

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lineární elektromagnetický aktuátor s řídicím systémem

Autor práce: **Bc. Jakub Tureček**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Kuthan**
Konzultant práce: **Ing. Martin Vítek**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

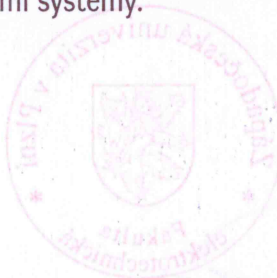
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub TUREČEK**
Osobní číslo: **E20N0046P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Výkonové elektronické technologie a pohony**
Téma práce: **Lineární elektromagnetický aktuátor s řídicím systémem**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte a popište problematiku lineárního polohování pomocí magnetického pole.
2. Formulujte matematický model magnetického pole popisující systém planárních cívek v interakci s permanentním magnetem.
3. Pomocí matematického modelu proveďte analýzu a návrh prototypu aktuátoru.
4. Sestrojte navržený aktuátor společně s řídicím elektronickým systémem.
5. Experimentálně ověřte funkčnost zkonstruovaného prototypu. Proveďte zhodnocení dosažených vlastností a porovnejte s komerčními systémy.



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

Seznam doporučené literatury:

1. HUSÁK, M., Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, 2008.
2. MAYER, D., Aplikovaný elektromagnetismus. 2012.
3. KUTHAN, J., JUŘÍK, M., Collective Planar Actuation of Miniature Magnetic Robots Towards Individual Robot Operation. doi: 10.1109/MARSS49294.2020.9307877.
4. KUTHAN, J., JUŘÍK, M. Key aspects of magnetically guided actuation on planar surfaces. In Elektrotechnika a informatika 2018. ISBN: 978-80-261-0785-9.
5. PELRINE, Ronald E.; WONG-FOY, Annjoe. Levitated-micro manipulator system. U.S. Patent Application No 10/044,253, 2018.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kuthan**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



L.S.


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


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předložená práce se zabývá návrhem elektromagnetického lineárního aktuátoru s řídicím systémem. Na základě rešerše byla vybrána uspořádání aktuátoru, která byla zkoumána pomocí matematických modelů v programu *COMSOL Multiphysics 5.6*. Matematické modely se zabývaly výpočtem velikosti sil působících na jezdec pro různé polohy na polohovací dráze, možností použití diamagnetického materiálu pro snížení tření mezi jezdcem a pracovní deskou a dále možností magnetického vedení jezdce. Výsledky matematických modelů vedly k návrhu dvou lineárních aktuátorů a několika topologií jejich jezdců. Vyrobeny tedy byly dva typy aktuátoru včetně jezdců a jejich základní funkčnost byla experimentálně ověřena. Dále bylo navrženo schéma řídicí elektroniky, na základě kterého byla vytvořena deska plošných spojů. Po osazení a oživení elektroniky byla experimentálně ověřena její funkčnost společně s aktuátory. Pro elektroniku dále byly doprogramovány nové funkce v rámci společného řídicího kódu pro polohovací zařízení výzkumného týmu *CIMRA*. Z experimentů vyplynulo, že zvolené uspořádání aktuátorů a jezdců nedosahuje požadovaných parametrů polohování, zejména z důvodu neudržení přímého směru jezdce na pracovní desce. V závěru práce jsou tedy nastíněny možné příčiny těchto chyb a navrhnutá jejich řešení.

Klíčová slova

Lineární polohování, matematický model, aktuátor, řídicí elektronika, minirobotika, magnetická aktuace, magnetické vedení, COMSOL Multiphysics, KiCad, koplanární cívky.

Abstract

Submitted thesis deals with the design of electromagnetic linear actuator with control system. The topology of the actuator was based on research and studied by mathematical models in *COM-SOL Multiphysics 5.6*. The mathematical models were concerned with the calculation of the forces affecting the rider in different positions on the positioning track, the possibility of usage of diamagnetic material in order to reduce friction between the rider and the positioning desk and the possibility of magnetic guidance of the rider. The results of the mathematical models led to design of two linear actuators and several topologies of the riders. Two types of actuators were constructed with their riders and basic functionality was experimentally verified. Then, the scheme of the control electronics was designed and, based on the scheme, the printed circuit board was created. After fitting and debugging, the functionality of the electronics was experimentally verified together with the actuators. New functions for the electronics were programmed under the common control code for the positioning devices of the research team *CIMRA*. The experiments showed that topology of the actuators and the riders do not achieve demanded positioning parameters, mainly because of the problems with the direct movement of the riders. In the conclusion, the possible causes of these faults are explained and their solution is proposed.

Keywords

Linear positioning, mathematical model, actuator, control electronics, minirobotics, magnetic actuation, magnetic guidance, COMSOL Multiphysics, KiCad, coplanar coils.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Kuthanovi a konzultantovi Ing. Martinovi Vítkovi za jejich přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Lineární polohování	2
1.1 Lineární polohovací systémy	2
1.2 Senzorická soustava	8
1.3 Polohování miniaturních robotů	11
1.3.1 Polohovací systémy ve světě	11
1.3.2 Polohovací systémy na FEL ZČU	13
1.4 Experimentální zařízení na FEL ZČU	17
1.4.1 Princip polohování	18
2 Simulace	20
2.1 Matematický model	20
2.2 Síla mezi vodiči a jedním magnetem	21
2.3 Síla mezi vodiči a jezdcem	22
2.4 Použití diamagnetického materiálu	24
2.5 Magnetické vedení	27
3 Lineární aktuátor	32
3.1 Návrh aktuátoru	32
3.2 Prototypy aktuátorů	33
3.3 Řídicí elektronika	37
3.4 Popis řídicího kódu	41
4 Experimenty	43
4.1 Mechanické vedení	43
4.2 Použití diamagnetického materiálu	45
4.3 Magnetické vedení	45
4.4 Limitní zatížení	46
4.5 Nastavování velikosti proudu a rychlosti	46
5 Závěr	48

Seznam použité literatury	52
Přílohy	A

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
A	magnetický vektorový potenciál	Wb/m
B	vektor magnetické indukce	T
$ B $	velikost vektoru magnetické indukce	T
B_r	remanentní magnetické indukce	T
B_z	magnetická indukce ve směru osy z	T
d	průměr	m
$F_{L,m}$	vektor magnetické části Lorentzovy síly	N
F_z	síla působící ve směru osy z	N
g	tíhové zrychlení	m/s ²
h	výška	m
I	elektrický proud	A
J	vektor proudové hustoty	A/m ²
J_{ext}	vnější proudová hustota	A/m ²
J_x	proudová hustota ve směru osy x	A/m ²
L	indukčnost	H
m	hmotnost	g
P	elektrický výkon	W
R	elektrický odpor	Ω
t	čas	s
t_s	doba sepnutí cívky	s
U	elektrické napětí	V
v	rychlost	m/s
V	objem	m ³
γ	elektrická vodivost	S/m
μ	permeabilita	H/m
A/D	Analog-to-Digital - převod analogového signálu na digitální	–
BUCK	snižovací pulzní měnič napětí	–
CIMRA	název výzkumného týmu vedeného Ing. Františkem Machem, PhD.	–
DPS	deska plošných spojů	–
D/A	Digital-to-Analog - převod digitálního signálu na analogový	–
DM3	DiaMagnetic Micro Manipulator	–
DIR	Direction - směrový signál	–
EN	Enable - spouštěcí signál	–

Značka	Popis	Jednotka
FPU	Floating-Point Unit - jednotka pro práci s pohyblivou řádovou čárkou	—
I ² C	Inter-Integrated Circuit - sériová komunikační sběrnice	—
LA	lineární aktuátor	—
LAE	řídicí elektronika pro LA	—
LED	Light-Emitting Diode - světelná dioda	—
MCU	Microcontroller Unit - mikrokontrolér	—
Nd ₂ Fe ₁₄ B	složení permanentního magnetu (neodym, železo, bor)	—
PWM	Pulse Width Modulation - pulzně šířková modulace	—
SPI	Serial Peripheral Interface - sériová komunikační sběrnice	—
SMD	Surface Mount Device - součástka pro povrchovou montáž	—
SWD	Serial Wire Debug - programovací rozhraní ARM mikrokontrolérů	—
THT	Through Hole Technology	—
<i>TIP</i>	The Insect Play - označení polohovacích zařízení výzkumného týmu <i>CIMRA</i>	—
<i>TIPF</i>	The Insect Play Firmware - řídicí kód <i>TIP</i>	—
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní přijímač-vysílač	—
USB	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice	—

Seznam obrázků

1	Lineární přímý a nepřímý pohon [5].	2
2	Synchronní lineární motor [3].	3
3	Kuličkový šroub a matice [5].	4
4	Pastorek a ozubený hřeben [5].	4
5	Řemenice a) a řemen b) [10] [11].	5
6	Elektrický lineární aktuátor [12].	6
7	Stejnoseměrný motor [12].	6
8	Kuličkové lineární vedení [13].	7
9	Části kuličkového lineárního vedení: 1 - ocelové tělo, 2 - kolejnice, 3 - , 4 - vnější těsnění, 5 - vnitřní těsnění, 6 - postranní těsnění, 7 - kanál kuliček, 8 - středová lišta, 9 - zpětný kanál, 10 - kuličky, 11 - kuličkový řetěz (nepovinný) [17].	7
10	Miniaturní kuličkové lineární vedení [16].	7
11	Princip Hallovy sondy [21].	9
12	Magnetická páska. Hodnoty v levé horní části jsou výšky jednotlivých vrstev [18].	9
13	Schéma čidla s lineárním magnetickým enkodérem (H1-H4: Hallovy sondy) [18]. .	9
14	Lineární magnetický enkodér: výstupní signály [18].	10
15	Magnetické senzory: a) enkodér, b) magnetická páska, c) integrované uložení [20].	10
16	Optický senzor [22].	11
17	Rozměry <i>DM3</i> systémů [26].	12
18	Spolupráce více robotů [6].	13
19	Zatáčka tvořená planárními závity [27].	14
20	Popisovaný systém (pohled v řezu) [23].	14
21	Různé roboty s vyznačenými orientacemi permanentních magnetů. Modrá znamená jižní magnetický pól, červená odpovídá severnímu magnetickému pólu [23].	15
22	Maximální zatížení robota v závislosti na době kroku t_s ($t_s = 20$ ms odpovídá rychlosti robota 25 mm/s, $t_s = 60$ ms odpovídá rychlosti robota 8,3 mm/s) [23]. .	16
23	Rozložení cívek prototypu <i>Gryllus</i> ² . Na obrázku jsou zakótovány rozdílné rozteče cívek d_{L1} a d_{L3} [28].	17
24	Princip pohybu. Nahoře zobrazeny dvě koplánární cívky (žlutá a fialová). Na nich je uložen permanentní magnet s vyznačeným směrem magnetické indukce. V částech a) až h) je naznačeno spínání proudů do cívek pro pohyb o 3 kroky ve směru osy y . Modře je značen proud tekoucí ve směru osy x , červeně proud tekoucí opačným směrem.	19
25	Geometrie modelu: celkový pohled.	21

26	Geometrie modelu: magnet a vodiče.	22
27	Geometrie modelu: magnety a cívky.	23
28	Průběh sil působících na jezdec v závislosti na posunu jezdce v ose y	24
29	Průběh sil působících na polovinu jezdce v závislosti posunu jezdce v ose y	24
30	Závislost síly působící na jeden válcový magnet v ose z při různé hodnotě relativní permeability uhlíkové vrstvy.	25
31	Geometrie 2D modelu při použití diamagnetického materiálu.	25
32	Závislost magnetické síly působící na magnet při změně mezery mezi magnetem a diamagnetickou vrstvou pro různé hodnoty relativní permeability diamagnetické vrstvy.	26
33	Závislost magnetické síly působící na magnet v ose z při změně výšky diamagnetické vrstvy h pro různé hodnoty relativní permeability diamagnetické vrstvy.	27
34	Geometrie matematických modelů a) s válcovými magnety na DPS, b) s kvádrovými magnety na DPS. Červené magnety mají orientaci magnetické indukce v ose z , modré magnety opačnou.	27
35	Síly působící na jezdec při vychýlení pro kvádrový magnet na DPS. Pomocí křížků jsou naznačeny středy magnetů na aktuátoru, bod $[0,0]$ zobrazuje stabilní polohu. Následně byl středový magnet vychylován v ose x a z (viz příslušné body), síla v bodech je zobrazena pomocí šipek, velikost síly odpovídá délce šipky.	28
36	Zjednodušené geometrie jednotlivých modelů.	29
37	Zjednodušené magnetické vedení vlaku Maglev [33].	30
38	Úhlový magnet.	30
39	Zjednodušené geometrie vybraných modelů.	31
40	Průběh síly F_z v závislosti na posunu v ose z pro vybraná uspořádání.	31
41	Geometrie lineárního aktuátoru typu I : a) pohled do TOP vrstvy DPS, b) pohled do BOT vrstvy DPS.	33
42	Jezdec lineárního aktuátoru typu I : a) uprostřed jsou otvory pro 11 permanentních magnetů, které slouží k tvorbě pohybu. Po stranách jsou velké díry pro spojení obou desek jezdce šrouby. Mezi těmito prvky jsou sloupce tří děr, ty slouží pro uložení magnetů pro magnetické vedení. V části b) je naznačena orientace válcových magnetů - červeně je magnetická indukce ve směru osy z , modře magnety s opačným směrem magnetické indukce.	33
43	Prototypy a) typ I , b) typ H	34
44	Jezdec pro aktuátor typu I	35
45	Princip pohybu lineárního aktuátoru. Žlutě a fialově jsou obarveny cívky, kterými neteče proud, ty protékané proudem jsou červené či modré. V levé části obrázku jsou zobrazeny válcové magnety s naznačeným směrem magnetické indukce: tečka značí směr v ose z , křížky ve směru opačném. V pravé části obrázku je naznačen posun jezdce o jeden krok ve směru osy y . Modrou barvou jsou označeny proudy tekoucí v kladném směru osy x , ve vodičích označených červeně tečou proudy opačně.	36
46	Blokové schéma řídicí elektroniky.	37
47	Řídicí elektronika.	38
48	Zjednodušené blokové schéma driveru [36].	39

49	Driver DRV8876 od Texas Instruments [36].	40
50	Zjednodušený UML diagram.	42
51	Pohyb jezdce na aktuátoru typu H	43
52	Pohyb jezdce na aktuátoru typu I . Červeně naznačen pohyb ve směru osy y , fialově pohyb směrem opačným.	44
53	Vychýlení jezdce při spínání cívek pro pohyb v kladném směru osy y . Na obrázcích je zachyceno vychýlení jezdce během časového intervalu 1 s.	44
54	Magnetické vedení na aktuátoru typu I : a) na jezdcí, b) na lineárním aktuátoru.	45
55	Průběh proudů jednou cívkou pro různé hodnoty požadavků.	46
56	Průběh proudů pro různé hodnoty požadavků - pohled na jeden peak.	47
57	Průběh proudů pro různé hodnoty požadavků rychlosti - pohled na jeden peak.	47

Seznam tabulek

2	Vybrané výhody a nevýhody nejběžnějších konfigurací magnetických polohovacích systémů [25].	12
3	Rozměry modelu.	22
4	Rozměry prototypu lineárního aktuátoru v modelu.	23
5	Rozměry modelu s diamagnetickým materiálem.	26
6	Rozměry aktuátoru typu I - viz dále.	32
7	Činný odpor a indukčnost cívek - aktuátor typu I	33
8	Činný odpor a indukčnost cívek - aktuátor typu H	34
9	Hmotnosti vybraných částí jezdce pro aktuátor typu I - viz Obr. 42.	35
10	Spínací sekvence.	35
11	Přehled vybraných integrovaných obvodů.	38
12	Soupis vybraných G-kódů a M-kódů.	41

Úvod

Mikroaktuátor označuje mikroakční člen, který převádí vstupní energii na akční zásah do řízené soustavy. Jedná se tedy o zařízení, které vykonává opačnou funkci k mikrosenzorům. Dnes je možné zhotovit mikroakční členy jako mikromotory, mikromanipulátory, mikropinzety, mikroventily, mikropřepínače, mikropumpy apod. Mikroaktuátory pracují na různých fyzikálních či chemických principech. Dále bude práce zaměřena na aktuátory magnetické [1].

Magnetické mikroaktuátory se svými fyzikálními principy činnosti řadí k nejstarším typům aktuátorů. V makroskopickém světě jsou jimi například elektromotory, relé, magnetické ventily a další. Magnetické pohybové metody jsou schopny generovat přitažlivé i odpuzivé síly. Pro implementace magnetických aktuátorů v mikroměřítku je nutné řešit zejména problém realizace vinutí, neboť je složité v planárním provedení vyrobit vinutí s velkou hodnotou indukčnosti. Elektrodynamické magnetické mikroaktuátory mají svůj princip činnosti založený na působení Lorentzovy síly. Navrhovaný aktuátor bude využívat právě tohoto principu [1].

Při návrhu lineárního aktuátoru jsem vycházel ze znalostí polohovacích zařízení výzkumného týmu *CIMRA*, dále ze své bakalářské práce, ve které jsem se věnoval návrhu platformy pro paralelní polohování magnetických těles [2]. Tato zařízení se skládají z pracovní desky tvořené koplanárními cívkami a robota (jezdce) tvořeného permanentními magnety. Vhodným spínáním proudů do cívek dochází k odpuzování jezdce, a tím k jeho pohybu. Doposud vyvíjené prototypy umožňovaly pohyb ve dvou stupních volnosti. Navrhovaný aktuátor by tedy měl využívat předností navržených prototypů polohovacích zařízení: nízká hmotnost jezdce i pracovní desky, jednoduchá výroba či malý příkon.

Motivace

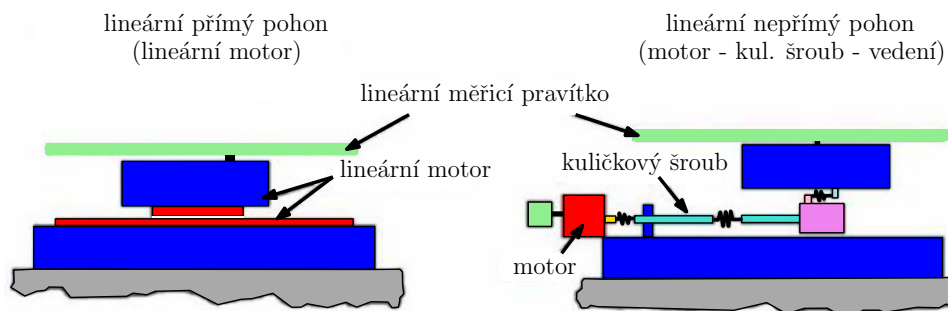
Při rešerši elektromagnetických aktuátorů jsem nenašel výrobek, který by byl svojí konstrukcí tak jedinečný: navržený aktuátor je velmi lehký, má velmi malý příkon, značnou přetížitelnost a jednoduchou konstrukci. Dále mě motivovala možnost návrhu řídicí elektroniky, díky níž je možné řídit jednoduchými zprávami z počítače polohu jezdce, které umožňují zadat směr a rychlost pohybu stejně jako velikost proudu tekoucího cívkami. V této práci jsem také využil své znalosti nabyté při tvorbě bakalářské práce, která se zabývala paralelním polohováním magnetických těles. V neposlední řadě jsem rád využil možnosti práce ve výzkumném týmu *CIMRA*, který se věnuje zejména miniaturním robotům. V rámci této skupiny jsem s tématem lineárního aktuátoru začínal jako s úplně novým odvětvím.

1 Lineární polohování

Úvod práce je zaměřen na obecnou problematiku elektrických lineárních pohonů. Tato zařízení slouží k lineárnímu polohování zátěže. Zmíněný pohyb je často realizován pomocí točivých strojů s převodovkou a systémem, který převádí točivý pohyb na pohyb přímočarý. Jinou možností je použití lineárního motoru. Lineární motor funguje na stejném principu jako točivé stroje - u lineárních motorů je kruhový stator rozvinut do plochy a rotor se vůči statoru pohybuje v rovině. K realizaci posuvného pohybu se nejčastěji používají lineární motory, krokové motory nebo servopohony [3] [4] [5]. Pro polohování těles malých rozměrů je možné použít systémy využívající miniaturních robotů [6]. Lineární pohony nacházejí využití pro transport materiálu, pro obrábění či manipulaci [7].

1.1 Lineární polohovací systémy

Lineární elektrické motory jsou schopny realizovat posuvný pohyb bez dalších převodních mechanismů - toho je dosaženo díky rotoru rozvinutému do roviny. Pomyslný stator je u lineárních motorů tzv. primární díl, rotor je sekundární díl. Primární část je tvořena svazkem elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí. Sekundární část tvoří permanentní magnety [5].



Obrázek 1: Lineární přímý a nepřímý pohon [5].

Výhodami lineárního motoru oproti točivým strojům jsou zjednodušená konstrukce, menší hmotnost, zvětšení rychlosti (není omezen odstředivou silou) či odstranění otáčejících se částí.

Nevýhody lze spatřit v menší účinnosti nebo větším magnetizačním proudu. Pokud je na jezdcí uloženo vinutí (musí být tedy napájen), je další nevýhodou nutnost vedení napájecího kabelu podél dráhy motoru. Tuto nevýhodu lze řešit použitím permanentních magnetů na jezdcí [4] [5].

