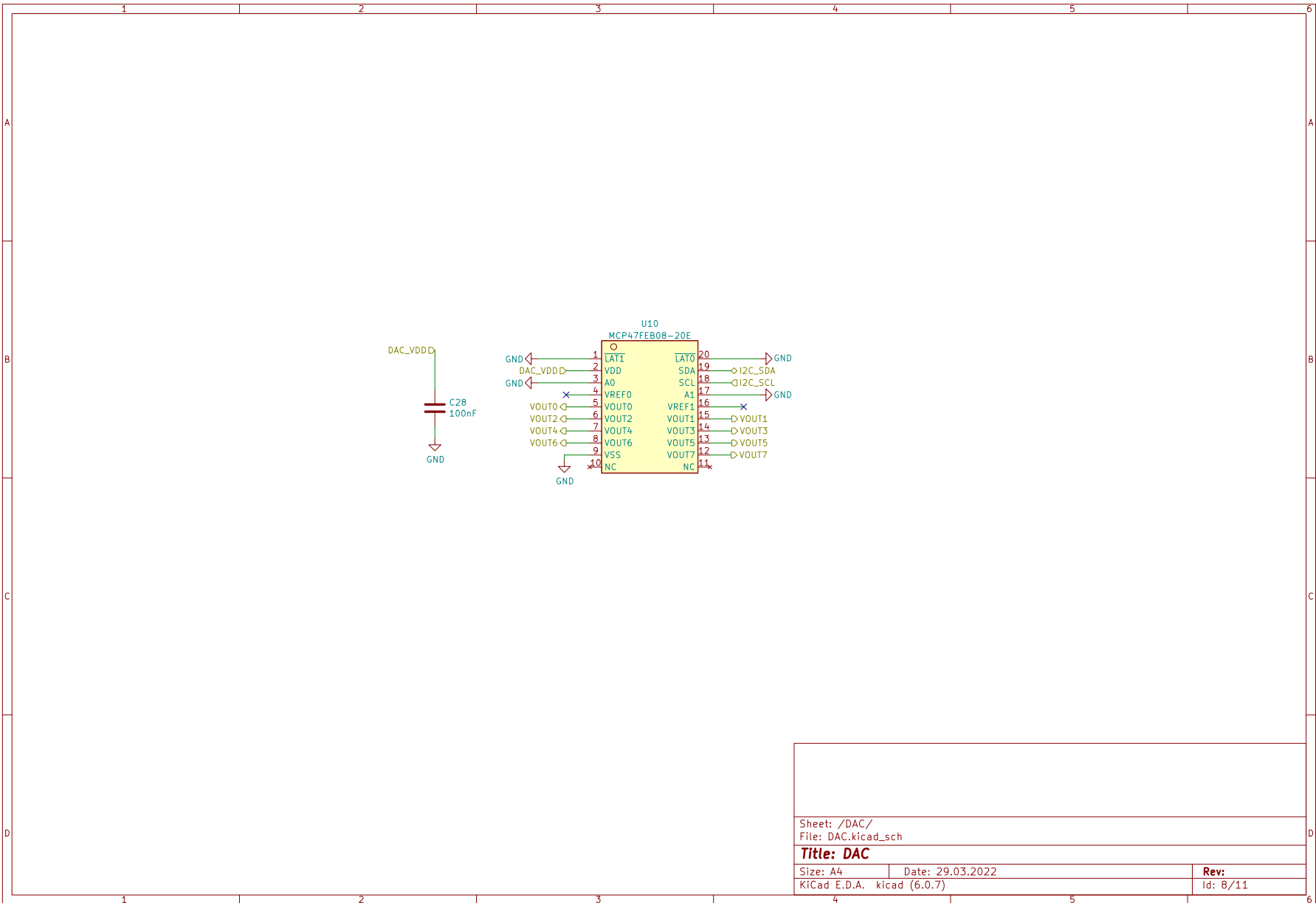
Rev:
Id: 5/11



Sheet: /Power Management/Accu Charger/		Date: 29.03.2022	
File: acchu_charger.kicad_sch		Rev:	
Title: Accumulator charger		Id: 6/11	
Size: A4	KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		