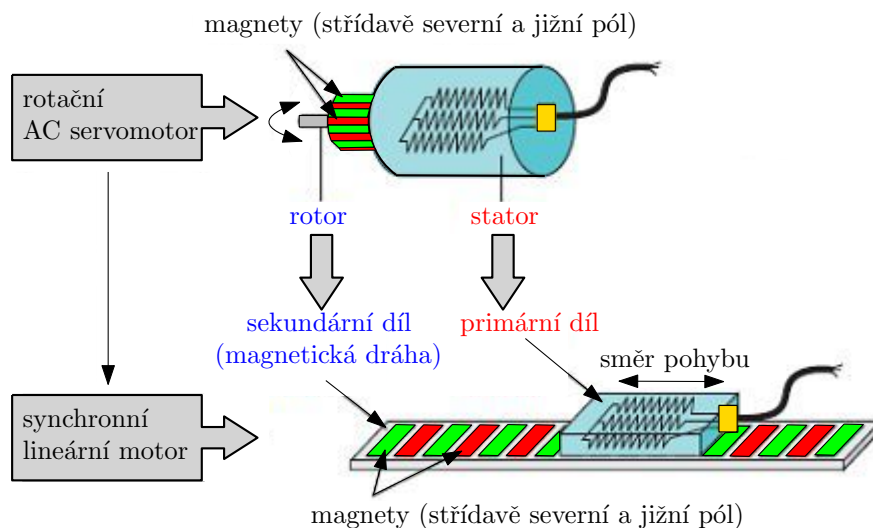
Servomotory

Jako servomotory jsou nazývány elektrické regulační motory s možností přesného řízení polohy a rychlosti. Složeny jsou ze samotného elektromotoru, výkonového měniče, řídicích regulačních obvodů a zpětné vazby polohy/natočení. Dle regulačních a výkonových parametrů lze vybírat z následujících konstrukčních provedení servomotoru [5].

Stejnoseměrné servomotory přináší snadnou regulaci pomocí změny napájecího napětí. V tomto provedení je stator tvořen permanentními magnety, na rotor je elektrické napětí přiloženo pomocí komutátoru [5].

Elektricky komutovaný servomotor na rozdíl od stejnosměrného servomotoru neobsahuje komutátor, což zjednodušuje údržbu motoru. Stator je tvořen trojfázovým vinutím, rotor je složen z permanentních magnetů. Funkce komutátoru na rotoru je přenesena na polovodičový měnič, který spíná proudy do statorového vinutí [5].

Synchronní motory používané v servopohonech mají primární díl (odpovídající statoru u točivého stroje) tvořený magnetickým obvodem z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v drážkách (viz Obr. 2). Konstrukční uspořádání rotoru může být různé. Dle způsobu uložení a počtu permanentních magnetů tyto stroje více či méně využívají reluktančního momentu [3]. Pro snímání natočení rotoru je používán např. resolver nebo absolutní, případně inkrementální čidlo polohy či rychlosti [5].



Obrázek 2: Synchronní lineární motor [3].

Asynchronní motory jsou dnes nejpoužívanějším typem elektrických motorů. Díky rozvoji v řídicí technice je možné je využít i v servopohonech. Sekundární díl asynchronních lineárních motorů je tvořen klecí nakrátko. Ta se skládá buď z vinutí uloženého v drážkách, nebo hliníkového či měděného pásu připevněného na ocelové podložce. Klec tvořená pásem je vhodná pro dopravníky, průmyslové manipulátory, podavače apod. [5] [8].

Převodní mechanismy

Pro převod rotačního pohybu krokových motorů nebo servomotorů na pohyb lineární používáme následující možnosti přeměny pohybu.

Kluzný pohybový šroub je typem převodu používaným pro malé rychlosti a vysoké převodní poměry. Tento převodní mechanismus je složen ze šroubu a matice. Možnosti realizace jsou ovšem dvě. V prvním případě se otáčí šroub, čímž dochází k lineárnímu pohybu matice. Druhou možností je stojící šroub, matice se tedy otáčí i posouvá zároveň [5].

Kuličkový šroub a matice fungují na principu valivého tření, na rozdíl od kluzného pohybového šroubu, kde je využito tření kluzného. Po celé délce ocelového šroubu je drážka místo závitů, v níž se pohybují kuličky. Tyto kuličky se na konci matice pomocí vratného kanálku vracejí zpět na začátek matice. Tento systém je naznačen na Obr. 3 [5] [9].



Obrázek 3: Kuličkový šroub a matice [5].

Ozubený hřeben s pastorkem (Obr. 4) tvoří lineární pohyb tím způsobem, že otáčením pastorku dochází k odvalování hřebene. Pastorek je poháněn motorem, který je často převodován. Tento typ převodního mechanismu dosahuje nižší rychlosti, zato ale vyššího momentu i vyšší posuvné síly [9].



Obrázek 4: Pastorek a ozubený hřeben [5].

Pohon s ozubeným řemenem se skládá z ozubeného řemene a řemenice. Řemenice je připojena k elektrickému motoru, který vytváří točivý pohyb. Tento typ pohonu je značně dynamický

vlivem malé hmotnosti řemenu [9]. Využití nalézá například u 3D tiskáren.



Obrázek 5: Řemenice a) a řemen b) [10] [11].

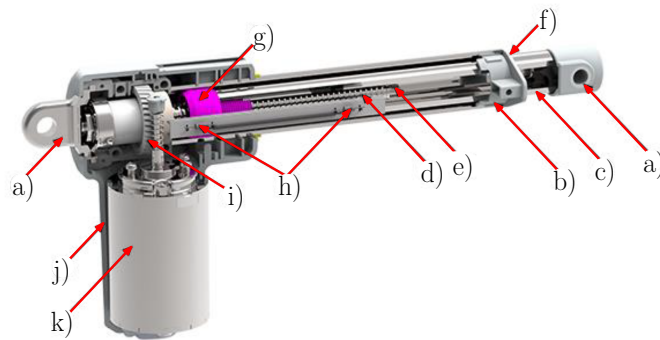
Elektrický lineární aktuátor

V této části je popsána funkce komerčně dostupného lineárního pohonu. Jeho jednotlivé části budou popsány s pomocí Obr. 6.

Oka a) slouží k připevnění samotného aktuátoru do polohované soustavy. Krycí trubice b) zajišťuje mechanickou ochranu vnitřních částí pohonu. Vnitřní píst c) je spojen s maticí se závitem - pohybem vodícího šroubu d) dochází k lineárnímu pohybu pístu. Šroub může mít různé druhy závitů, které reflektují velikost zátěže a požadovanou rychlost polohování.

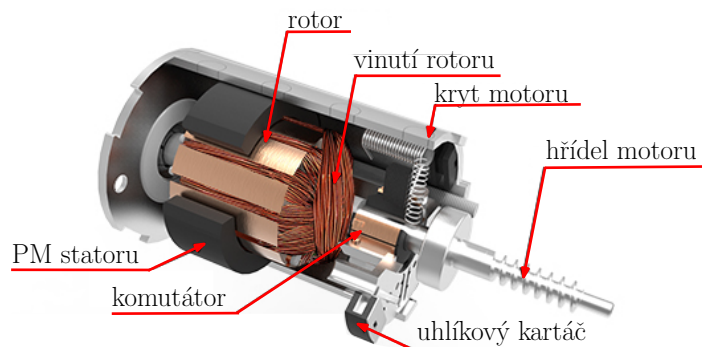
Bezpečnostní zarážka e) je umístěna na konci šroubu, slouží k mechanickému znemožnění přílišného vysunutí pístu z krycí trubice. Těsnění f) zabraňuje vstupu nečistot z okolí do vnitřního mechanismu polohovacího zařízení. Tato část určuje stupeň krytí aktuátoru. Matice vodícího šroubu g) je připevněna k vnitřnímu pístu a pohybuje se podél šroubu, zajišťuje tedy vysouvání nebo zasouvání pístu. Koncové spínače h) zajišťují zaznamenání krajních poloh aktuátoru. Při jejich dosažení může být odeslán řídicímu systému požadovaný signál, který zajistí odpojení napájení motoru.

Ozubená kola i) slouží k mechanickému převodu rychlosti mezi motorem a vysouvaným pístem. Kryt motoru j) zajišťuje omezení působení vnějších vlivů na samotný motor. Stejnoseměrný motor k) generuje mechanickou energii. V uspořádání zobrazeném na Obr. 6 je použit stejnosměrný motor s komutátorem, jehož konstrukce je naznačena na Obr. 7 [12].



Obrázek 6: Elektrický lineární aktuátor [12].

Stator motoru je složen ze dvou permanentních magnetů, které vytváří stacionární magnetické pole. Rotor se skládá z hřídele z křemíkové oceli, komutátoru a vinutí. Komutátor slouží ke změně polaroty proudu tekoucím rotorem, aby nedošlo ke ztrátě momentu. Uhlíkové kartáče jsou kluzné kontakty, které přivádějí elektrickou energii na vinutí rotoru [12].



Obrázek 7: Stejnoseměrný motor [12].

Lineární vedení

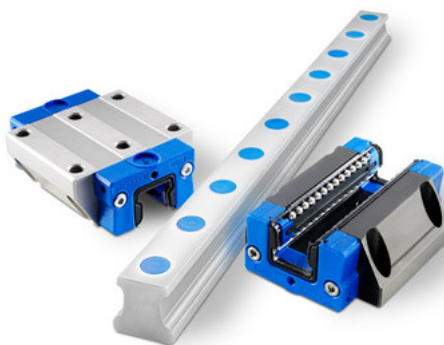
Lineární vedení lze dle způsobu přenosu pohybu mezi vozíkem a kolejnicí rozdělit na kluzná a valivá. Dále se budu věnovat vedením valivým, resp. kuličkovým.

Miniaturní kuličkové vedení je součástí lineárního pohonu, který se skládá z vozíku a kolejnice. Pohyb mezi vozíkem a profilovou kolejnicí je zajištěn pomocí kuliček. Ty obíhají v uzavřených drážkách v těle vozíku. Vozík tak přenáší sílu na vodící kolejnici a jeho pohyb je zatížen pouze valivým třením. Místo kuliček je možno použít vedení válečkové. Jeho výhodou je vyšší zatížení, dosahuje ale vyšší hlučnosti a tření. Použitím ocelových kuliček, které přenáší pohyb mezi kolejnicí a vozíkem, je zajištěno polohování s velkou přesností a nízkým třením.

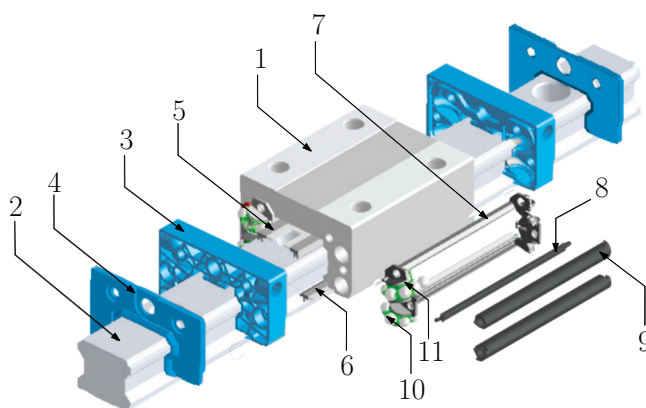
Valivé elementy je nutno vhodně mazat. Kuličky mohou být mazány přímo při oběhu, čímž se zaručuje optimální mazání. Vozíky standardně disponují maznicí, která zaručuje optimální mazací film. Valivé elementy jsou i z důvodu vyšší životnosti chráněny těsněním před vniknutím nečistot z okolí. Vozíky, kolejnice i valivá tělesa jsou často kalená [13]. Ukázka takového lineárního

vedení je na Obr. 8.

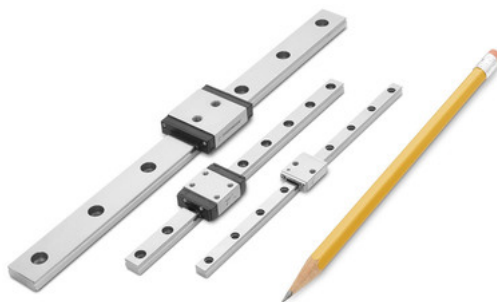
Výhodami zmíněného pohonu je tichý chod, vysoká tuhost konstrukce, rychlost až 10 m/s. Nevýhodami jsou nutnost doplňování maziva a hmotnost (vozík váží 1 kg a kolejnice délky 100 mm váží 200 g). Při nízkém obsahu maziva dojde k nárůstu valivého tření, čímž bude snížena životnost pohonu [14]. Kuličkové lineární vedení nalézá uplatnění v mnoha oblastech od slévárenství, potravinářství, zemědělství, přes transporty a jeřáby až po důlní průmysl [15]. Dále je možno najít tyto pohony u CNC strojů či 3D tiskáren. Miniaturní polohovací systém je možno použít pro zpracování polovodičů nebo v lékařských diagnostických zařízeních [16].



Obrázek 8: Kuličkové lineární vedení [13].



Obrázek 9: Části kuličkového lineárního vedení: 1 - ocelové tělo, 2 - kolejnice, 3 - , 4 - vnější těsnění, 5 - vnitřní těsnění, 6 - postranní těsnění, 7 - kanál kuliček, 8 - středová lišta, 9 - zpětný kanál, 10 - kuličky, 11 - kuličkový řetěz (nepovinný) [17].



Obrázek 10: Miniaturní kuličkové lineární vedení [16].

1.2 Senzorická soustava

Pro kvalitní zpětnovazební řízení lineárního aktuátoru je nutné znát přesně jeho polohu v systému. Zpětnovazební senzory slouží k získání informace o skutečném stavu aktuátoru. Pomocí senzorů lze měřit širokou škálu fyzikálních veličin - polohu, rychlost, zrychlení, teplotu, magnetickou indukci či hluk. Zpětná vazba je poslána do řídicí jednotky. Lineární aktuátory se zpětnou vazbou polohy jsou používány u takových aplikací, které vyžadují vysokou přesnost polohování s možností reakce na vnější poruchy [12] [18].

Senzory pro snímání polohy lze dle principu snímání dělit např. na magnetické a optické. Dle způsobu vyhodnocování polohy zmíním odměřování inkrementální a absolutní. U inkrementálního čidla je poloha dána počtem pruhů nebo impulzů na otáčku, které enkodér předá do řídicího systému. Aktuální pozice odpovídá počtu těchto impulzů. Při zapnutí stroje je nutné provést referenční jízdu. U absolutního měření je využíván unikátní kód, který odpovídá právě jedné poloze. Proto není nutná referenční jízda po zapnutí [19].

Magnetické odměřování

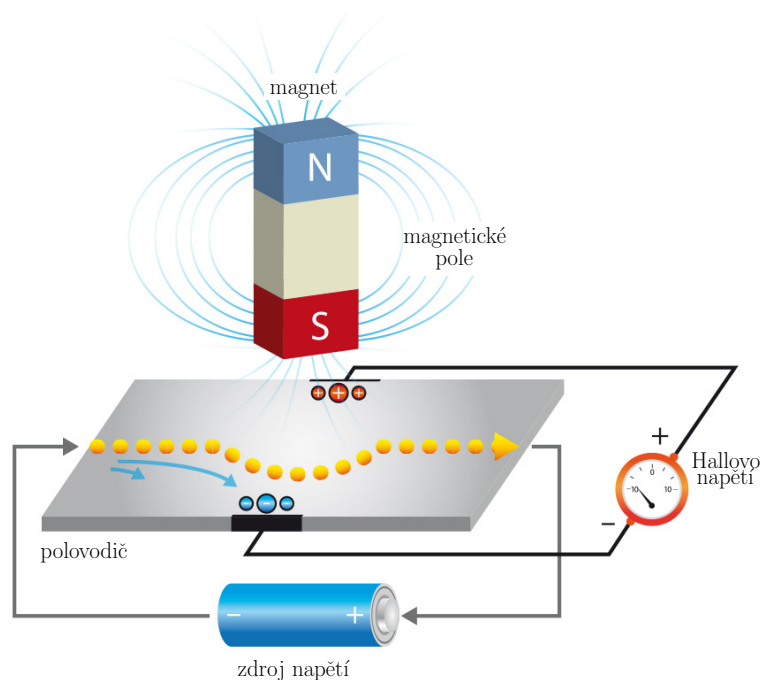
Principem magnetického odměřování je sledování změny intenzity magnetického pole. Snímače založené na měření magnetického pole je možno použít do nepříznivých prostředí, jsou odolné vůči oleji, nečistotám, vibracím či mechanickým rázům [18] [20].

Snímač polohy může být založen na principu Hallovy sondy. Ta reaguje na změny magnetického pole ve svém okolí, resp. snímá velikost a polaritu indukce magnetického pole. Pokud je tato změna větší než prahová hodnota (nastavená v MCU), senzor tuto změnu detekuje a vygeneruje napěťový pulz (viz Obr. 11). Tento způsob senzoru je používán nejčastěji pro svoji jednoduchost a nízkou náročnost na údržbu [12].

Jinou možností je použití potenciometru. Ten se skládá z jezdce a dvou pevných vývodů. Při posunu aktuátoru dochází k otáčení vřetena, které nastavuje novou hodnotu potenciometru pomocí jezdce. Každé poloze jezdce odpovídá určitá hodnota polohy. Výhodou potenciometru na rozdíl od Hallovy sondy je schopnost pamatování polohy i v případě výpadku napájení, je ale méně přesný a opotřebovává se [12].

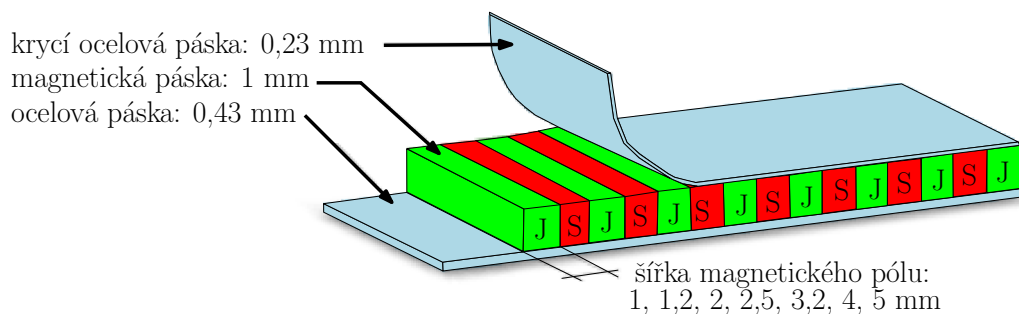
Jazyčkový senzor je schopen dle změn magnetického pole generovat proudové pulzy. Složen je z páru železných jazyčků - kontaktů, které jsou v případě bez působení vnějšího magnetického pole rozpojeny. Pokud bude na jazyčky působit vnější magnetické pole, dojde k jejich dotyku, a tedy k uzavření elektrického obvodu [12].

Nejčastěji používaný je systém magnetické pásky a enkodéru. Magnetická páska je tvořena materiálem, u kterého dochází k periodickému opakování severního a jižního magnetického pólu - viz Obr. 12. Na magnetickou pásku jsou kladeny vysoké nároky z důvodu požadované přesnosti. Enkodér slouží k převodu nasnímaného kódu na hodnotu polohy, jeho základní součástí jsou Hallovy sondy. V praxi je používáno zapojení čtyř Hallových sond zapojených za sebou

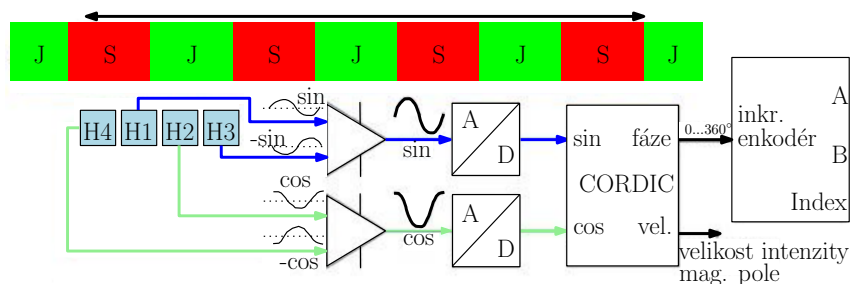


Obrázek 11: Princip Haloovy sondy [21].

(viz Obr. 13). První a třetí sonda snímá kladný, resp. záporný sinusový signál, druhá se čtvrtou kladný, resp. záporný kosinusový signál. Vždy jeden signál z páru je invertován a následně superponován k neinvertovanému signálu, čímž získáme vyšší přesnost a spolehlivost snímání. Výstupy digitálního enkodéru jsou signály A a B - oba obdélníkové signály jsou posunuté o 90° , dále signál Index, který udává změnu bitové hodnoty. Pouzdro enkodéru je elektricky odstíněno a signály jsou posílány v reálném čase do řídicího systému [18].

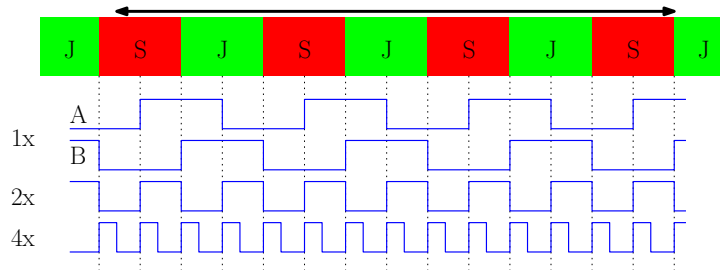


Obrázek 12: Magnetická páska. Hodnoty v levé horní části jsou výšky jednotlivých vrstev [18].



Obrázek 13: Schéma čidla s lineárním magnetickým enkodérem (H1-H4: Haloovy sondy) [18].