M



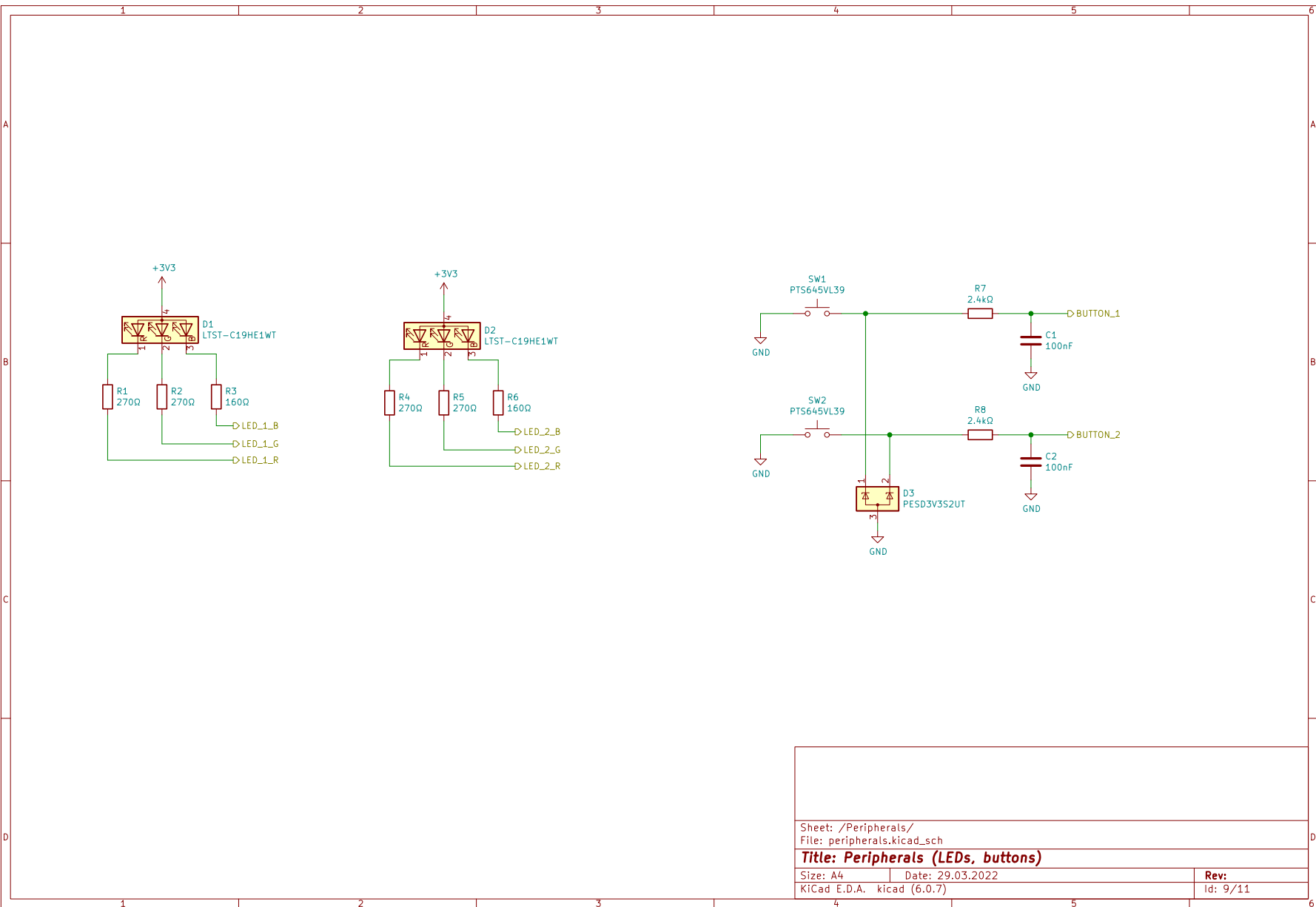


Sheet: /DAC/
File: DAC.kicad_sch

Title: DAC

Size: A4 Date: 29.03.2022
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)

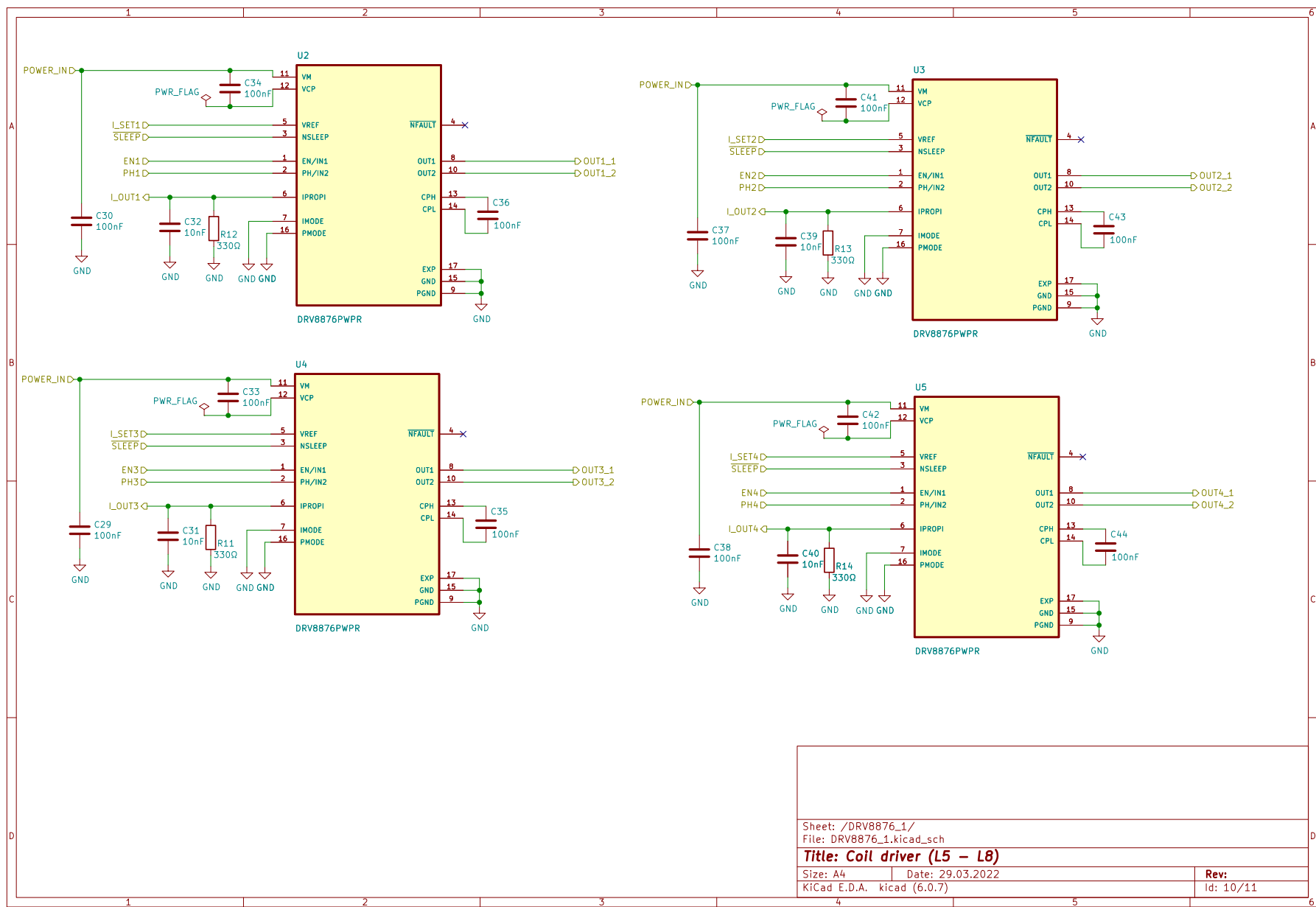
Rev:
Id: 8/11



Sheet: /Peripherals/
File: peripherals.kicad_sch

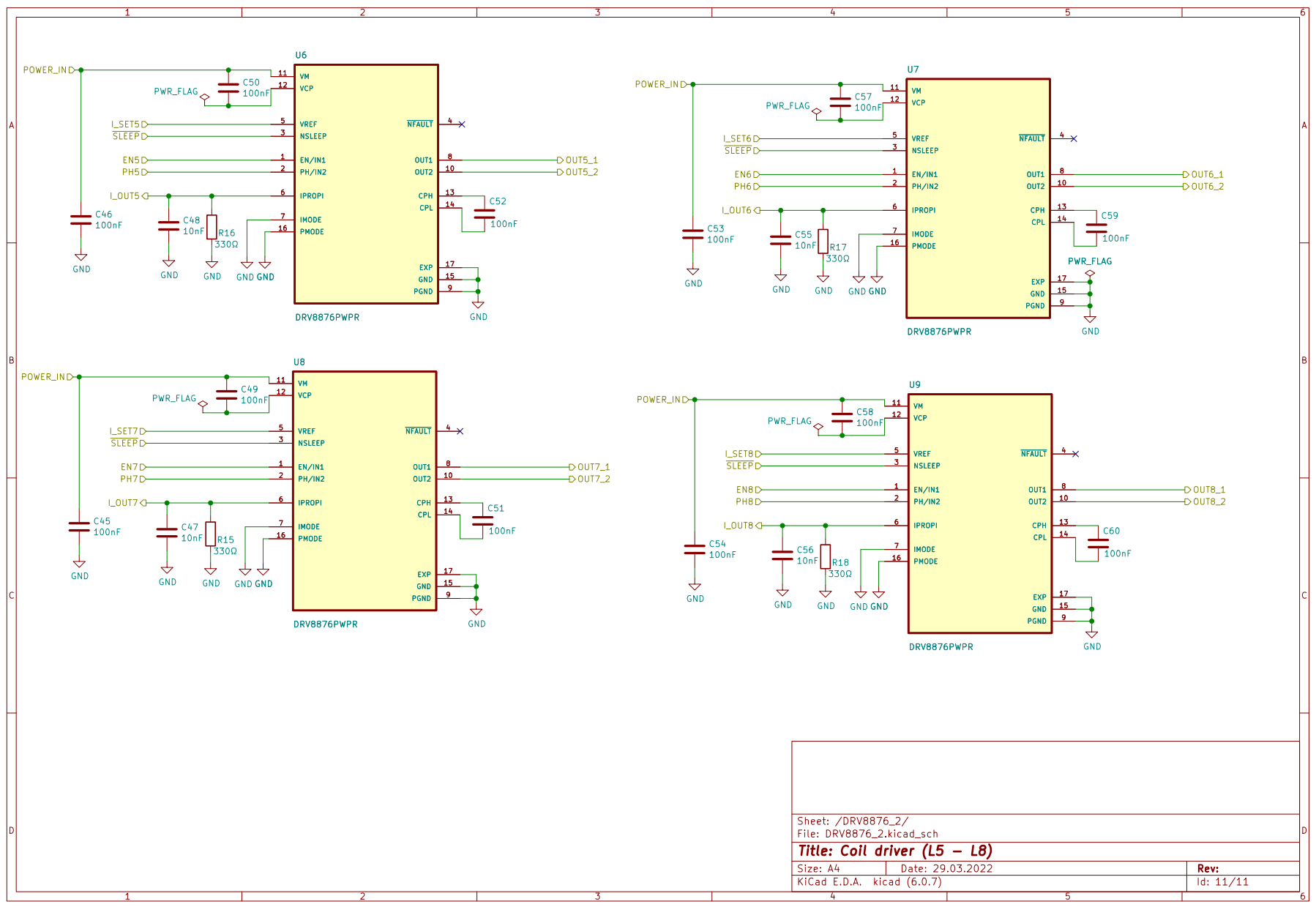
Title: Peripherals (LEDs, buttons)

Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		Id: 9/11



Sheet: /DRV8876_1/			
File: DRV8876_1.kicad_sch			
Title: Coil driver (L5 - L8)			
Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:	
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)			Id: 10/11