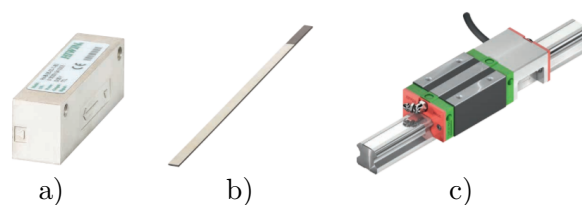
Výstupní signál enkodéru bude vypadat dle Obr. 14. Výstup značený 1x odpovídá signálům Hallovy sondy A, B, ke změně bitové hodnoty dochází při přejezdu čidla přes pól magnetu (Index). Při provedení logické funkce XOR nad těmito signály, dostaneme výstup 2x neboli dvojnásobné kódování. Důvodem tohoto počínání je větší rozlišení na jeden pól. Dalšího zpřesnění rozlišení můžeme dosáhnout, pokud vytvoříme impuls na každou vzestupnou i sestupnou hranu signálů A, B. Tím dostáváme signál 4x, což značí čtyřnásobné kódování [18].



Obrázek 14: Lineární magnetický enkodér: výstupní signály [18].

Absolutní varianta enkodéru je podobná variantám inkrementálním s tím rozdílem, že se používá více magnetických pásek tak, aby každé poloze odpovídala jedinečná kombinace signálu analogového nebo digitálního. Magnetické póly pásky tedy tvoří kód, který odpovídá přesně jedné poloze jezdce.

Lze se setkat se dvěma uspořádáními. Samotný senzor může být uložen mimo samotný polohovací systém. Druhou možností je integrované uložení přímo do polohovacího systému. Ukázka těchto uložení je na Obr. 15 [20].



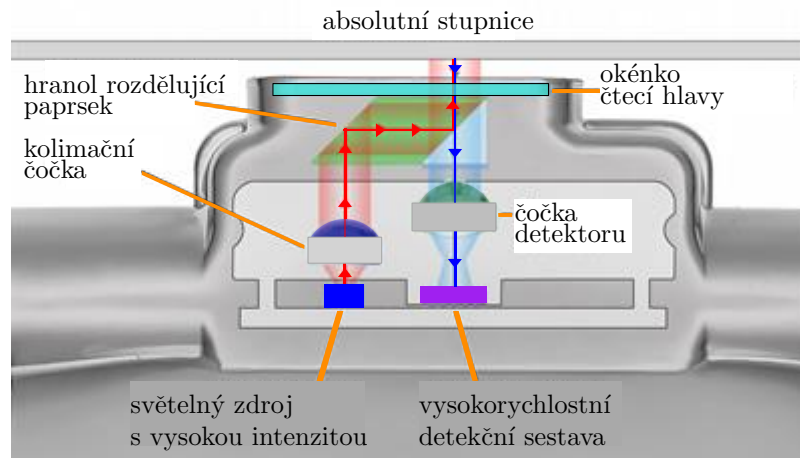
Obrázek 15: Magnetické senzory: a) enkodér, b) magnetická páska, c) integrované uložení [20].

Optické odměřování

Jiným možným způsobem sledování polohy je optické odměřování. Ten funguje na principu převodu světelné informace na elektrický signál. Světelný zdroj osvětluje stupnici, odražené paprsky jsou vyhodnoceny fotodetektorem. Fotodetektor je součástka citlivá na světlo, nejčastěji jsou použity fotodiody. Výstupem je proudový signál z fotodiody, jenž je následně zpracován obdobně jako signál z Hallovy sondy u magnetického odměřování [18].

Tyto snímače lze dělit na otevřené a uzavřené. Uzavřené optické snímače mají optický snímač polohy, nezbytnou elektroniku a měřítka umístěná v utěsněném pouzdře. Tato uspořádání dosahují vyšší odolnosti než otevřená. Stupnice měřítka obsahuje absolutní kódování polohy, které

je snímáno pomocí čtecí hlavy a elektronicky vyhodnoceno. Výstup je posílán v digitální formě pomocí sériového komunikačního protokolu. Princip optického senzoru je naznačen na Obr. 16 [22].



Obrázek 16: Optický senzor [22].

Optické snímání polohy dosahuje vyšší přesnosti odměřování než odměřování magnetické [18].

1.3 Polohování miniaturních robotů

Velice specializovanými lineárními aktuátory jsou planární miniaturní polohovací systémy. Ty se používají pro polohování těles malých rozměrů (v řádu mm či μm). Existuje více způsobů pro polohování miniaturních robotů, ale nejvíce používaným je polohování pomocí magnetického pole. Polohovanými tělesy jsou pak permanentní magnety. Tyto systémy jsou založeny na soustavě rovinných cívek, jež tvoří proměnlivé magnetické pole. Vhodným prostorovým natočením cívek je dosaženo druhého stupně volnosti. Roboty mohou být tvořeny z magnetů různých tvarů a velikostí. Uvažované systémy jsou založeny na interakci vnějšího magnetického pole vyvolaného cívkami s roboty složenými z permanentních magnetů. Jednotlivé systémy se liší z hlediska topologie cívek, topologie polohovaných těles, jejich provozu a pohybu [23] [24]. Důležitým tématem je individuální pohyb vícero robotů, neboť při základní topologii působí na všechny stejné magnetické pole.

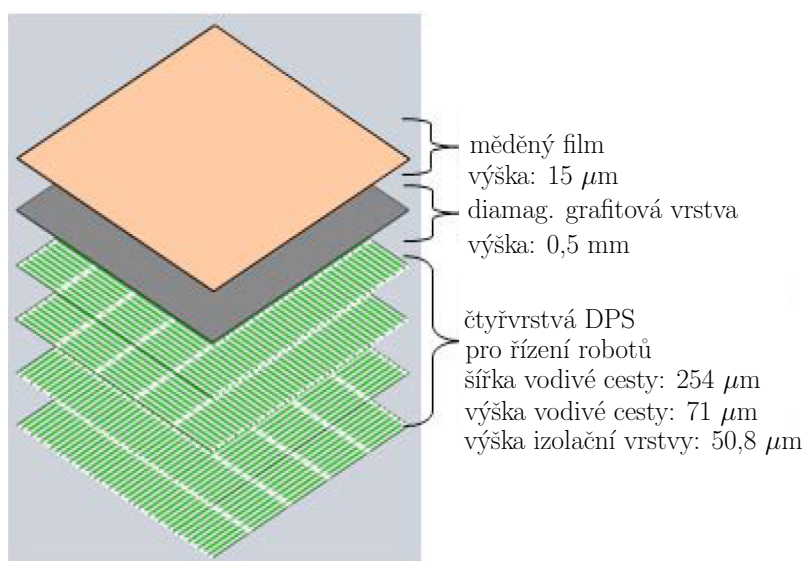
1.3.1 Polohovací systémy ve světě

Systémy pro polohování pomocí magnetického pole jsou v zájmu vědeckých týmů zejména z důvodu jejich vysokého potenciálu v lékařských a bioinženýrských aplikacích. Lze je rozdělit do dvou skupin dle konfigurace, a to na systémy s pohyblivými se permanentními magnety a na systémy se stacionárními elektromagnety. Vlastnosti zmíněných systémů jsou shrnuty v Tab. 2. Hlavními požadavky, kterými se výzkum bude ubírat, jsou škálovatelnost, integrace se snímacími zařízeními, bezpečnost obsluhy i pacientů a zlepšení výkonu aplikovaného magnetického pole [25].

Tabulka 2: Vybrané výhody a nevýhody nejběžnějších konfigurací magnetických polohovacích systémů [25].

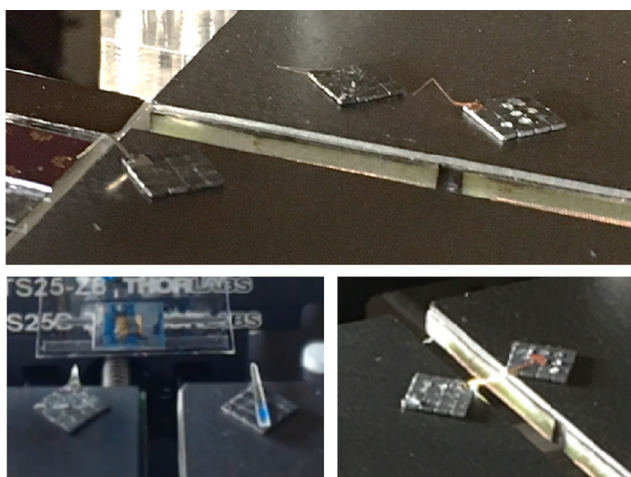
pohyblivé permanentní magnety	výhody
	nastavitelná velikost pracovní plochy silné magnetické pole bez zahřívání zařízení přizpůsobivost prostředí
stacionární elektromagnety	nevýhody
	magnetické pole nelze vypnout komplexní řídicí algoritmy
stacionární elektromagnety	výhody
	komplexní schopnost generace magnetického pole schopnost spínání/vypínání magnetického pole jednoduché řízení spínáním proudu
stacionární elektromagnety	nevýhody
	složitě škálování spotřeba energie a vývin tepla přizpůsobivost prostředí

Další text se zaměří na topologie systémů, které využívají pohyblivé permanentní magnety. Speciální topologií DPS pro polohování zobrazené na Obr. 17 je možné snížit tření robota při jeho pohybu na pracovní desce. Tento systém se nazývá *DM3*. Na vrstvy aktuálních cívek je uložena diamagnetická uhlíková vrstva a měděný film. Díky použití diamagnetického materiálu je permanentní magnet nadnášen, čímž se významně sníží tření, což vede k vysokým rychlostem polohování a nulové mechanické opotřebení robotů. Dále je možno polohovat s velkou přesností, neboť nedochází ke tření ani hysterezi i díky nízké přilnavosti k povrchu. Dle výšky diamagnetického materiálu a hmotnosti robota je možno dosáhnout vznášení částečného či úplného. To závisí na velikosti odpudivé síly mezi robotem a pracovní deskou a tíhové síly působící na robota [26].

**Obrázek 17:** Rozměry *DM3* systémů [26].

Diamagneticky levitované roboty mohou být výhodné při pokroku v oblasti snímání a kontroly oproti jiným technologiím díky:

- značnému dosahu polohování (v rozměrech od centimetrů do metrů) s vysokou přesností opakovatelnosti pohybu,
- husté miniaturizaci procesů na jednoho robota (31 mm^2),
- podpoře mnoha robotů pracujících paralelně pomocí prostorově řízených polí - viz Obr. 18,
- potenciálu pro řízenou výrobu a testování pomocí specializovaných robotů,
- levným a snadno přizpůsobitelným možностям výroby [6].



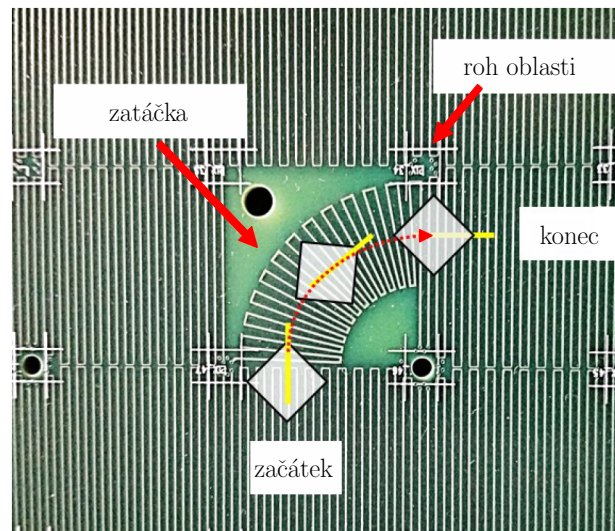
Obrázek 18: Spolupráce více robotů [6].

Otázkou počtu stupňů volnosti miniaturních polohovacích systémů se zabývá článek [27]. Zvyšování počtu nezávisle ovládaných stupňů volnosti polohování vede na značné množství separátních cívek. Možnostmi, jak dosáhnout rotace pomocí translačních uspořádání, jsou například následující metody:

- vytvoření cívky ve tvaru zatačky (viz Obr. 19),
- otáčení robota na rozmezí dvou oblastí polohování (pomocí odlišných magnetických polí na jednotlivých stranách robota),
- pomocí mechanických zarážek.

1.3.2 Polohovací systémy na FEL ZČU

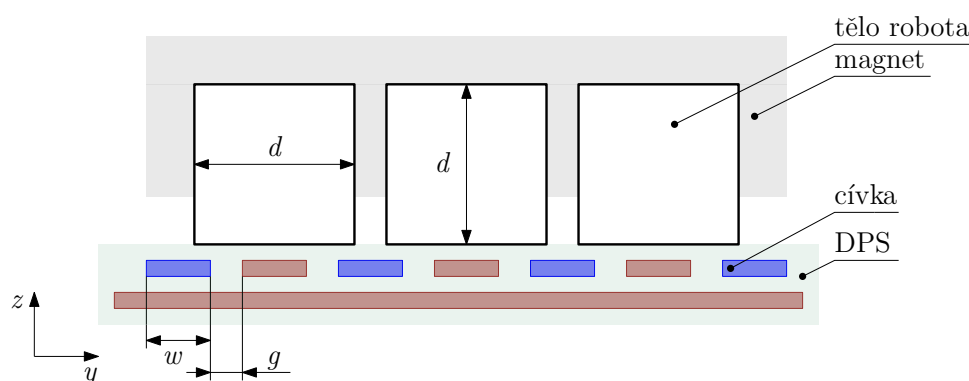
Miniaturní polohovací systémy vyvíjené na FEL ZČU jsou založeny na interakci vnějšího magnetického pole vyvolaného cívkami s roboty složenými z permanentních magnetů [23].



Obrázek 19: Zátáčka tvořená planárními závity [27].

Tato kapitola je započata tématem analýzy konstrukce a parametrů polohovacích systémů. Základním parametrem návrhu koplanárních cívek je velikost permanentních magnetů. Vzhledem k periodicitě magnetického pole na povrchu pracovní desky velikost permanentních magnetů určuje krok mezi jednotlivými vodiči cívek. S respektováním orientace proudu v závitě cívky je zřejmé, že základním pravidlem návrhu cívek je eliminování rušení vlivem částečných silových účinků. Proto je v případě námi uvažovaného systému základním návrhovým parametrem magnetu jeho průměr d (uvažujeme válcový magnet) [23].

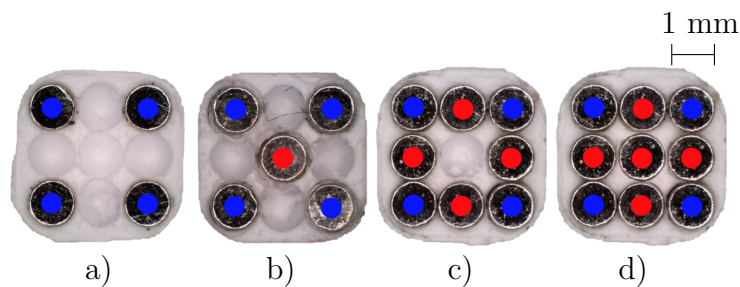
Dále jsou uvažovány cívky s konstantními vzájemnými mezerami. Průměr magnetu d (*diameter*) pak předurčuje poměr mezi šířkou vodiče w (*wire width*) a mezerou mezi vodiči g (*gap*). Účelem analýzy bylo stanovit závislosti velikosti permanentního magnetu a poměru mezi vodičem a mezerou na síle působící na permanentní magnet. Výsledkem modelu bylo řešení ve tvaru: $d = 2w + g$. Tento výsledek je zobrazen na Obr. 20 [23].



Obrázek 20: Popisovaný systém (pohled v řezu) [23].

Zatímco poměr mezi vodičem a mezerou je dán pouze průměrem jednoho permanentního magnetu, skutečný robot se může skládat z více magnetů. Možných kombinací je mnoho. Základní kombinace pro rozložení 3×3 jsou zobrazeny na Obr. 20. Po prvotních měřeních byla ze zkoušených kombinací vybrána varianta s 5 permanentními magnety. Důvodem je dosažení nejlepších parametrů z hlediska dynamiky (maximální naměřená rychlost byla 50 mm/s, maximální zátěž

robota vzhledem k jeho hmotnosti 500 %). Varianta se 4 permanentními magnety dosahuje nižší zatěžovací síly. Varianta s 8 permanentními magnety má nižší celkovou sílu z důvodu působení magnetů ve stejném poli v různém směru, tedy celkový součet sil je nižší než v případě s 5 permanentními magnety. Varianta s 9 permanentními magnety zlepšuje rozložení magnetického pole z pohledu celkové síly, ale hmotnost celého robota je dvojnásobná než s 5 permanentními magnety (většina hmotnosti robota je dána hmotností magnetů). Jednotlivé kombinace jsou zobrazeny na Obr. 21.



Obrázek 21: Různé roboty s vyznačenými orientacemi permanentních magnetů. Modrá znamená jižní magnetický pól, červená odpovídá severnímu magnetickému pólu [23].

Experimenty byly provedeny na prototypu *Scarabeus* s použitím robota s 5 permanentními magnety. Modul *Scarabeus* se skládá z mikrokontroléru, spínačů a pracovní desky se 4 koplanárními cívkami pro 2D pohyb, která byla navržena jako vícevrstvá DPS o rozměrech 100×100 mm [23].

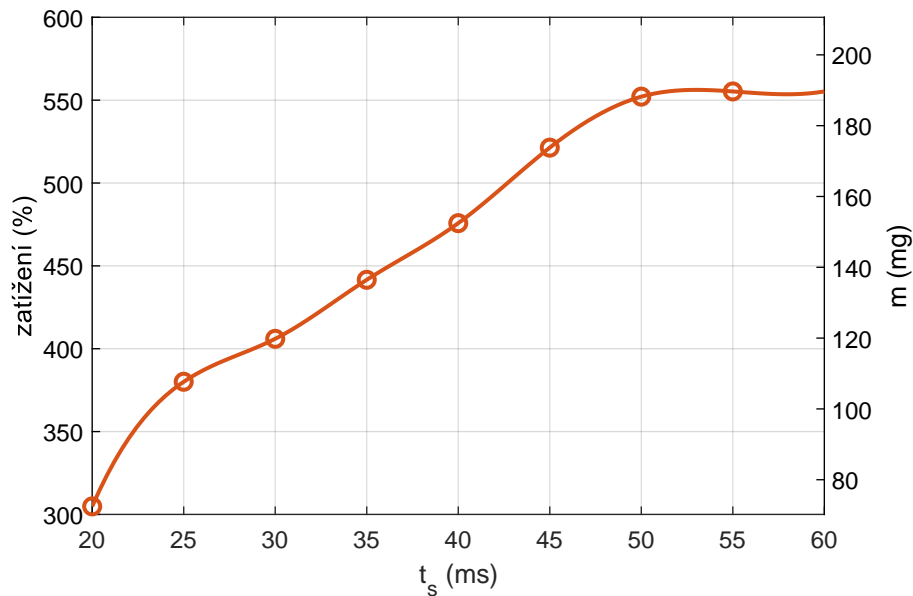
Dynamické vlastnosti robota jsou závislé hlavně na velikosti proudu protékajícího cívkami a hmotnosti robota. Při experimentech byla zjišťována závislost napětí, resp. výkonu na rychlosti robota pro různé doby sepnutí cívek t_s . Maximální rychlost robota pro dané napětí je závislá na konstrukci robota. Vyšší počet magnetů vede na vyšší hmotnost robota, ale také mění jeho magnetické vlastnosti. Měření ukázala, že uspořádání s 5 permanentními magnety bylo nejlepší. Se stejnou energií může dosáhnout téměř dvojnásobné rychlosti oproti robotu s 9 permanentními magnety [23].

Obr. 22 zobrazuje závislost hmotnosti robota a jeho přetížení na době jednoho kroku t_s . Výsledky experimentů ukazují, že nižší rychlost robota (vyšší doba kroku t_s) dovozuje vyšší zatížení, než dojde k dosažení zlomového bodu. Maximální zatížení robota přesahuje 500 % jeho hmotnosti ($m = 35$ mg), maximální zatížení je tedy téměř $m = 200$ mg. Pro zmíněný experiment bylo použito konstantní napětí $U = 17$ V. Zatěžovací hmotnost robota m byla pro každou dobu kroku t_s zvyšována, dokud nebyl pohyb robota nepřesný [23].

Z předchozích odstavců je zřejmé, že při návrhu magneticky aktuovaných minirobotů v rovině je nutno zajistit správný poměr mezi hmotností robota a rozložením magnetického pole vlivem permanentních magnetů [23].

Jak již bylo naznačeno výše, v rámci planárního polohování je důležitá otázka možnosti ovládní více robotů/jezdců nezávisle na sobě. Toho lze dosáhnout následujícími způsoby.