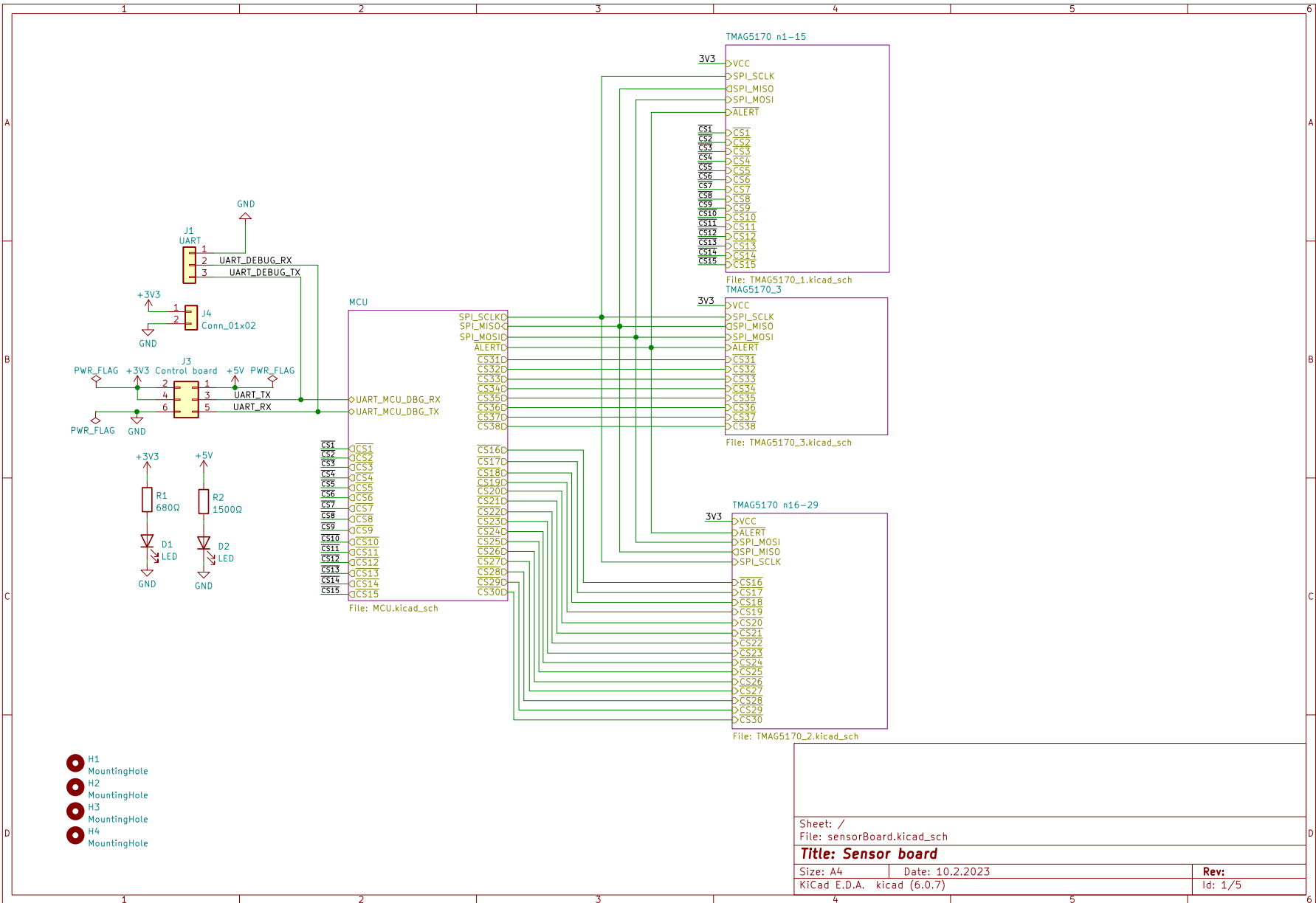
Q

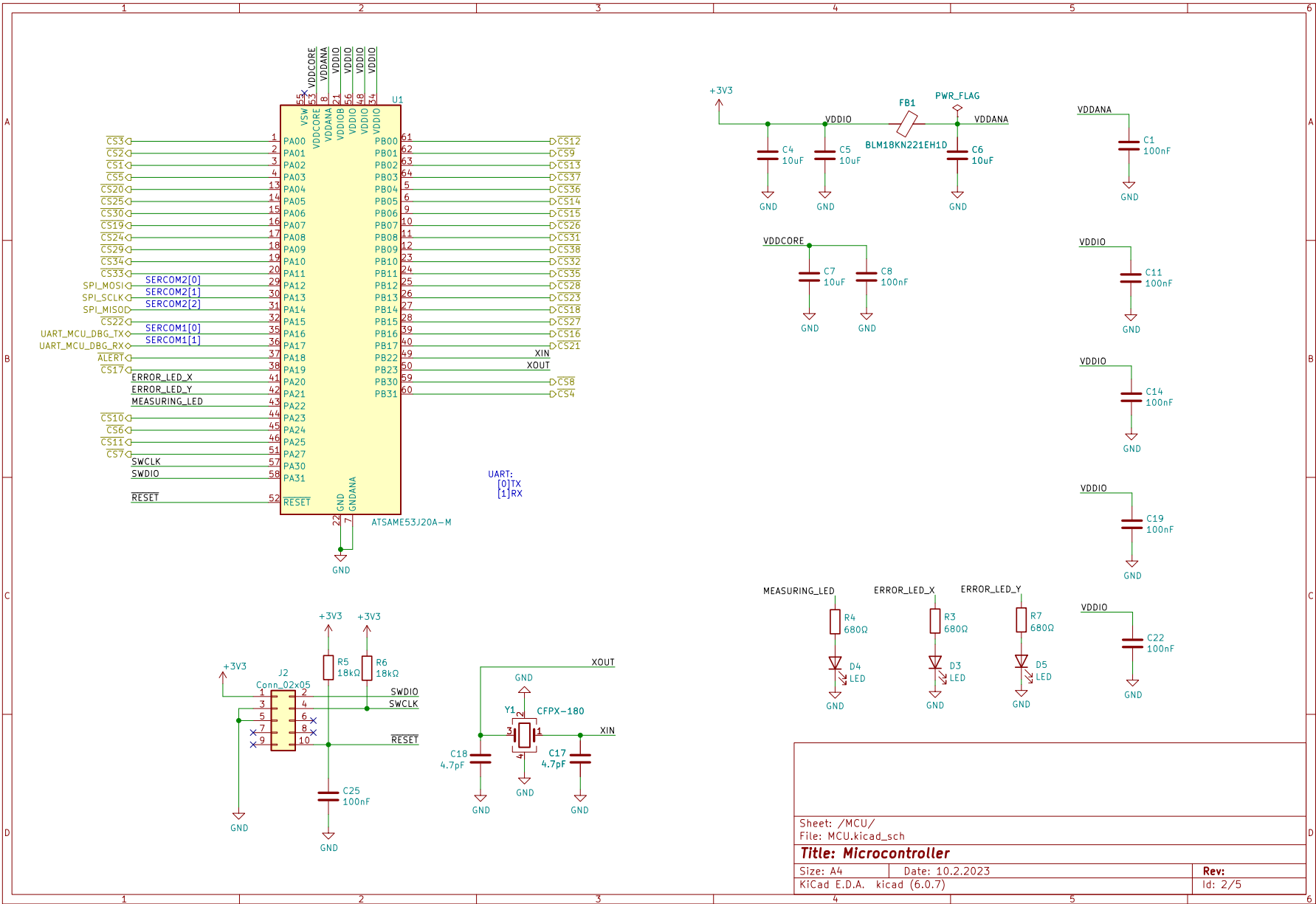


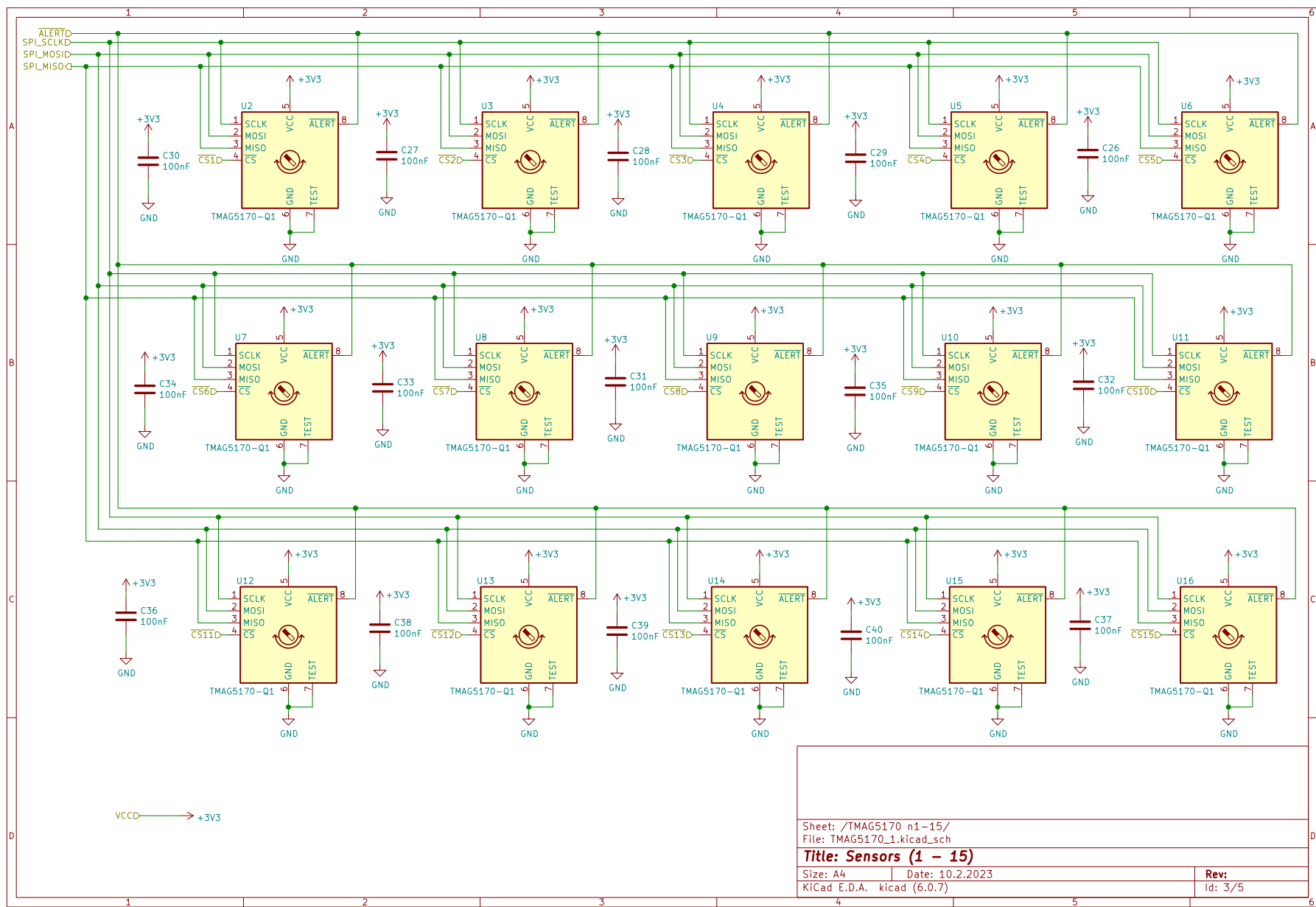
Sheet: /DRV8876_2/		File: DRV8876_2.kicad_sch	
Title: Coil driver (L5 - L8)			
Size: A4	Date: 29.03.2022	Rev:	
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)		Id: 11/11	

R

Schéma senzorické části







A

A

B

C

D

1

2

3

4

5

6

1

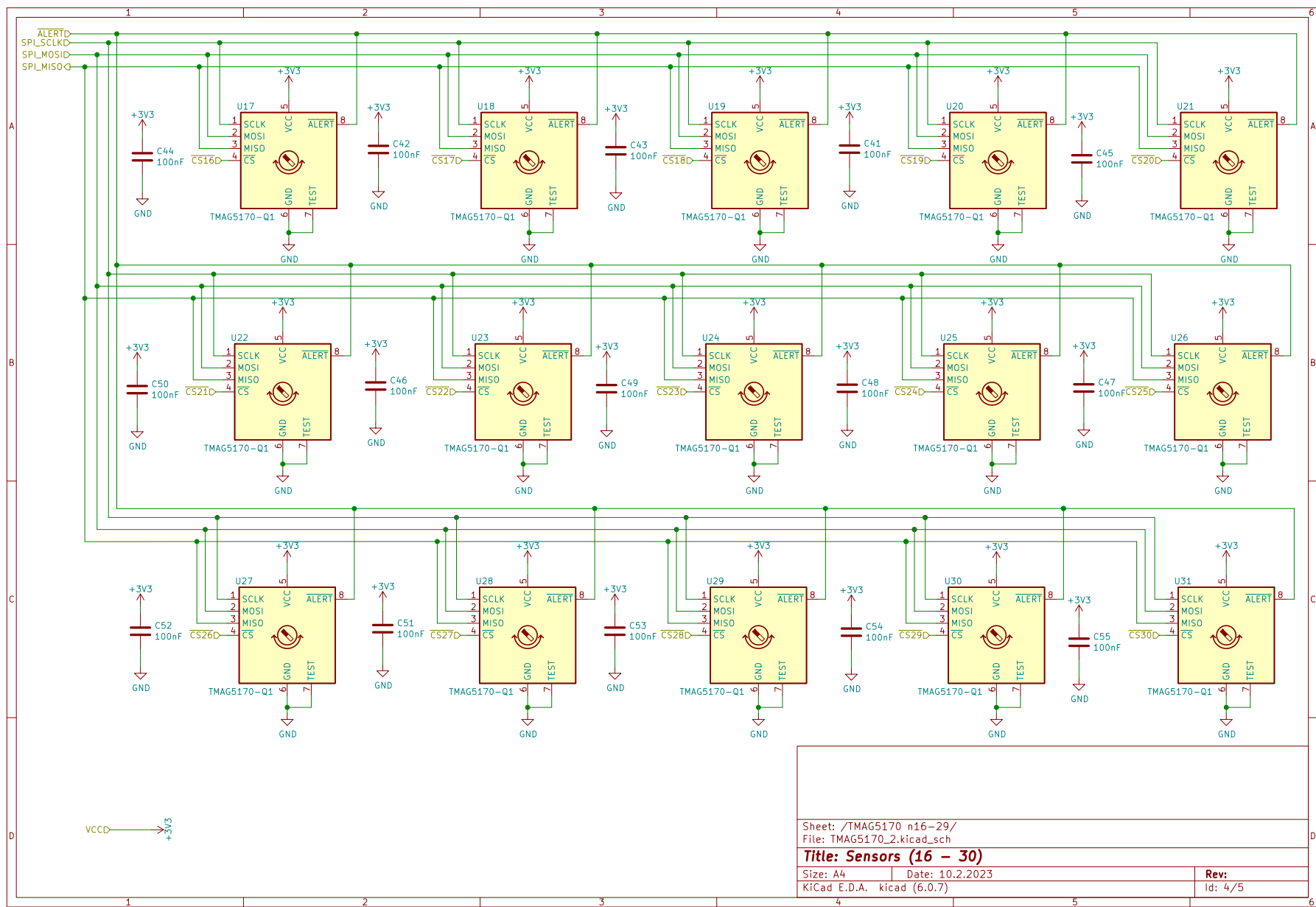
2

3

4

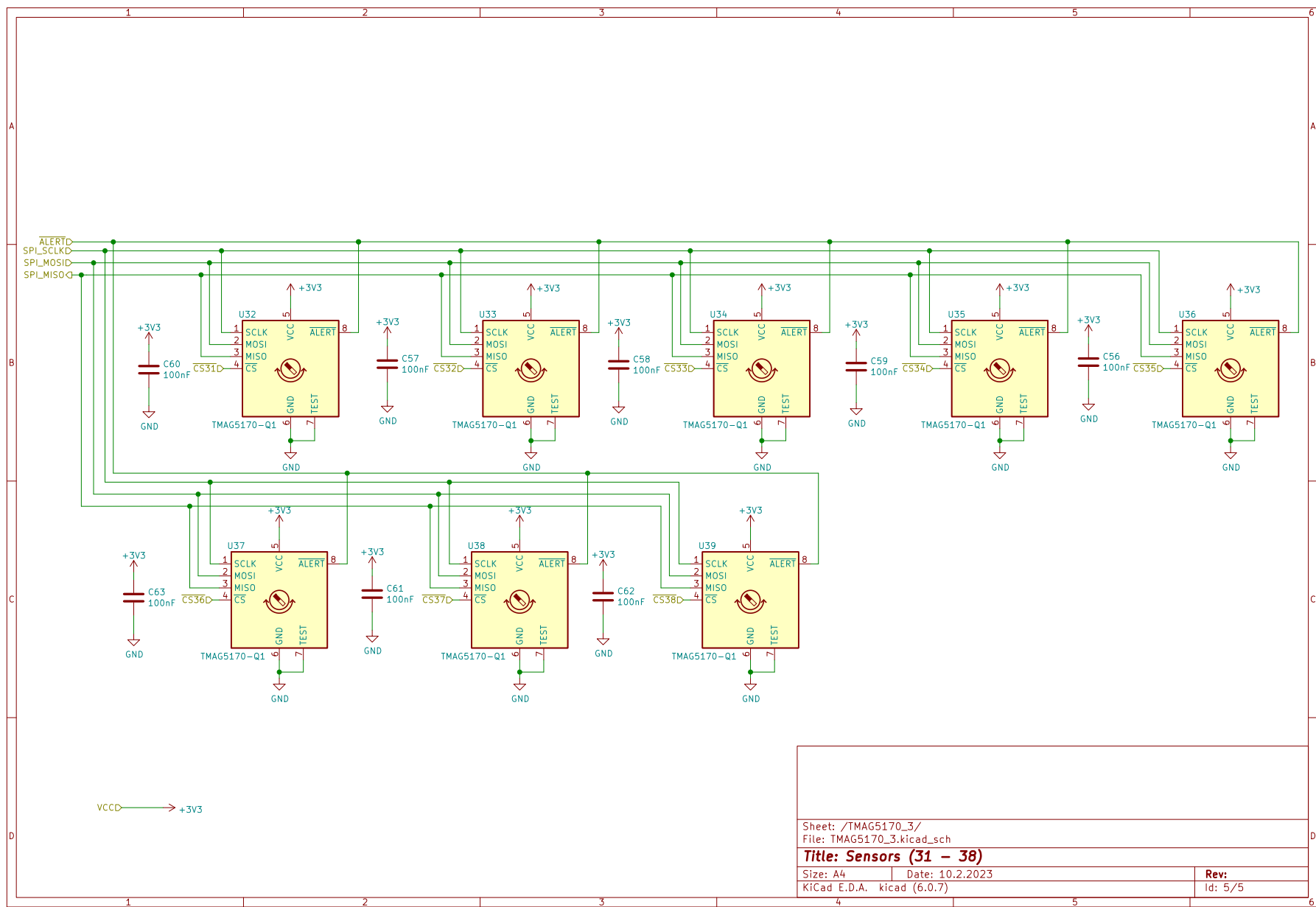
5

6



W

Sheet: /TMAG5170 n16-29/ File: TMAG5170_2.kicad_sch	
Title: Sensors (16 - 30)	
Size: A4	Date: 10.2.2023
KiCad E.D.A. kicad (6.0.7)	Rev: 4/5 Id: 4/5



X