Polohovací desku, která se skládá z určitých vrstev cívek pro aktuaci, lze rozšířit o cívky, které budou uloženy v jiných vrstvách, ale budou umístěny přímo pod cívkami aktuálními. Ty se na-

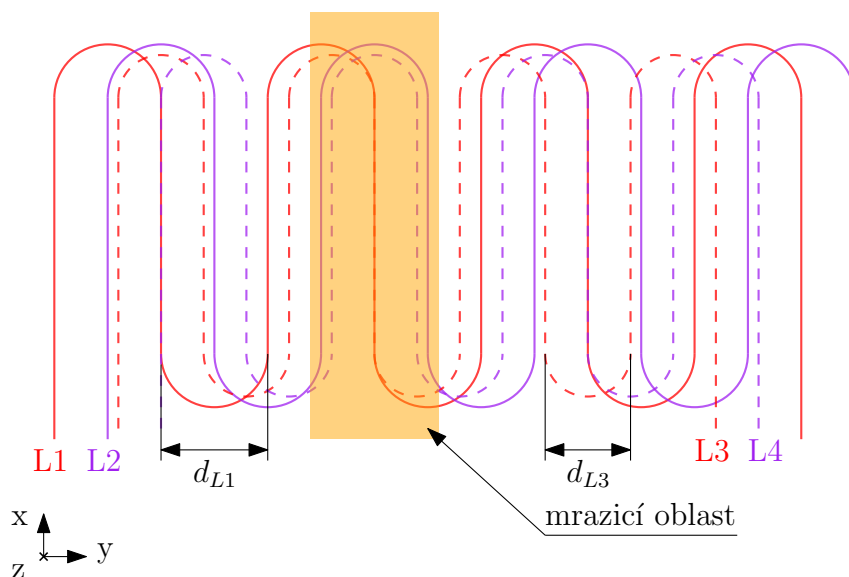


Obrázek 22: Maximální zatížení robota v závislosti na době kroku t_s ($t_s = 20$ ms odpovídá rychlosti robota 25 mm/s, $t_s = 60$ ms odpovídá rychlosti robota 8,3 mm/s) [23].

zývají mrazicí a slouží k zamezení pohybu robotů na pracovní desce. Proudové tekoucí aktuálními cívkami musí mít opačnou orientaci než proudy tekoucí příslušnými aktuálními cívkami. Na základě matematického modelu lze určit velikosti proudů, které mají téct mrazicími cívkami, aby došlo na pracovní ploše k vyrušení magnetických polí od cívek aktuálních a mrazicích. Robot uložený v takovéto oblasti se nebude pohybovat - jeho pohyb bude zmražen. Nevýhodou této metody je vyšší náročnost na topologii pracovní desky - vyšší počet mrazicích ploch lineárně zvyšuje počet cívek, tím tedy i počet spínacích prvků. Další nevýhodou takového řešení je nemožnost přesunu oblastí, ve kterých může být pohyb robota zmražen. Mrazicí oblasti jsou dány návrhem, resp. výrobou a dále je nelze měnit [2].

Druhým způsobem je speciální uspořádání cívek zmíněné v [28]. Vhodnou topologií cívek je možno mrazicí oblast dynamicky měnit při zachování nízkého počtu cívek. Tohoto jevu je dosaženo rozdílnou roztečí závitů koplanárních cívek určených pro pohyb robotů a cívek pro znemožnění pohybu (viz Obr. 23). Pro pohyb ve dvou osách (osách x a y) je zapotřebí dvou párů cívek aktuálních a dvou párů cívek mrazicích.

V určitých oblastech, kde jsou cívky aktuální a mrazicí vhodně zarovnané (jsou zarovnané pod sebou při pohledu na pracovní desku ve směru osy z), dochází k lokálnímu snížení magnetického pole na povrchu pracovní desky. Tento pokles magnetického pole vede k následujícímu jevu: pokud se robot přiblíží k této oblasti, síla vznikající mezi vodiči cívek a permanentními magnety robota není dostatečně velká pro další posun robota - dojde k jeho zastavení, zmrazení pohybu. Neboť se jedná o vlastnost lokální, je možné dále pohybovat s roboty, které jsou dostatečně vzdáleny od mrazicích oblastí, a tedy měnit vzájemnou polohu robotů na pracovní desce. Mrazení lze v tomto případě dosáhnout vhodnou spínací sekvencí cívek. Při každé spínací sekvenci jsou sepnuty vždy všechny (aktuální i mrazicí) cívky.



Obrázek 23: Rozložení cívek prototypu *Gryllus*². Na obrázku jsou zakótovány rozdílné rozteče cívek d_{L1} a d_{L3} [28].

Tento způsob polohování je výhodný z hlediska počtu spínacích prvků, kterých je méně díky nižšímu počtu cívek. Dále je možno při mrazení pohybu jednoho robota pro ostatní využít většinu plochy pracovní desky (více než 90 %). Mrazení pohybu je ale energeticky náročnější než samotný pohyb (při experimentu s příkonem 7,4 W je výkon 1,4 W na pohyb, 6 W pro mrazení).

1.4 Experimentální zařízení na FEL ZČU

V následujících odstavcích jsou shrnuta experimentální polohovací zařízení vyvinutá na FEL ZČU. Prvním z nich byl *MagSnail*. Tato platforma sloužila pro ověření základní funkčnosti a dosahovala pouze nízkých rychlostí polohování. DPS se skládá ze dvou prostorově posunutých cívek, které umožňují pohyb pouze s jedním stupněm volnosti. Mezi záporné vlastnosti tohoto zařízení patří překmitávání robota, nestabilita robota při menších hodnotách proudu či pootáčení robota. Tyto poznatky byly využity pro vývoj druhé polohovací platformy [24].

MagStriver byl navržen jako polohovací systém se dvěma stupni volnosti. Tato platforma měla stejný počet spínacích prvků na stupeň volnosti jako *MagSnail* a menší pracovní plochu. Podařilo se také navýšit nosnost samotného robota a značně snížit energetickou náročnost [24] [29].

Platforma *Scarabeus* měla za cíl zmenšit rozměry při zanechání či vylepšení výkonu. Opět došlo ke zvýšení možného zatížení robota (bylo dosaženo i zmenšení rozměrů robota), ovšem za cenu navýšení odporu cívek tvořících polohovací systém [30].

Hlavním cílem modelu *Isoptera* bylo umožnit nezávislé ovládání robotů a snížit odpor jednotlivých cívek. V tomto případě bylo nezávislého ovládání robotů dosaženo pomocí rozdělení pracovní plochy na čtyři individuálně napájené segmenty. Vhodným algoritmem spínání cívek bylo dosaženo přechodu robota z jednoho segmentu do vedlejšího. Nevýhodou tohoto uspořádání je

však značný nárůst spínacích prvků - každý segment se skládal ze čtyř koplanárních cívek (jedna *Isoptera* měla stejně spínacích prvků jako čtyři desky *Scarabeus*) [30] [31].

Ačkoli cíl experimentálního zařízení *Gryllus* byl stejný jako u předchozí *Isoptery*, tedy možnost paralelního polohování, výsledku bylo dosaženo jiným způsobem, a to pomocí mrazicích cívek. Ty byly navrženy tak, aby ve sloupcích rozdělávaly celou pracovní plochu do několika oblastí, v nichž šlo v případě mrazení roboty pohybovat. Při požadavku na znemožnění pohybu určitých robotů je pro polohování zbývajících k dispozici pouze polovina pracovní plochy, což je hlavní nevýhoda této platformy. Samotný robot je tvořen tělem, které bylo vyrobeno z vysokopevnostního polymeru s konečnými rozměry $3,5 \times 3,5$ mm. V něm jsou v otvorech uloženy válcové neodymové permanentní magnety [31].

V rámci bakalářské práce jsem se věnoval návrhu experimentálního zařízení s označením *Gryllus 2*. Tato platforma vychází z poznatků získaných během experimentů s platformou *Gryllus*, tedy možností mrazení pohybu pomocí mrazicích cívek. Na rozdíl od prototypu *Gryllus* obsahuje lokální mrazicí cívkami různých tvarů a velikostí (jsou dány topologií DPS), což umožňuje mnohem lépe využít plochu pracovní desky. Cenou je však značný nárůst počtu spínacích prvků, a tím podstatně náročnější výroba i odhalování případných chyb.

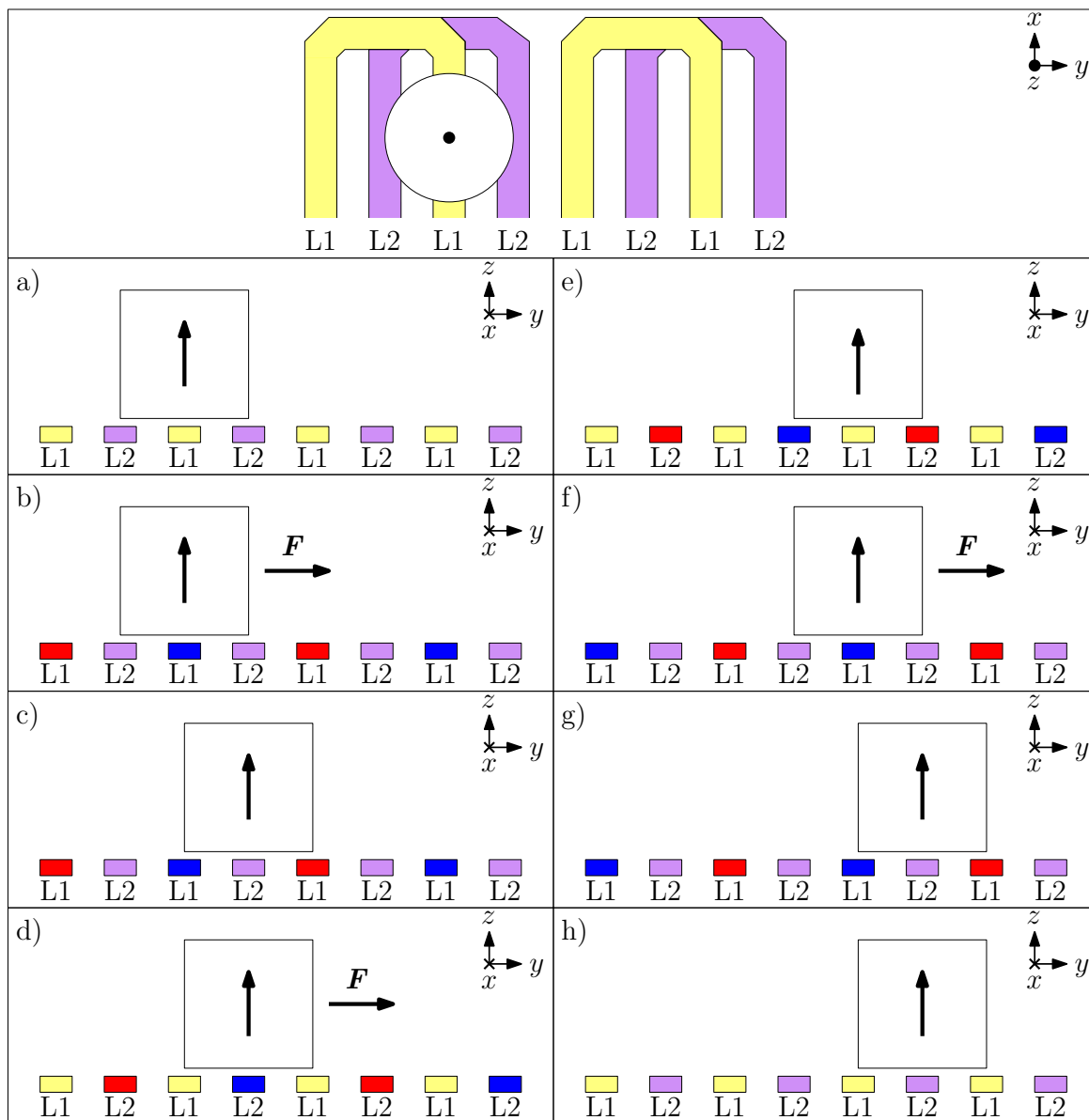
Jinou možností nezávislého paralelního polohování je speciální topologie zmíněná výše, demonstrována pomocí prototypu *Gryllus*². Pouhými čtyřmi cívkami je možno zajistit v určitých oblastech zmrazení pohybu robotů pomocí rozdílného kroku koplanárních cívek (pro jeden stupeň volnosti) [28].

Všechna vyvíjená zařízení mají shodné vnější rozměry, teoreticky je možné mezi nimi při experimentech v laboratoři přejíždět.

1.4.1 Princip polohování

Princip polohování miniaturních robotů je zobrazen na Obr. 24. V horní části obrázku je pohled na soustavu dvou koplanárních cívek a jeden permanentní magnet. Cívky jsou značeny jako L1 a L2. Permanentní magnet je uvažován jako krychlový o hraně délky 1 mm s magnetickou indukcí ve směru osy z .

Na dalších zobrazeních (a) až h)) je nastíněn pohyb v ose y v pohledu z boku (pohled do roviny yz). Klidový stav je na části obrázku a). Při sepnutí proudu cívkou L1 v naznačeném směru (tečka znamená směr proudu ven z nákresny, křížek směr opačný, část b)) dojde k vyvinutí odpudivé síly mezi třetím vodičem zleva a permanentním magnetem, magnet je tedy tlačěn směrem nad čtvrtý vodič zleva (nad cívku L2). Nad daným vodičem dojde k vyrovnání sil - síla působící od třetího vodiče zleva je stejná jako síla od pátého vodiče zleva na magnet - magnet se zastaví nad čtvrtým vodičem zleva (c)). Při vhodném sepnutí cívkou L2 a vypnutí proudu cívkou L1 dojde k dalšímu posunu (d), resp. e)). Takto je pokračováno ve spínání cívek a plynulém pohybu magnetu.



Obrázek 24: Princip pohybu. Nahoře zobrazeny dvě koplanární cívky (žlutá a fialová). Na nich je uložen permanentní magnet s vyznačeným směrem magnetické indukce. V částech a) až h) je naznačeno spínání proudů do cívek pro pohyb o 3 kroky ve směru osy y . Modře je značen proud tekoucí ve směru osy x , červeně proud tekoucí opačným směrem.

2 Simulace

V kapitole 2 jsou shrnuty matematické modely, které byly vytvořeny v programu *COMSOL Multiphysics*, aby byly pomocí nich zjištěny teoretické vlastnosti následně vyvíjeného lineárního aktuátoru. Byly zaměřeny na výpočet velikosti síly, která způsobuje pohyb jezdce. Dále zjišťovaly vlastnosti systému s použitím diamagnetického materiálu na povrchu DPS aktuátoru, který by snižoval mechanické tření [26]. Poslední modely se věnovaly možnostem magnetického vedení jezdce. Jednotlivé modely jsou přiblíženy v následujících podkapitolách po úvodu do výpočtů v elektromagnetickém poli.

2.1 Matematický model

Elektromagnetický systém byl řešen pomocí matematického modelu, jenž lze popsat parciální diferenciální rovnicí. Ta určuje rozložení magnetického pole a lze ji zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext}, \quad (1)$$

kde μ (H/m) značí permeabilitu, \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál, \mathbf{B}_r (T) remanentní indukce, γ (S/m) elektrická vodivost, \mathbf{v} (m/s) je rychlost a \mathbf{J}_{ext} (A/m²) je vnější proudová hustota.

Neboť při polohování dochází k relativně nízké rychlosti \mathbf{v} i malé časové změně magnetického potenciálu \mathbf{A} , lze členy obsahující tyto veličiny zanedbat. Při uvažování malých hodnot \mathbf{v} a \mathbf{A} lze tedy druhý a třetí člen rovnice neuvažovat. Rovnici popisující rozložení pole vyvolaného cívkami lze tedy zapsat následovně:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{ext}. \quad (2)$$

Magnetickou část Lorentzovy síly, tedy síly způsobující pohyb jezdce po aktuátoru, lze určit jako

$$\mathbf{F}_{L,m} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV, \quad (3)$$

kde \mathbf{J} je proudová hustota (A/m²), \mathbf{B} (T) je magnetická indukce a V (m³) je vyšetřovaný objem.

Při vyšetřování možností magnetického vedení či výpočtu sil působících při použití diamagnetického materiálu jsou magnetické síly počítány pomocí Maxwellova tenzoru pnutí [32].

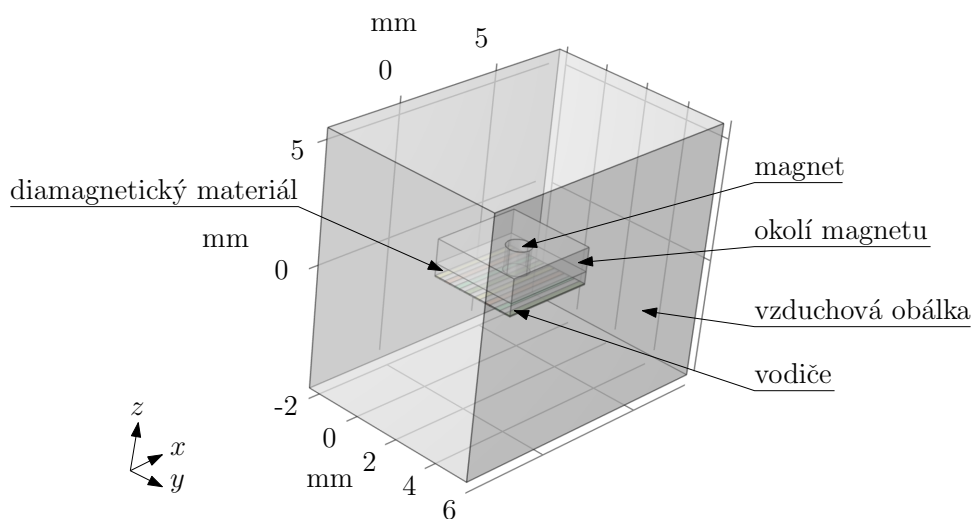
2.2 Síla mezi vodiči a jedním magnetem

Řešená geometrie je zřejmá z Obr. 25, resp. Obr. 26. Permanentní magnet válcového tvaru je uložen na dvou planárních cívkách, které reprezentuje 8 vodičů. Magnet vykazuje magnetickou indukci $|\mathbf{B}_r| = B_z = 1,2 \text{ T}$. Vybrané vodiče jsou napájeny proudem $I = 0,5 \text{ A}$, resp. $I = -0,5 \text{ A}$, což při přepočtu na jednotku plochy (průřez vodiče) dává proudovou hustotu $|\mathbf{J}| = J_x$. Pro výpočty, které uvažují vodiče cívek, je první vodič protékán proudem v ose x , třetí vodič ve směru opačném k ose x , pátý vodič ve směru osy x a sedmý proti kladnému směru osy x . Ostatní oblasti jsou bez zdroje magnetické indukce i proudové hustoty. Mezi vodiče a magnet je vložena vrstva diamagnetického materiálu. Celý model je uzavřen do kvádrů, jež ohraničují řešenou oblast. Na okraji této oblasti je uplatněna Dirichletova podmínka nulového magnetického potenciálu \mathbf{A} , tedy

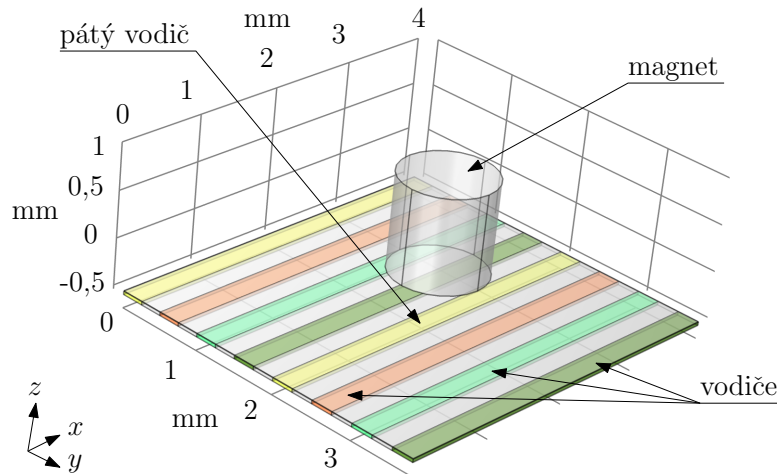
$$\mathbf{A} = 0. \quad (4)$$

Daný model byl konvergován z hlediska energie největšího zdroje magnetického pole v modelu, kterým je permanentní válcový magnet. Okolní vzduchová obálka tedy byla volena tak, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků z důvodu příliš malé oblasti výpočtu.

Taktéž byla konvergována velikost elementů výpočetní sítě. Náročnost volby velikosti elementů sítě modelu byla dána řádovými rozdíly v rozměrech jednotlivých částí. Výška vodiče cívky byla $35 \mu\text{m}$, zatímco průměr i výška magnetu 1 mm . Zde byly reflektovány dva požadavky: přesnost a náročnost výpočtu. Z hlediska přesnosti výpočtu by bylo nejlepší volit co nejvíce bodů výpočetních sítě. To by ale vedlo na příliš náročný výpočet, v některých případech zbytečně - již by nedocházelo k zisku přesnějšího výsledku. Proto bylo nutné zvolit kompromis mezi těmito dvěma požadavky. Jako indikátor vhodné volby síťování byla využita hodnota celkové energie systému. Pokud po dalším zjemnění sítě již nedochází k velké změně celkové energie modelu, je možno považovat model za zkonvergovaný z hlediska sítě. Prvky s nejhustější výpočetní sítí byly magnet, vodiče a diamagnetická vrstva. Okolí magnetu bylo síťováno hruběji stejně jako okolní vzduchová obálka.



Obrázek 25: Geometrie modelu: celkový pohled.



Obrázek 26: Geometrie modelu: magnet a vodiče.

Sestavený matematický model počítá s následujícími rozměry (viz Tab. 3), které vycházely z předchozích polohovacích platform (jsou odlišné od skutečně použitých - viz dále). Z důvodu značné náročnosti určení výsledků pomocí tohoto modelu byly výpočty dále rozděleny na více modelů, které zvlášť zjišťovaly velikost, resp. průběh síly působící na jezdec a závislosti týkající se použití diamagnetického materiálu.

Tabulka 3: Rozměry modelu.

parametr	hodnota
šířka vodiče	0,25 mm
výška vodiče	33 μm
mezera mezi vodiči	0,25 mm
mezera mezi vrstvami	0,106 mm

2.3 Síla mezi vodiči a jezdcem

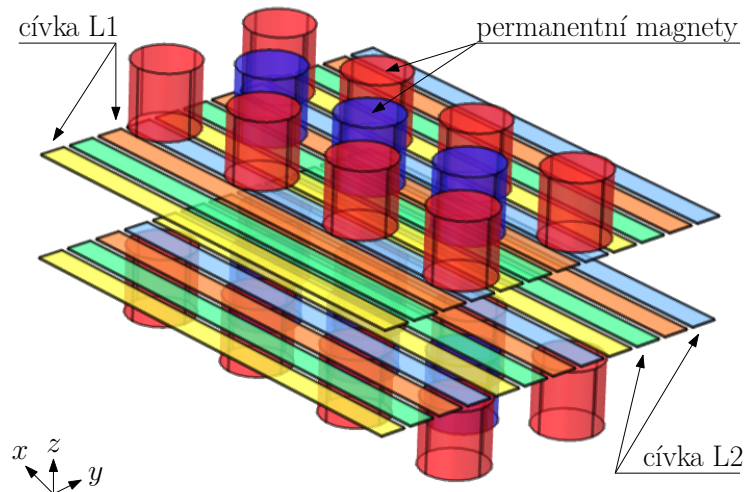
Aktuátor je reprezentován v modelu dvěma vrstvami vodičů, každá vrstva je tvořena 12 vodiči. Zmíněné vodiče představují celkem dvě koplanární cívky. Jezdec je v modelu zobrazen jako uskupení válcových permanentních magnetů. Geometrie je zřejmá z Obr. 27.

Permanentní magnety válcového tvaru vykazují magnetickou indukci $|\mathbf{B}_r| = B_z = 1,2 \text{ T}$. Vybrané vodiče jsou napájeny proudem $I = 1 \text{ A}$, resp. $I = -1 \text{ A}$, což při přepočtu na jednotku plochy (průřez vodiče) dává proudovou hustotu $|\mathbf{J}| = J_x$. Pro výpočty, které uvažují vodiče cívky, je první vodič protékán proudem v ose x , třetí vodič ve směru opačném k ose x , pátý vodič ve směru osy x , sedmý proti kladnému směru osy x atd. Ostatní oblasti jsou bez zdroje magnetické indukce i proudové hustoty. Celý model je uzavřen do pomyslné koule, jenž ohraničuje řešenou oblast. Na okraji této oblasti je uplatněna Dirichletova podmínka nulového magnetického potenciálu \mathbf{A} ,

tedy

$$\mathbf{A} = 0. \quad (5)$$

Daný model byl konvergován z hlediska celkové energie systému stejným způsobem jako matematický model v předchozí podkapitole.



Obrázek 27: Geometrie modelu: magnety a cívky.

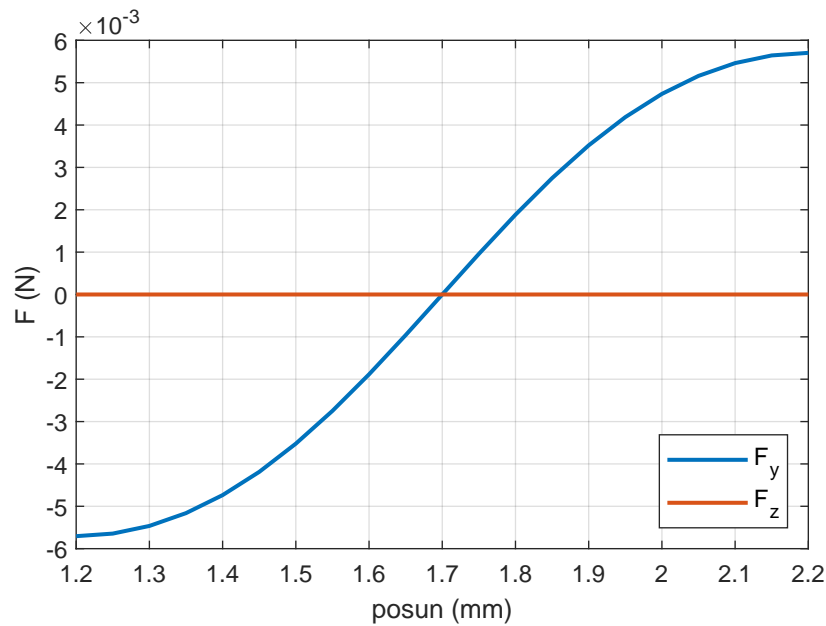
Sestavený matematický model počítá s následujícími rozměry.

Tabulka 4: Rozměry prototypu lineárního aktuátoru v modelu.

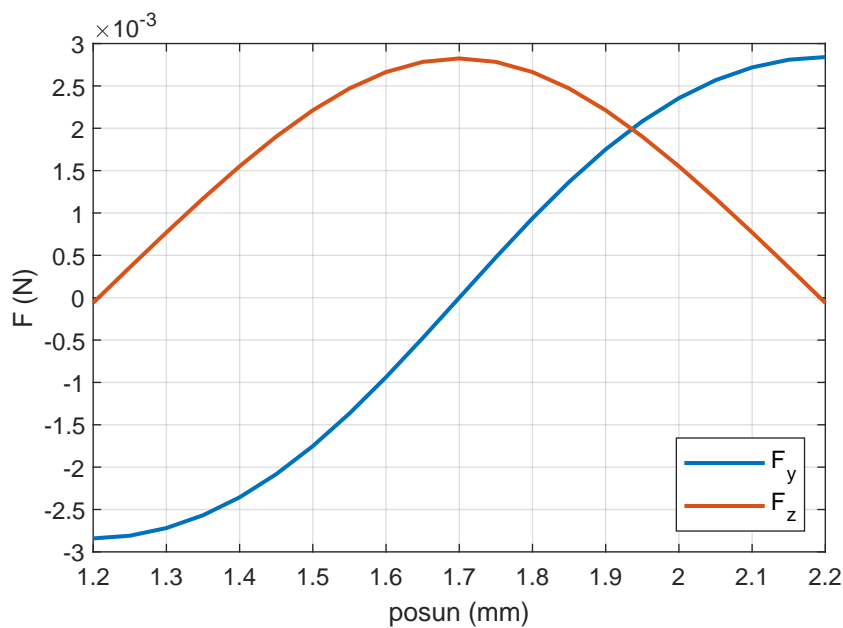
parametr	hodnota
šířka vodiče	0,4 mm
výška vodiče	18 μm
mezera mezi vodiči	0,1 mm
délka vodičů	7 mm

Výsledky modelu lze spatřit na Obr. 28. Jezdec byl posouván mezi dvěma napájenými vodiči v celkové dráze 1 mm (v příslušných grafech značeno jako *posun*). Začínal tedy ve vzdálenosti 1,2 mm ve směru osy y od hrany prvního vodiče, kde se jezdec nacházel nad napájeným vodičem. Ve vzdálenosti 1,7 mm se jezdec nachází nad vodičem nenapájeným, působí na něj tedy nulová síla. Ve vzdálenosti posunu 2,2 mm je jezdec opět nad napájeným vodičem, avšak s opačnou orientací proudové hustoty.

Na Obr. 29 lze sledovat průběh sil v osách y (aktuální síla) a z (přitažlivá/odpudivá síla) při uvažování pouze poloviny představené geometrie - tedy jedna vrstva cívek, stejně tak pouze jedna vrstva magnetů na jezdcí. Zajímavé je, že v tomto případě dochází k prostorově proměnné síle v ose z podél celého posunu. Tento jev je značně omezen při použití při plné geometrii - viz předchozí Obr. 28.



Obrázek 28: Průběh sil působících na jezdec v závislosti na posunu jezdce v ose y .



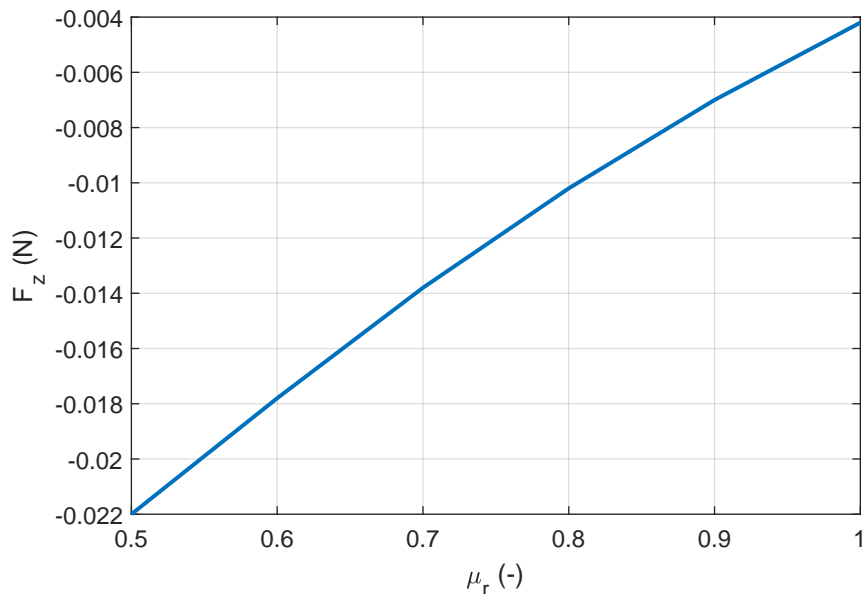
Obrázek 29: Průběh sil působících na polovinu jezdce v závislosti posunu jezdce v ose y .

2.4 Použití diamagnetického materiálu

3D modelem s diamagnetickým materiálem bez uvažování soustavy cívek bylo zjišťováno možné použití např. uhlíkové fólie, která by svými diamagnetickými vlastnostmi mohla snížit tření a při dostatečné výšce zajistit levitaci jezdce. Geometrie tohoto modelu vycházela z Obr. 25. Výška diamagnetického materiálu byla měněna od $1 \mu\text{m}$ do $1000 \mu\text{m}$. Výsledky tohoto modelu s proměnnou výškou diamagnetického materiálu však nebyly přesné.

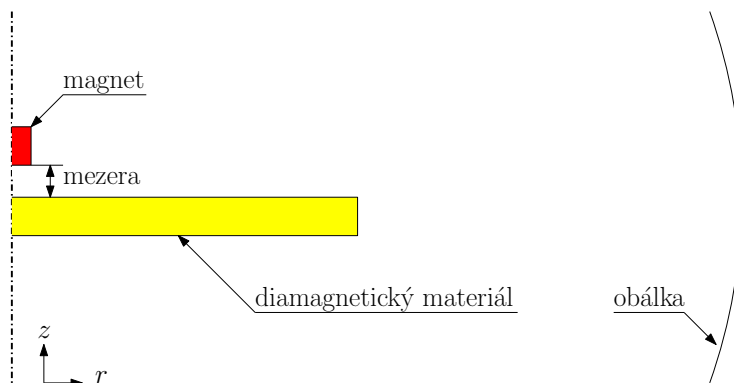
Průběh závislosti síly v ose z na hodnotě relativní permeability je zobrazen na Obr. 30. Z daného

grafu je zřejmé, že velikost relativní permeability ovlivňuje sílu v ose z značně.



Obrázek 30: Závislost síly působící na jeden válcový magnet v ose z při různé hodnotě relativní permeability uhlíkové vrstvy.

Protože pomocí 3D modelu bylo výpočetně složité určit relevantní výsledky vlivu diamagnetického materiálu na celkové magnetické síly působící na jeden magnet jezdce, byl místo 3D modelu navržen 2D axisymetrický model, jehož geometrie je zobrazena na Obr. 31. Pro jednodušší orientaci v této podkapitole bych chtěl definovat veličinu *mezera*, která udává vzdálenost mezi magnetem a diamagnetickým materiálem - viz zmíněný obrázek.

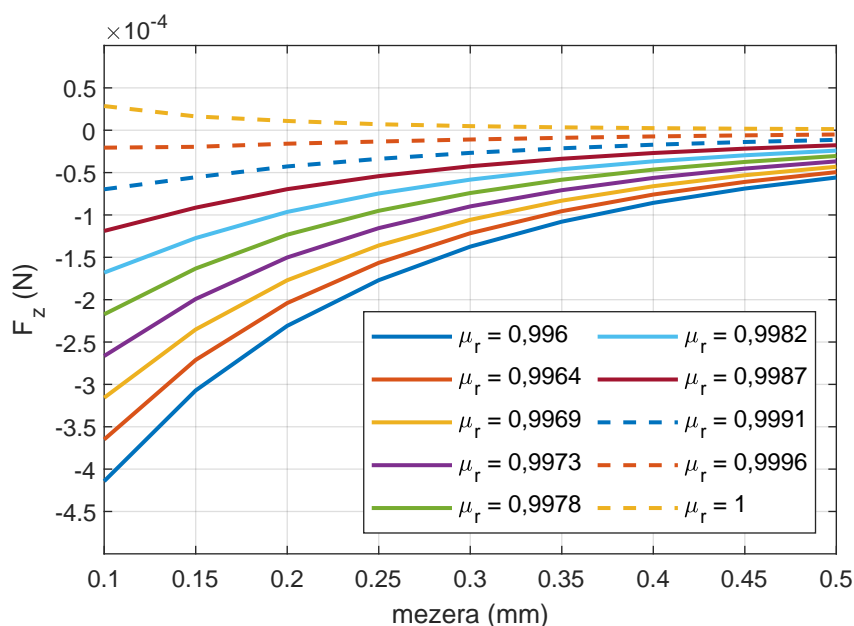


Obrázek 31: Geometrie 2D modelu při použití diamagnetického materiálu.

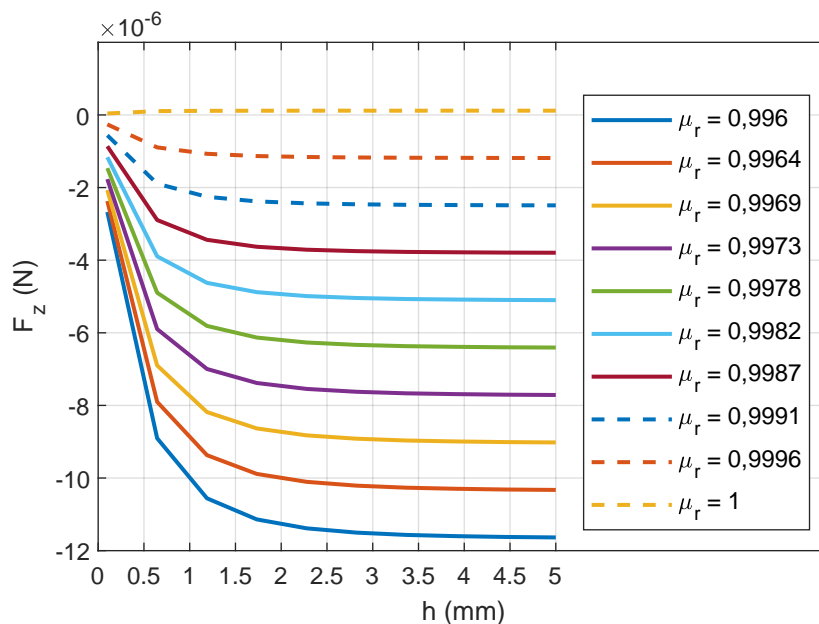
Tabulka 5: Rozměry modelu s diamagnetickým materiálem.

parametr	hodnota
výška magnetu	1 mm
poloměr magnetu	0,5 mm
mezera	0,1 - 0,5 mm
výška diamag. materiálu	0,1 - 5 mm
poloměr diamag. materiálu	10 mm
poloměr vzduchové obálky	22 mm

Výsledky 2D modelů lze spatřit na Obr. 32, resp. 33. Z prvně jmenovaného grafu je zřejmé, že vliv mezery mezi magnetem a diamagnetickým materiálem je značný - při snižování mezery mezi oběma zmíněnými objekty dochází k nárůstu síly, kterou jsou předměty odpuzovány. Dále je tato síla závislá na velikosti relativní permeability - snižováním tohoto parametru značně narůstá i velikost síly v ose z . Materiálem, který by bylo možno použít, je pyrolitický uhlík v tenké vrstvě. Výsledky tohoto modelu byly experimentálně ověřovány v kapitole 4.

**Obrázek 32:** Závislost magnetické síly působící na magnet při změně mezery mezi magnetem a diamagnetickou vrstvou pro různé hodnoty relativní permeability diamagnetické vrstvy.

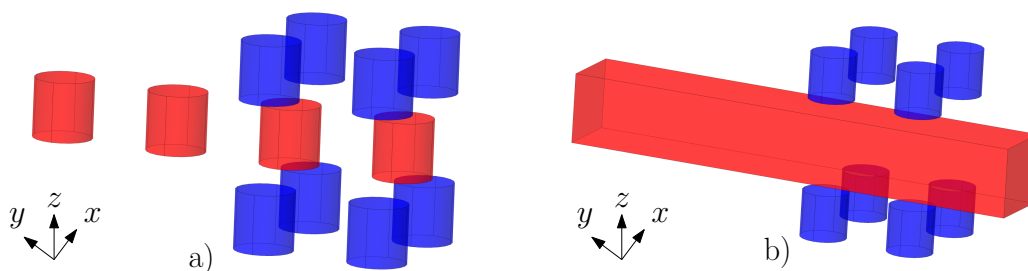
Obr. 33 zobrazuje závislost síly odpuzující magnet na výšce diamagnetického materiálu pro různé hodnoty relativní permeability. Při poklesu relativní permeability dochází ke zvýšení velikosti odpudivé síly, která se od určité hodnoty výšky diamagnetického materiálu ustálí a je nadále konstantní. Nutno podotknout, že mezera mezi diamagnetickým materiálem a magnetem byla udržována na hodnotě 1 mm a byla tedy konstantní.



Obrázek 33: Závislost magnetické síly působící na magnet v ose z při změně výšky diamagnetické vrstvy h pro různé hodnoty relativní permeability diamagnetické vrstvy.

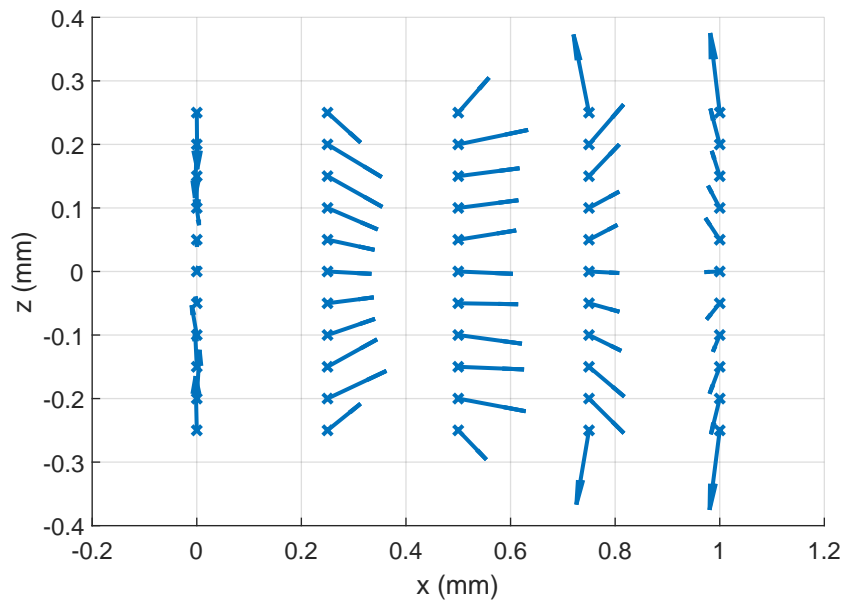
2.5 Magnetické vedení

Z důvodu vysoké ceny diamagnetického materiálu a neúspěšných předchozích experimentů byly zkoumány možnosti snížení tření pomocí magnetického pole - magnetické vedení. Pro daný problém jsem uvažoval nejprve válcové magnety pro robota i samotný aktuátor, druhý model počítal s kvádrovým magnetem na aktuátoru (viz Obr. 34 a), resp. b)). Cílem bylo určit takové rozložení magnetů na jezdcí a aktuátoru, aby pouze s pomocí magnetů došlo k vystředění jezdecke na aktuátoru (v osách x a z), a tím ke snížení třecí síly mezi jezdcem a aktuátorem.



Obrázek 34: Geometrie matematických modelů a) s válcovými magnety na DPS, b) s kvádrovými magnety na DPS. Červené magnety mají orientaci magnetické indukce v ose z , modré magnety opačnou.

Dále byl vytvořen matematický model, u kterého je uvažována pouze polovina aktuátoru (při pohledu kolmém na rovinu xz) - viz Obr. 34. Na zmíněné polovině aktuátoru je uložena jedna řada válcových magnetů, na jezdcí pak 4 magnety. Cílem bylo určit sílu, která působí na magnet aktuátoru při různé vzájemné pozici aktuátoru a jezdecke (Obr. 35 a)). Druhý model předpokládá uložení kvádrového magnetu na aktuátoru namísto válcových (Obr. 35 b)). Výsledky modelu s kvádrovými magnety jsou na Obr. 35.



Obrázek 35: Síly působící na jezdec při vychýlení pro kvádrový magnet na DPS. Pomocí křížků jsou naznačeny středy magnetů na aktuátoru, bod $[0,0]$ zobrazuje stabilní polohu. Následně byl středový magnet vychylován v ose x a z (viz příslušné body), síla v bodech je zobrazena pomocí šipek, velikost síly odpovídá délce šipky.

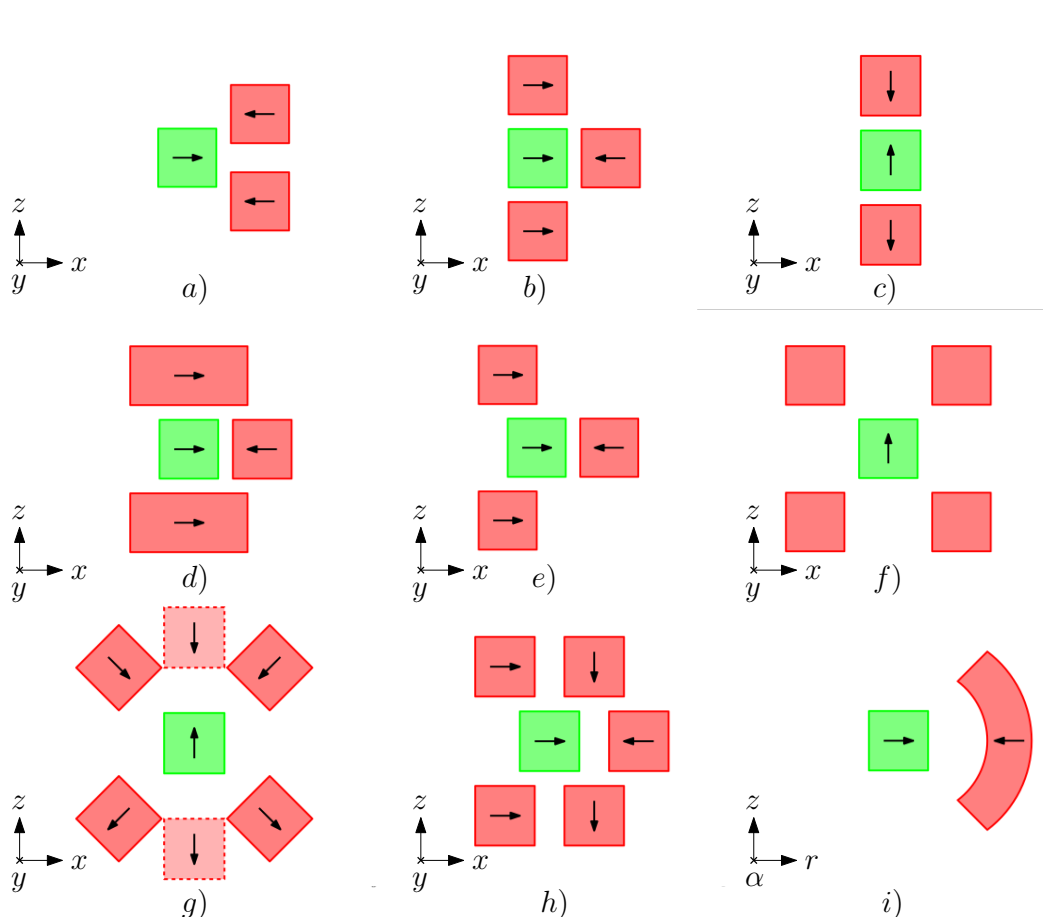
Z výsledků vyplývá, že dané uspořádání je nevhodné pro stabilizaci jezdce vůči aktuátoru - i při malém vychýlení dojde k dalšímu vychylování jezdce z klidové polohy. V případě modelu dle Obr. 34 a) je při posunech síla dále závislá na posun v ose y , proto není to uspořádání vhodné.

Pro další výpočty byly sestaveny pouze zjednodušené 2D modely (při uvažování kvádrových magnetů), jejichž výsledky mohly být analyzovány podstatně rychleji a zobrazeny přehledněji než-li výsledky 3D modelu. Zkoumané geometrie jsou zobrazeny na Obr. 36. Zeleně jsou označeny magnety na aktuátoru, červeně magnety na jezdcí. Šipky uvnitř jednotlivých objektů značí směr magnetické indukce. U geometrie f) jsem zkoušel všechny kombinace směrů magnetické indukce (pouze ve směrech os x a z).

Na základě předchozích výsledků byl sestaven zjednodušený 2D model (viz Obr. 36 f)) a byl konvergován z hlediska výpočetní sítě a velikosti výpočetní oblasti na velikost energie. Tato geometrie zjednodušeně odpovídá modelu na Obr. 34.

Dále byly zkoušeny různé kombinace směrů magnetických indukcí magnetů na jezdcí a hledána byla taková, která by splňovala následující kritéria:

- při umístění magnetu aktuátoru do středu mezi magnety jezdce působí na aktuátor minimální síly, resp. je tato poloha pro aktuátor stabilní,
- při vychýlení aktuátoru vůči jezdcí dochází k vývinu takových sil, které posouvají aktuátor zpět do stabilní polohy.



Obrázek 36: Zjednodušené geometrie jednotlivých modelů.

Matematický model byl počítán v následujících polohách aktuátoru a jezdce:

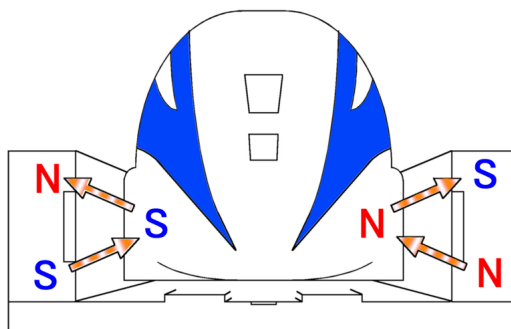
- aktuátor vystředěn mezi magnety jezdce,
- aktuátor vychýlen vpravo vzhůru,
- aktuátor vychýlen vlevo dolů.

Pokud některá z topologií splňovala tyto tři základní požadavky, byly počítány posuny s přesnějším krokem.

Výsledky následujících kombinací poloh aktuátoru a směrů magnetických indukcí magnetů na jezdci byly vyhodnoceny pomocí programu *Matlab*. Z nich vyšlo, že žádná z počítaných kombinací nespĺňuje všechny 3 výše zmíněné požadavky. Proto byly řešeny další zmíněné topologie.

Další způsob uložení magnetů vycházel z topologie magnetů u vlaků Maglev. Následující matematický model vycházel z Obr. 37. Na polovině jezdce by byly uloženy 2 magnety, které by magnet na desce aktuátoru odpuzovaly (viz Obr. 36 a).

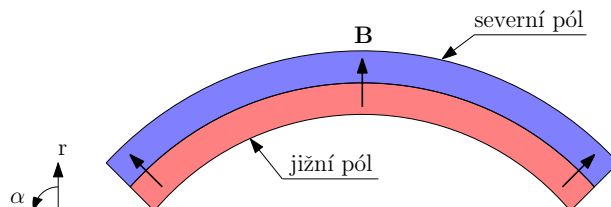
Výsledky této možnosti jsou ovšem takové, že při přiblížení magnetu aktuátoru blíže k magnetům na jezdci způsobí značnou sílu, která bude magnet na aktuátoru vtahovat mezi magnety jezdce - jedná se tedy o nestabilní uspořádání.



Obrázek 37: Zjednodušené magnetické vedení vlaku Maglev [33].

Dále byl sestaven matematický model, který se zabýval možností s třemi magnety na každé straně jezdce (viz Obr. 36 b) c) e)). Magnet na jezdci umístěný ve stejné rovině jako magnet na aktuátoru by měl sloužit k zabránění efektu vtahování, který mohl být pozorován u předchozí geometrie. V tomto případě však na základě výsledků získaných na polovině celého uspořádání není zřejmé, zda je tato myšlenka vhodná. Z tohoto důvodu byl vytvořen model s celým aktuátorem i jezdce. Ani výsledky těchto modelů nebyly příznivé.

U geometrie dle Obr. 36 i), resp. 38 byla myšlenka stabilizovat DPS lineárního aktuátoru pomocí úhlových magnetů na robotu. Tento způsob by vedl ke složitější konstrukci jezdce. Rozměry jsem zvolil dle běžně komerčně dostupných magnetů. Při vychýlení magnetu však dochází opět k opuštění klidové polohy, toto uspořádání je tedy opět nestabilní.



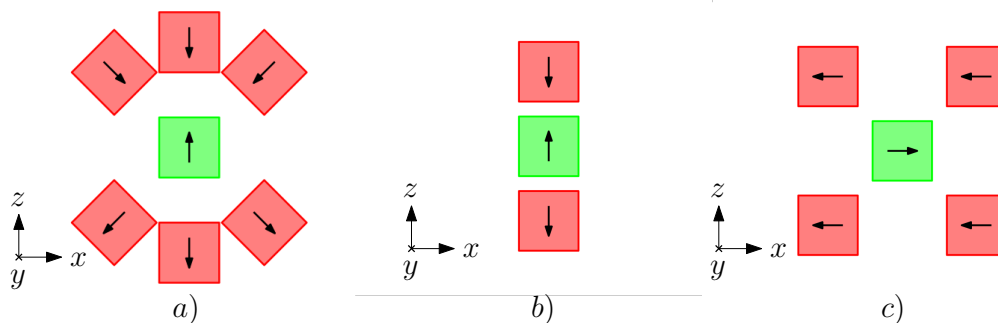
Obrázek 38: Úhlový magnet.

Další zkoumaný model vychází z Obr. 36 b) se třemi magnety popsanému výše v textu. Liší se tím, že v tomto případě je uvažována celá geometrie jezdce i aktuátoru (nejen polovina geometrie). Závěr vyvozený z daného uspořádání je následující: tato geometrie magnetů jako jediná splňuje požadavky na síly při vychýlení jezdce, resp. aktuátoru, tedy že při vychýlení desky aktuátoru v kladném směru osy x dochází k vývinu síly se směrem přesně opačným. Při prozkoumání více bodů je však výsledek nepříznivý, při současném vychýlení jezdce v ose x i z již stabilizující magnety mají destabilizační účinek. Toto zjištění vedlo k rozdělení stabilizační funkce pro obě osy zvlášť. Zmíněný způsob by byl aplikován na aktuátoru typu H (viz kapitola 3).

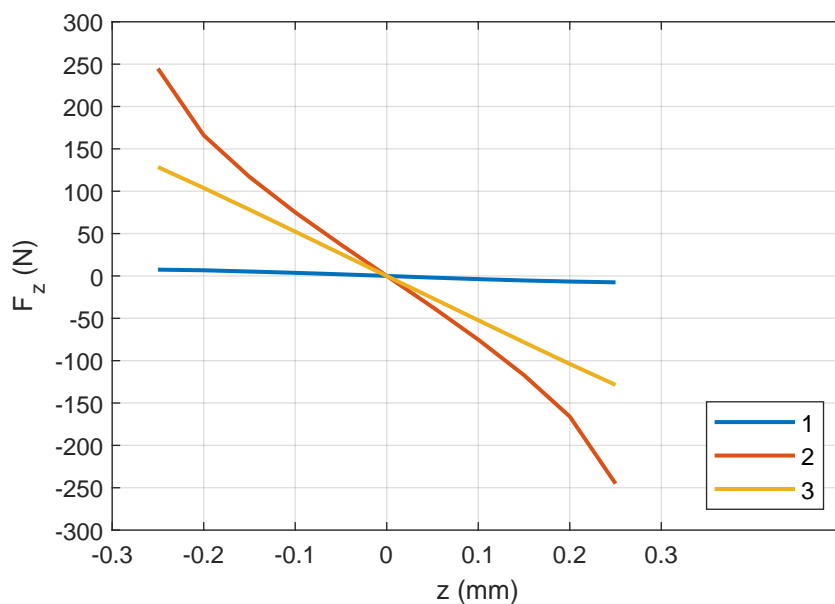
Další myšlenkou bylo rozdělit stabilizační funkce pro osy x a z . Tato myšlenka byla aplikována na matematický model spjatý s modelem lineárního aktuátoru typu H . Výsledky tohoto modelu ovšem také nejsou pro současné vychýlení v ose x a z příznivé. Proto byla dále zkoušena myšlenka s takovým uspořádáním magnetů, které by co nejlépe upravilo průběh magnetického pole kolem magnetů na aktuátoru, aby nedocházelo k výše zmíněným problémům.

Tímto uspořádáním by byla topologie s pěti magnety na aktuátoru (při uvažování poloviny jezdce) - viz Obr. 36 h). Výpočty byly provedeny jak pro polovinu, tak pro celý aktuátor. Ve výsledcích se opět ukázaly nedostatky předchozích uspořádání, tedy neschopnost udržet stabilní polohu. Proto se tedy další výpočty soustředily na magnetickou stabilizaci pouze v jedné ose, zatímco druhá osa bude stabilizována mechanicky.

Z předchozích modelů byly vygenerovány výsledky pro posun pouze v jedné ose (ose z) a následně z nich byly vybrány 3 nejvhodnější řešení - příslušné geometrie jsou zobrazeny na Obr. 39.



Obrázek 39: Zjednodušené geometrie vybraných modelů.



Obrázek 40: Průběh síly F_z v závislosti na posunu v ose z pro vybraná uspořádání.

3 Lineární aktuátor

Tato kapitola se zabývá návrhem a výrobou prototypů lineárních aktuátorů. Dále je představena řídicí elektronika i řídicí kód. Kompletní schémata navržených aktuátorů a řídicí elektroniky jsou umístěna do části 5 na konci práce.

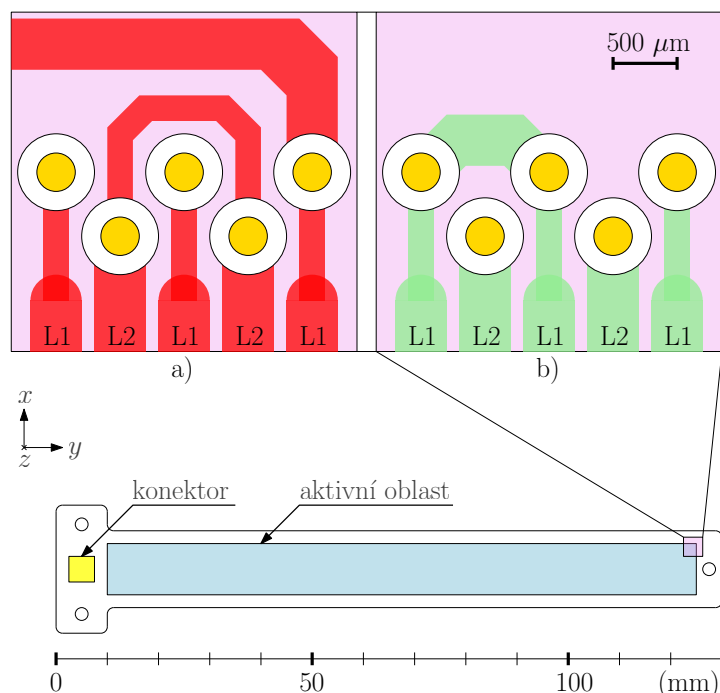
3.1 Návrh aktuátoru

Návrh lineárního aktuátoru vycházel z uspořádání aktuačních cívek na prototypu *Gryllus 2* [2]. Základní princip pohybu by si teoreticky vystačil s jednou vrstvou DPS pro uložení cívek, avšak právě nutnost prostorového střídání závitů dvou cívek stanovila jako minimální počet vrstev DPS právě dvě. Detail vinutí aktuátoru je naznačen na Obr. 41. Obě cívky jsou koplanárně vedeny od konektoru se zmíněným střídáním, poté se vrací přímou cestou podél pracovní plochy na konektor. Aby bylo možno využít i druhou stranu aktuátoru pro tvorbu pohybové síly, jsou pomocí prokův závitů cívky vedeny do obou vrstev DPS.

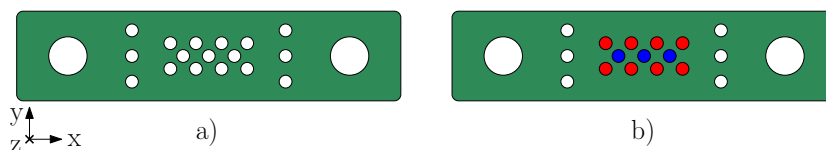
Tabulka 6: Rozměry aktuátoru typu *I* - viz dále.

parametr	hodnota
šířka vodiče	0,4 mm
výška vodiče	35 μm
šířka mezery	0,1 mm
šířka aktuátoru	14 mm
délka aktuátoru	130,5 mm
délka polohovací oblasti	113 mm

Jezdec pro aktuátor vycházel z uspořádání minirobotů pro platformy *TIP*. Původní robot je tvořen z 5 permanentních magnetů. Robot/jezdec navržený pro aktuátor typu *I* je zobrazen na Obr. 42. Jedna deska jezdece, která je standardní DPS, nese 11 permanentních magnetů, tedy celý jezdec je tvořen 22 permanentními magnety, které mají za účel interagovat s magnetickým polem od cívek - utvářet tedy pohyb jezdece. Dále bylo při výrobě desek jezdců počítáno s možností instalace pomocných permanentních magnetů, který by zajišťovaly magnetické vedení, tedy vystředění jezdece vůči aktuátoru. Obě desky tvořící jezdec jsou spojeny pomocí plastových šroubů M3 zajištěných maticemi. Matice také slouží k udržení konstantní vzdálenosti mezi oběma deskami jezdece.



Obrázek 41: Geometrie lineárního aktuátoru typu *I*: a) pohled do TOP vrstvy DPS, b) pohled do BOT vrstvy DPS.



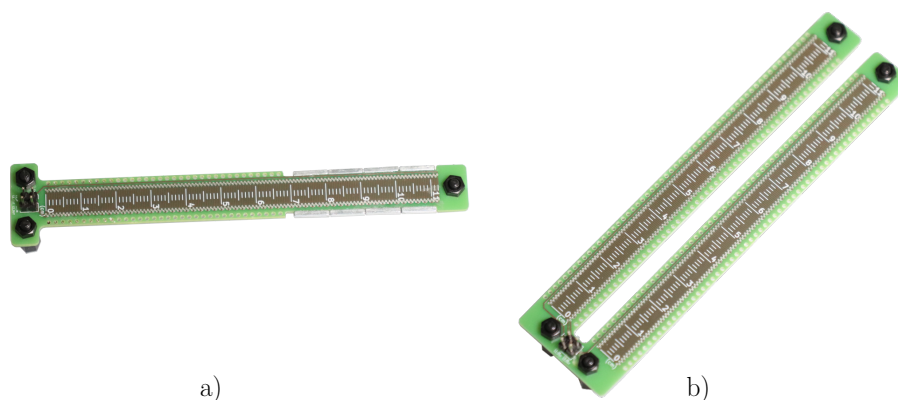
Obrázek 42: Jezdec lineárního aktuátoru typu *I*: a) uprostřed jsou otvory pro 11 permanentních magnetů, které slouží k tvorbě pohybu. Po stranách jsou velké díry pro spojení obou desek jezdce šrouby. Mezi těmito prvky jsou sloupce tří děr, ty slouží pro uložení magnetů pro magnetické vedení. V části b) je naznačena orientace válcových magnetů - červeně je magnetická indukce ve směru osy *z*, modře magnety s opačným směrem magnetické indukce.

3.2 Prototypy aktuátorů

Výsledkem návrhu byla uspořádání aktuátoru a jezdce dvou typů, typu *I* a typu *H* (viz Obr. 43). Většina dalších experimentů byla realizována na prototypu typu *I* (viz Obr. 43 a)). Elektrické parametry obou prototypů jsou shrnuty v Tab. 7 a 8. Indukčnost cívek byla měřena při 1 kHz přístrojem KEYSIGHT U1733C.

Tabulka 7: Činný odpor a indukčnost cívek - aktuátor typu *I*.

cívka	R (Ω)		L (μH)	
	bez konektoru	s konektorem	bez konektoru	s konektorem
L1	1,318	1,733	2,54	1,24
L2	1,305	1,754	2,56	1,22



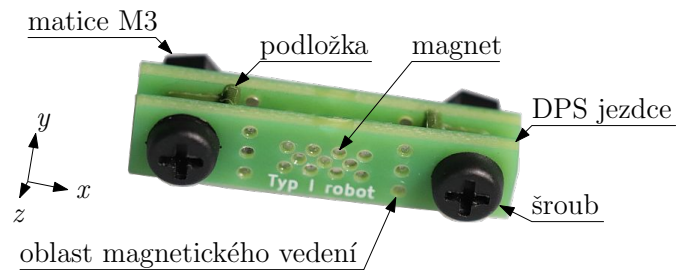
Obrázek 43: Prototypy a) typ I , b) typ H .

Tabulka 8: Činný odpor a indukčnost cívek - aktuátor typu H .

cívka	R (Ω)		L (μH)	
	bez konektoru	s konektorem	bez konektoru	s konektorem
L1	0,692	1,074	2,34	1,00
L2	0,685	1,078	2,35	1,00

Po prvotních experimentech bylo zjištěno, že jezdec není ve většině případů schopen udržet při jízdě přímý směr - po ujetí několika milimetrů docházelo k mírnému vybočení robotu z přímého směru, což vedlo k jeho zastavení. Dále bylo nutné použít velké proudy (cca 2,5 A), aby se robot začal pohybovat. Problém s neudržením přímého směru by mohl být řešen následujícími způsoby:

- magnetické vedení - na DPS aktuátoru a robota by byly nalepeny permanentní magnety, které mají za úkol snížit mechanické tření a udržet robota v přímém směru pomocí magnetického pole.
- diamagnetický materiál - použití diamagnetického materiálu by snížilo mechanické tření, a tím pravděpodobnost vychýlení jezdce,
- mechanická podložka - byla vytištěna na 3D tiskárně tak, aby zaručila mechanicky přímý směr pohybu robota a zároveň snížila hmotnost robota,
- možnosti snižování hmotnosti jezdce - pomocí váhy byly zjištěny hmotnosti jednotlivých částí jezdce, které jsou shrnuty v Tab. 9. Z ní je patrné, že většinu hmotnosti jezdce tvoří DPS jezdce, dále by bylo možno snížit hmotnost jezdce tím, že místo spojení obou desek jezdce pomocí šroubů by došlo k jejich slepení s rozpěrnými podložkami/maticemi,
- použitím techniky *rail*. Aktuátor by byl navržen s další cívkou (vinutou ve směru pohybu), která by při pohybu jezdce byla celou dobu sepnutá. Tím by svým stacionárním magnetickým polem neumožňovala vychýlení robota [34].



Obrázek 44: Jezdec pro aktuátor typu I.

Tabulka 9: Hmotnosti vybraných částí jezdcce pro aktuátor typu I - viz Obr. 42.

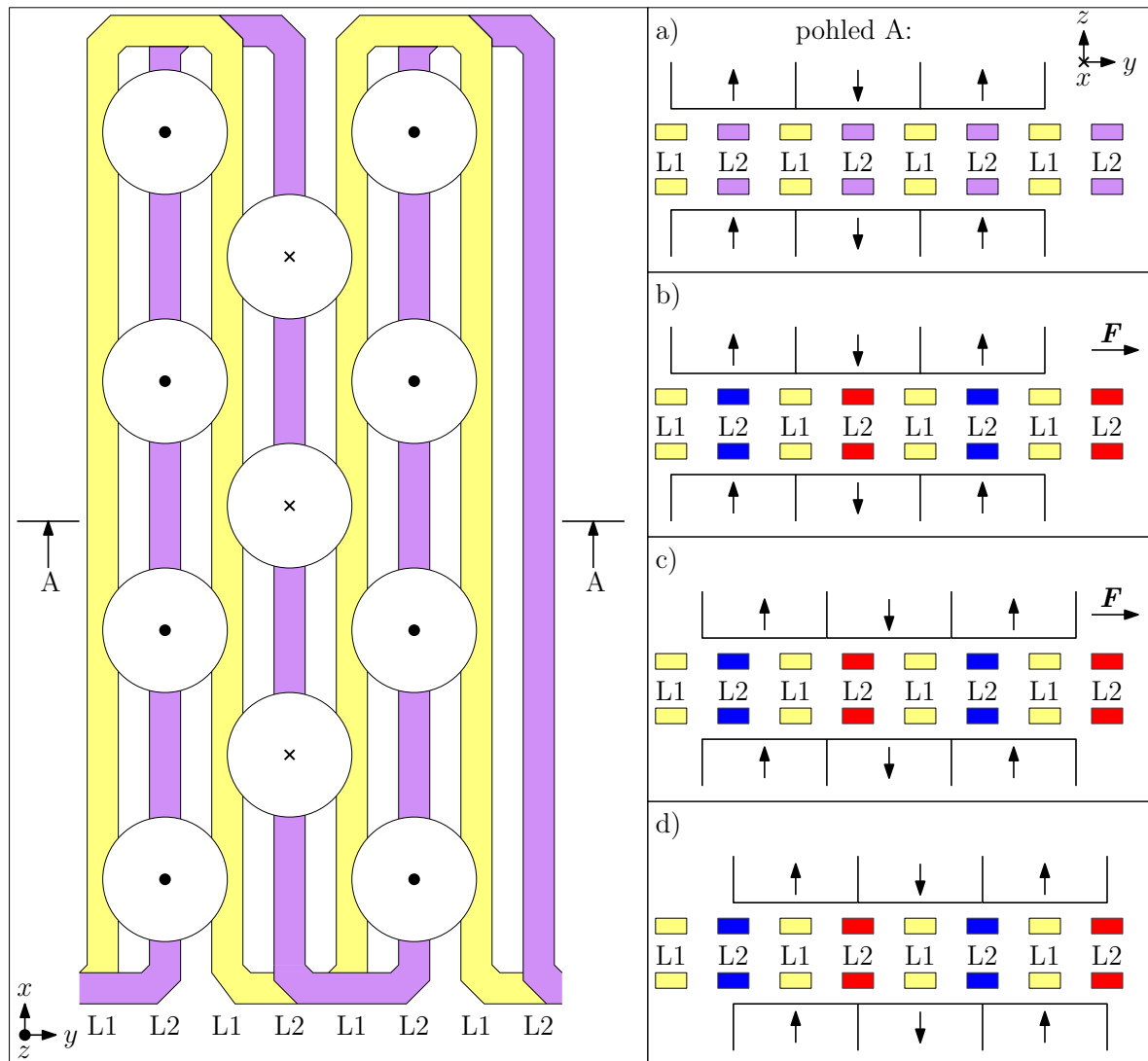
měřené těleso	m (mg)
magnet válcový (výška i průměr 1 mm)	6
magnet kvádrový 1,5 × 1,5 × 10 mm	170
podložka 3D tisk	48
matice M3 plastová	56
šroub M3 plastový	110
neosazená DPS jezdcce	505
osazená DPS jezdcce	555
osazená DPS jezdcce, mag. vedení	597
celý jezdec, mag. vedení, bez šroubů (lepené)	1283
celý robot, mag. vedení, spojeno šrouby	1630

Pro plynulý pohyb jezdcce po aktuátoru je nutno vhodně spínat jednotlivé cívky. Spínací sekvence je naznačena v Tab. 10. Při použití dané sekvence (S1-S4) dojde k posunu jezdcce o 2 mm, vzdálenost uražená při jednom kroku je 0,5 mm (odpovídá rozteči cívek).

Tabulka 10: Spínací sekvence.

krok sekvence	cívka	směr proudu
S1	L1	kladný
S2	L2	kladný
S3	L1	záporný
S4	L2	záporný

Jeden krok pohybu jezdcce je zobrazen na Obr. 45. V levé části obrázku je pohled shora na aktuátor s jezdcem. Směr magnetické indukce permanentních magnetů na jezdcce je značen pomocí tečky (směr v ose z) nebo křížku (záporný směr osy z). Vpravo je ukázána jedna část spínací sekvence (+L2). V části a) je pohled A. V části b) dojde k sepnutí cívky L2. Křížek značí proud do obrázku, tečka směr proudu opačný. Vlivem silového působení mezi magnetickým polem kolem cívek a magnetickým polem permanentních magnetů dojde k posunu jezdcce vpravo, což naznačují části obrázku c), resp. d), kde jezdec dosáhne klidové polohy.



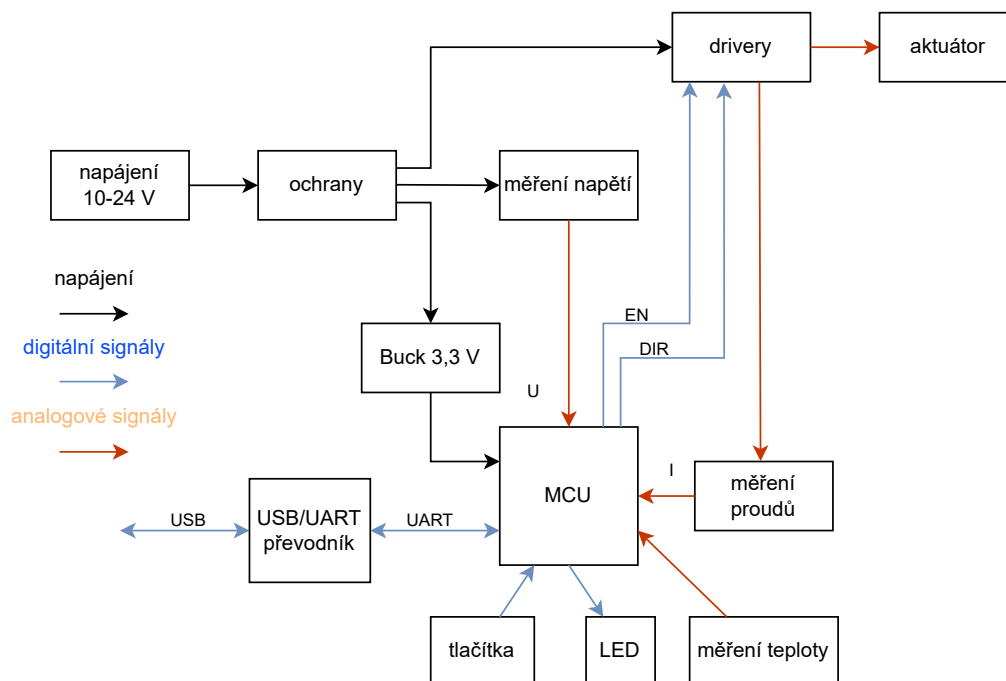
Obrázek 45: Princip pohybu lineárního aktuátoru. Žlutě a fialově jsou obarveny cívky, kterými neteče proud, ty protékané proudem jsou červené či modré. V levé části obrázku jsou zobrazeny válcové magnety s naznačeným směrem magnetické indukce: tečka značí směr v ose z , křížky ve směru opačném. V pravé části obrázku je naznačen posun jezdce o jeden krok ve směru osy y . Modrou barvou jsou označeny proudy tekoucí v kladném směru osy x , ve vodičích označených červeně tečou proudy opačně.

3.3 Řídicí elektronika

Řídicí elektronika byla navržena s cílem ovládat pohyb jezdc lineárního aktuátoru. V této podkapitole je představeno navržené schéma řídicí elektroniky a popsána vyrobená DPS. Grafické výstupy z návrhu elektroniky jsou zobrazeny v kapitole 5.

Návrh

Blokové schéma řídicí elektroniky je zobrazeno na Obr. 46. Systém bude napájen ze zdroje stejnosměrného napětí o velikosti 10 až 24 V. Toto napětí bude napájet drivery. Ty budou spínat cívky lineárního aktuátoru. Řídicí signály bude vysílat MCU. Ten má své provozní napětí nižší, než bude napájecí napětí. Pro úpravu napětí pro MCU bude sloužit pulzní měnič pro snižování napětí. MCU bude také vyhodnocovat naměřené hodnoty napětí, proudů a teploty. Komunikace s PC bude zajištěna pomocí UART, resp. USB. Vybrané použité integrované obvody jsou vypsané v Tab. 11.



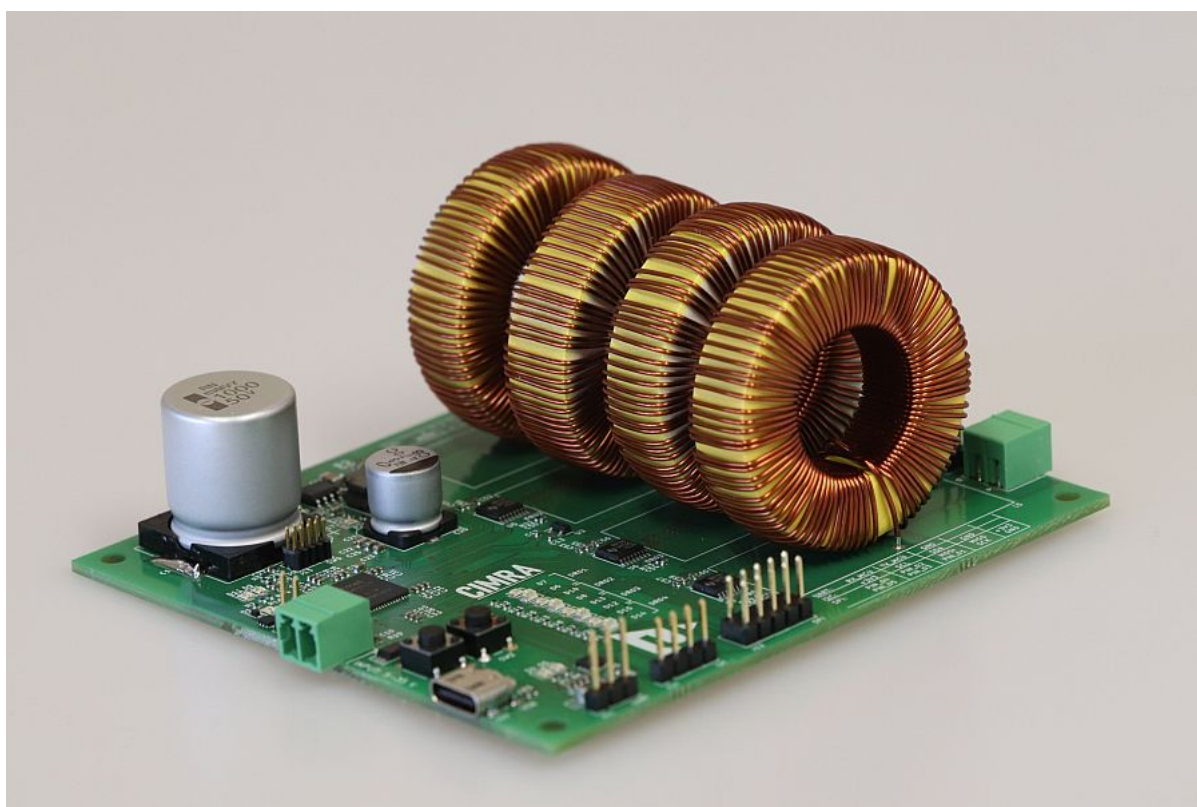
Obrázek 46: Blokové schéma řídicí elektroniky.

DPS

Navržená deska byla vyrobena jako dvouvrstvá. Součástky jsou osazeny jen z jedné strany. Rozměry DPS jsou $93 \times 103 \times 1,5$ mm, rozteče děr pro upevnění pomocí šroubů M3 jsou 85×95 mm. Výkresy DPS jsou ukázány v kapitole 5, fotografie řídicí elektroniky je na Obr. 47.

Tabulka 11: Přehled vybraných integrovaných obvodů.

název součástky	výrobce	označení
MCU	Microchip Technology	ATSAME51J18A-A
driver	Texas Instruments	DRV8876
pulzní měnič pro snižování napětí	Diodes Incorporated	AP5004SG-13
převodník UART/USB	Silicon Labs	CP2102N-A02-GQFN20
teplotní senzor	Texas Instruments	TMP236AQDBZRQ1



Obrázek 47: Řídicí elektronika.

MCU

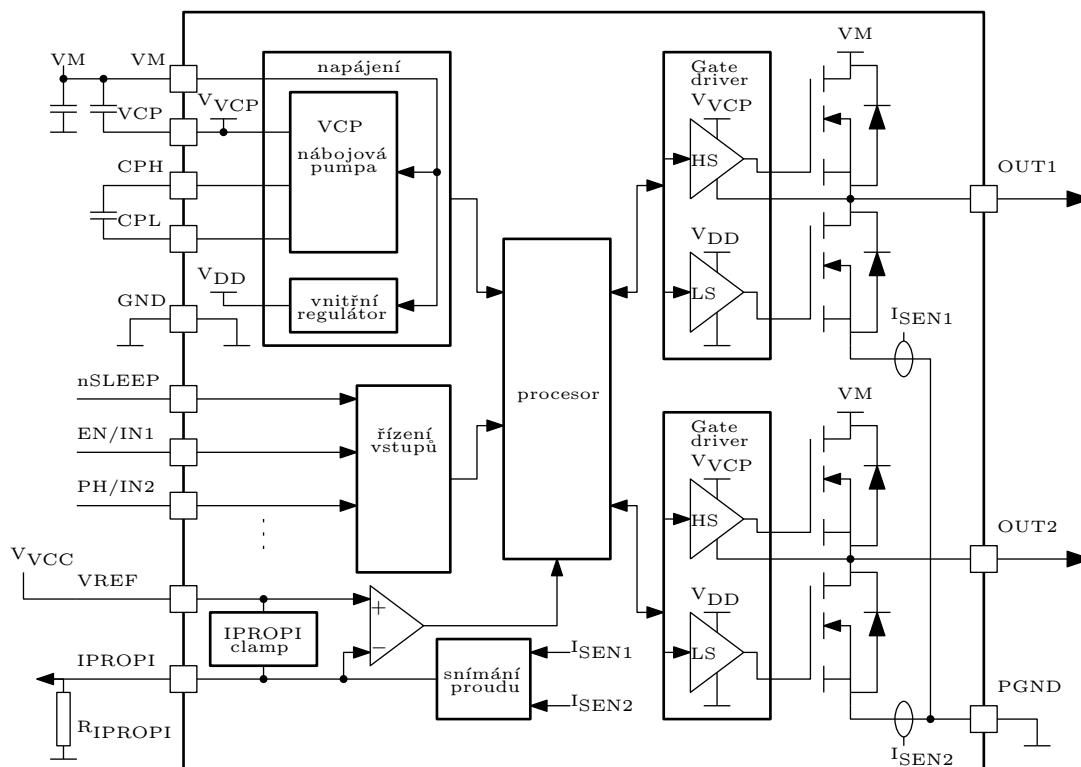
Pro řídicí elektroniku byl zvolen MCU od Microchip typu ATSAME53J18A v 64pinovém pouzdře VQFN s FPU. Je tvořen procesorem ARM Cortex M4F. Taktovací frekvence tohoto integrovaného obvodu je až 120 MHz. Dále jsou k dispozici dva 16kanálové A/D převodníky a dva 2kanálové D/A převodníky s rozlišením 12 bitů a 51 GPIO [35]. Z možností komunikace bylo v návrhu počítáno s následujícími sběrnicemi:

- USART (komunikace s PC),
- SPI,
- I²C,
- SWD (programování MCU).

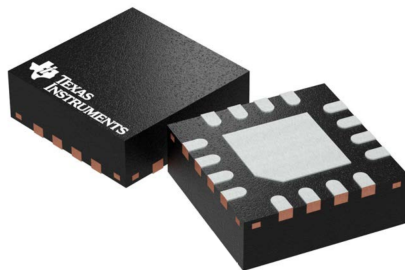
Driver

Driver byl zvolen od firmy Texas Instruments s označením DRV8876. Tento driver patří do rodiny driverů pro řízení motorů v různých použitích. Rozsah pracovních napětí driverů je 4,5 V až 37 V, maximální výstupní proud je 3,5 A. Blokové schéma driveru je na Obr. 48. Integrovaný obvod je tvořen tranzistory MOSFET s N-kanály v můstkovém zapojení, regulátorem nábojové pumpy, snímáním (I_{SEN1} , I_{SEN2}) a regulací proudu (V_{REF}), doporučením proudovým výstupem (IPROPI) a obvody ochran. Nábojová pumpa zlepšuje účinnost driverů, neboť umožňuje plné otevření horních i dolních tranzistorů [36].

Neboť cívky lineárního aktuátoru mají velmi malou indukčnost - viz Tab. 7 a 8, bylo nutné přidat další cívky na výstup driverů - byly použity cívky o indukčnosti $L = 470 \mu\text{H}$. Driver obsahuje integrovanou regulaci proudu, která se nastavuje referenčním napětím z D/A převodníku MCU. Další vlastností tohoto driveru je možnost měření proudu, měřenou hodnotu může mikrokontrolér následně číst [36].



Obrázek 48: Zjednodušené blokové schéma driveru [36].



Obrázek 49: Driver DRV8876 od Texas Instruments [36].

Snižovací pulzní měnič napětí

Ve funkci pulzního snižovacího měniče napětí je použit integrovaný obvod AP5004 od Diodes Incorporated a Schottkyho dioda v SMD provedení. Obvod AP5004 je uložen v pouzdře SOP-8L. Vstupní napětí měniče je v rozmezí od 10 do 32 V. Pomocí napěťového děliče ve zpětné vazbě měniče je nastaveno výstupní napětí na hodnotu 3,3 V, což odpovídá napájecímu napětí pro MCU. Spínacím prvkem je MOSFET tranzistor s N-kanálem, který je řízen pomocí PWM. Typická spínací frekvence obvodu je 300 kHz, v případě vybavení nadproudové ochrany je 50 kHz. Další ochranou integrovaného obvodu je teplotní ochrana.

Převodník UART/USB

Pro správnou funkci komunikace mezi MCU a PC byl použit převodník UART/USB. Pro tuto potřebu byl využit integrovaný obvod CP2102N od Silicon Labs v 20pinovém pouzdře QFN. Ten obsahuje vlastní integrované hodiny a rychlost přenosu dat mezi 300 baud až 3 Mbaud. Dále byly na GPIO připojeny LED pro signalizaci přenosu dat.

Oživování

Po očištění DPS byla na ni nanášena s pomocí šablony pájecí pasta, do které byly osazovány součástky SMD pomocí ruční osazovačky. Po průchodu pecí došlo k připájení součástek. Některé spoje bylo nutno pomocí ruční páječky upravit tak, aby nebyly nevhodně zkratovány. Dále byly osazeny konektory a výstupní indukčnosti. Obrázky DPS jsou přiloženy v části 5.

Při prvním připojení na napětí 12 V došlo k rozsvícení LED, která signalizuje napětí na vstupu, ale nerozsvítila se LED signalizující napětí 3,3 V pro MCU. Po kontrole bylo zjištěno, že ve schématu byly nesprávně zapojeny rezistory v napěťovém děliči pro zpětnou vazbu snižovacímu měnič napětí. Po jejich přepájení ovšem docházelo k přechodu snižovacího pulzního měniče k přechodu do stavu nadproudové ochrany - dle spínací frekvence měniče. Při následné kontrole součástek u měniče byla odhalena chyba, která spočívala v nesprávné hodnotě kapacity kondenzátoru, který napájí budič tranzistoru měniče. Protože byl tisíckrát menší než předepisovaný výrobcem, tak se tranzistor neotvíral správně, a proto měnič spadl do režimu nadproudové ochrany.

3.4 Popis řídicího kódu

Pro správný sled spínacích sekvencí je využita výše zmíněná řídicí elektronika. Zde se vycházelo z firmware, který je univerzální pro *TIP* a který byl navrhnut v rámci bakalářské práce [2]. Jedná se o objektově orientovaný firmware v jazyce C++, který pomocí dědičnosti a šablon obsahuje základní implementaci řídicích struktur a algoritmů, která je sdílená mezi různými řídicími elektronikami. U každého zařízení je pouze potřeba nastavit ovládací piny pro jednotlivé cívky a případně implementovat funkce, které ostatní zařízení nemají. Pro ovládání je využito tzv. G-kódů a M-kódu (viz Tab. 12), pomocí nichž je ovlivňován pohyb robotů na desce, resp. jezdce na aktuátoru. Kódy jsou přenášeny sériovou komunikací.

Tabulka 12: Soupis vybraných G-kódů a M-kódů.

G-kód/M-kód	význam
G0 Y50	pohyb jezdce v ose y o 50 kroků
G0 Y-100	pohyb jezdce v záporném směru osy y o 100 kroků
M5 C500	nastavení proudu v sepnutém stavu na 500 mA
M9 20	nastavení rychlosti na $t_s = 20$ ms
?	odpovědí je verze firmwaru a název zařízení

Celý kód lze rozdělit do několika částí, jež budou postupně popisovány: nastavení cívek, moduly, komunikace a časování.

Základní třídou části ovládání cívek je třída `Coil_pair`. Tato třída obsahuje pozici v sekvenci, v jaké byly naposledy sepnuty cívky, směr, kterým mohou cívky robotem pohybovat, a piny cívek, které zajišťují daný pohyb. Daná třída obsahuje informace o směru pohybu pomocí výčtové třídy `Direction`. Spínání cívek je závislé na použitých H-můstcích. Proto byla implementována abstraktní třída `H_bridge`, z níž dědí třída H-můstků `L298N` a `Motor_Shield`. Správný datový typ pro instanci H-můstku k dané cívce je určen šablonovým parametrem třídy `Coil_pair`. Z třídy `Coil_pair` dědí třídy `Actuation_coil` a `Freezing_coil`, které slouží k určení funkce dané dvojice cívek. [2]

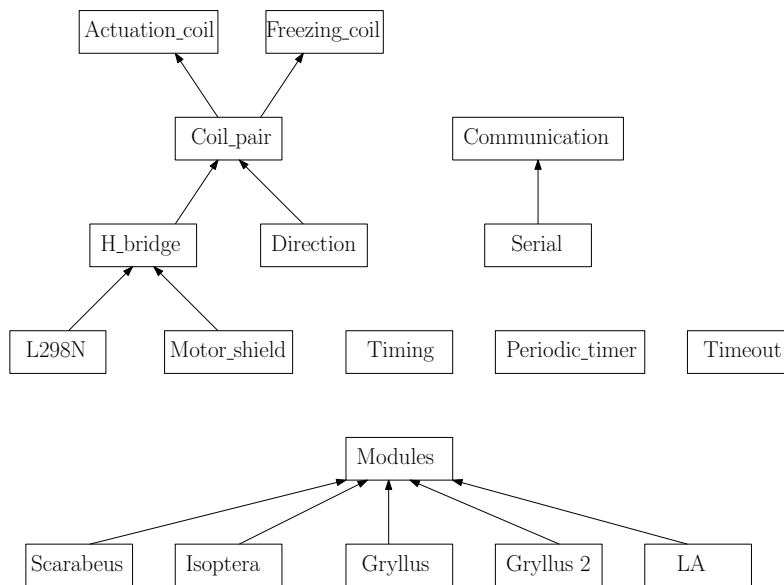
Třída `Modules` v sobě obsahuje instance jednotlivých cívek, proměnné a metody společné pro všechna experimentální zařízení. Ty jsou následně používány či individuálně implementovány ve třídách a dědí od třídy `Modules` - např. `Scarabeus`, `Isoptera`, `Gryllus`, `Gryllus 2` a `LA` (lineární aktuátor).

Třída `Communication` slouží k ovládání experimentálního zařízení. Pro umožnění různých způsobů ovládání je komunikace s ovládacím zařízením implementována až ve třídách, které z ní dědí. Naprogramována byla také třída `Serial`, která umožňuje komunikaci s počítačem přes sériový port. Firmware je tak připraven i na implementaci tříd pro ovládání.

Třídy `Timing`, `Periodic_timer` a `Timeout` slouží k práci s časem. Třída `Timing` je použita v metodě `Modules::step()`, jež slouží ke krokování robota. Třídou `Periodic_timer` je možno použít pro periodické spínání nějaké sekvence. Třída `Timeout` může být použita pro vykonání příkazu po zadaném čase, tedy s určitým zpožděním. Všechny tyto třídy využívají proměn-

nou `ms_timer::time`, která je inkrementována v přerušení od čítače/časovače TC0 každou milisekundu. V tomto přerušení je také volána metoda `Modules::step()`, která řídí časování spínací sekvence cívek. Tím je dána teoretická maximální rychlost robota, kdy nejkratší interval mezi kroky může být 1 ms.

Dále je zmíněn popis třídy `Modules`. Ta obsahuje pole aktuačních a mrazicích cívek, jež je inicializováno v konstruktorech tříd samotných zařízení. Mrazení pohybu u navrženého aktuátoru není využito. Dále zde jsou proměnné pro časování a rychlost v osách x a y - v případě lineárního aktuátoru je využito pouze pohybu ve směru osy y . Třída obsahuje metodu `move()` v různých modifikacích (u některých je možno zadat pouze vzdálenost, u dalších i rychlost pohybu, popř. rychlost pohybu pro každou osu zvlášť). Následně jsou všem cívkám třídy `Actuation_coil` dle směru nastaveny parametry pohybu (vzdálenost, o kterou se má minirobot/jezdec posunout). V metodě `step()` je řešeno časování a vykonávání spínací sekvence pro aktuační a mrazicí cívky dle nastavených parametrů vzdálenosti, rychlosti a aktivovaných mrazicích cívek [2].



Obrázek 50: Zjednodušený UML diagram.

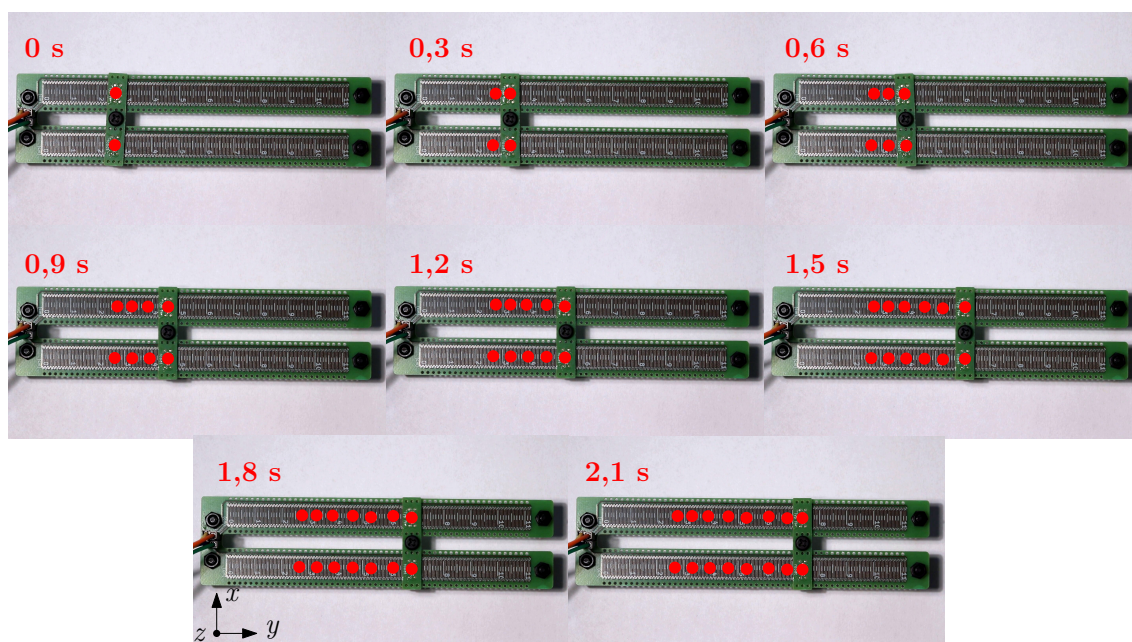
V rámci diplomové práce byla přidána nová platforma `lae` s deskou `simple_2_coils`. V kódu bylo upraveno v generátoru konfigurace projektu `CMake`, aby podporoval novou platformu. Dále byla vytvořena nová instance tříd `lae` a `simple_2_coils`, která dědí z třídy `Modules`. Dále byla upravena sériová komunikace s převodníkem UART/USB, jelikož jsou pro ni použity jiné piny než u předchozích platform. Naprogramován byl D/A převodník mikrokontroléru, aby bylo možné zadávat velikosti proudu cívkami pomocí G-kódu.

4 Experimenty

V rámci experimentů byl zkoušen pohyb jezdců na obou navržených prototypech, dále se experimenty věnovaly vyzkoušení jednotlivých způsobů snížení tření a zvýšení přesnosti polohování. V neposlední řadě byly experimentálně ověřeny limitní zatížení jezdců, průběhy proudů generovaných řídicí elektronikou a také limitní rychlosti spínání cívek (pro plynulý pohyb jezdců).

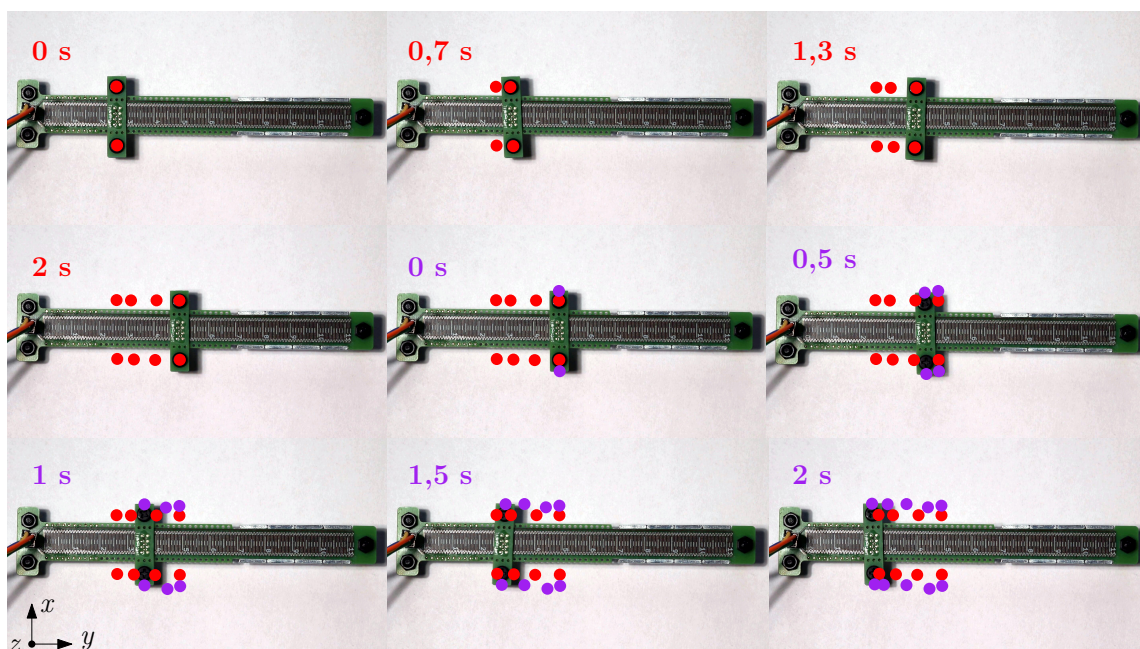
4.1 Mechanické vedení

Základní pohyb jezdců byl proveden jak u prototypu *I*, tak u prototypu *H*. U prototypu *H* bylo při napětí 16 V zkoušeno měnit proudy cívkami aktuátoru, dokud se jezdec nedal do pohybu. Pokusy začaly s hodnotou proudu 0,5 A a dále byl o stejnou hodnotu zvětšován. Jezdec se začal pohybovat při hodnotě proudu 1 A. Zobrazení průběhu experimentu lze sledovat na Obr. 51. Obdobně bylo postupováno u prototypu *I*, kde se pokusy zastavily u minimální hodnoty proudu 1,5 A. Zobrazení průběhu jízdy jezdců je na Obr. 52.

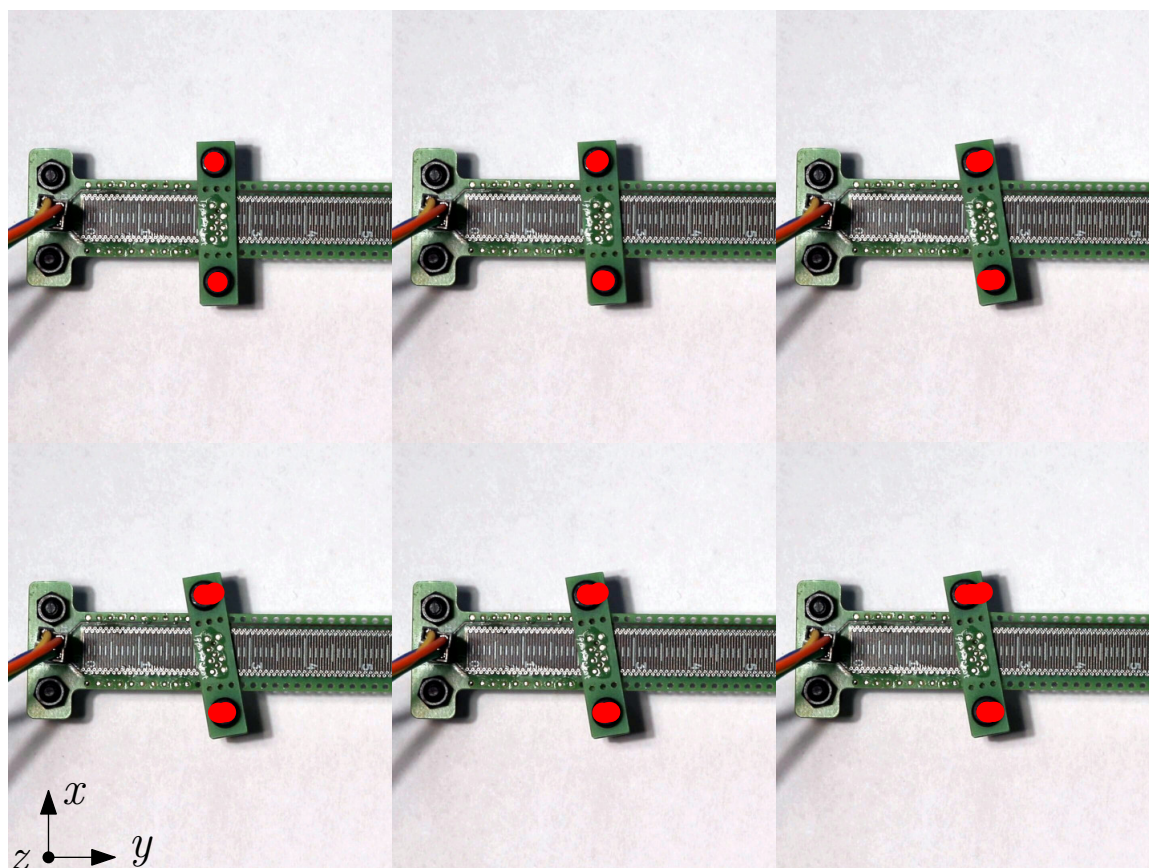


Obrázek 51: Pohyb jezdců na aktuátoru typu *H*.

Nezávisle na velikosti proudu protékajícího cívkami se během experimentů stávalo, že se jezdec natočil vůči cívkám natolik, že některé magnety jezdců nepřispívaly silou k pohybu v požadovaném směru a jezdec nemohl pokračovat v pohybu. Tato chyba musela být řešena vnějším zásahem obsluhy, tedy opětovným srovnáním jezdců. Ukázka takového případu je na Obr. 53. Proto byly zkoumány možnosti omezení tohoto jevu.



Obrázek 52: Pohyb jezdce na aktuátoru typu I. Červeně naznačen pohyb ve směru osy y , fialově pohyb směrem opačným.



Obrázek 53: Vychýlení jezdce při spínání cívek pro pohyb v kladném směru osy y . Na obrázcích je zachyceno vychýlení jezdce během časového intervalu 1 s.

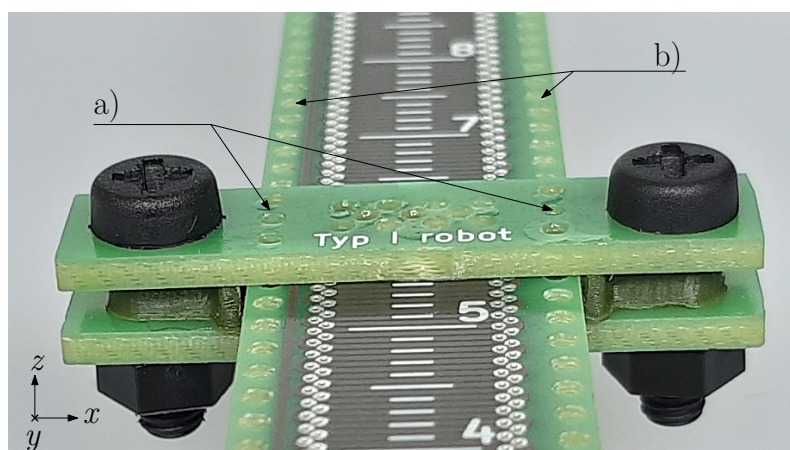
4.2 Použití diamagnetického materiálu

V rámci tohoto experimentu bylo cílem ověřit možnost levitace válcového permanentního magnetu na destičce pyrolitického uhlíku. Ten dosahuje relativní permeability $\mu_r = 0,9996$, čemuž odpovídá síla $F_z = 0,2$ mN pro mezeru 0,1 mm (viz Obr. 32). Daný materiál lze zakoupit s rozměry 20 x 20 x 1 mm, kde cena jednoho kusu je přibližně 600,- Kč. Při hmotnosti jednoho magnetu $m = 6$ mg (viz Tab. 9) působí na jeden magnet gravitační síla $F = m \cdot g = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 \doteq 59 \mu\text{N}$. Z předchozích výpočtů vyplývá, že mělo být možné diamagnetický materiál využít pro snížení tření, resp. levitaci magnetu. Při pokusech se ovšem nepodařilo tuto skutečnost potvrdit, proto nebyl pyrolitický uhlík pro výrobu aktuátoru využit.

4.3 Magnetické vedení

Na prototypu *I* bylo experimentálně zkušeno uspořádání magnetů (dle Obr. 36 c)) a mechanických zarážek, abych dosáhnul plynulého pohybu. Vyzkoušeny byly dva různé jezdcy (s kvádrovými a válcovými magnety na jezdcí) na dvou různých částech polohovací desky. Výsledky jsou následující:

- pro uspořádání válec-válec (jezdec-DPS) nebyl pohyb možný, protože magnety jezdcce se zastavily v mezerách mezi magnety DPS aktuátoru (viz Obr. 54),
- pro uspořádání válec-kvádr dojde ke statickému vychýlení jezdcce i bez spínání cívek, ikdyž jsem použil mechanické zarážky (podložky). Ačkoliv je mezera mezi aktuátorem a jezdcem ve směru osy x pouze cca 0,1 mm (vlivem nepřesnosti výroby matice na 3D tiskárně), dochází k vychýlení a nemožnosti dalšího pohybu.
- pro uspořádání kvádr-válec a kvádr-kvádr nebylo dosaženo při výrobě jezdcce takové přesnosti uložení magnetů, při kterém by nedošlo k vychýlení ve statickém stavu (bez spínání cívek).



Obrázek 54: Magnetické vedení na aktuátoru typu *I*: a) na jezdcí, b) na lineárním aktuátoru.

Pro ověření vlastností magnetického vedení by bylo vhodnější nechat vyrobit aktuátory, které by byly celé osazeny buď kvádrovými či pouze válcovými magnety.

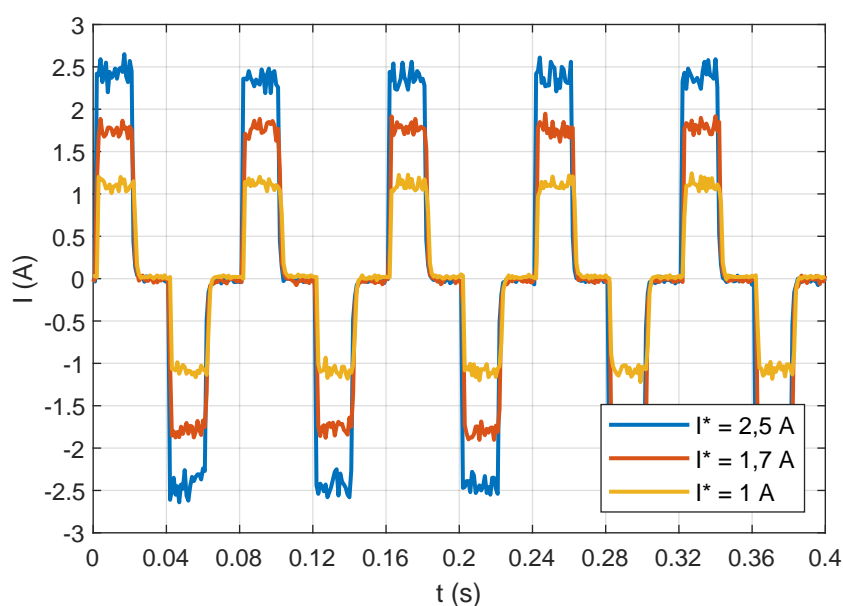
4.4 Limitní zatížení

Experimenty limitního zatížení jezdce byly prováděny jak u typu I , tak H . Celková hmotnost jezdce pro aktuátor I byla 1550 mg (2 DPS, 2 šrouby M3×19 mm, 4 matice M3, 22 permanentních magnetů - viz Tab. 9). Jezdec byl zatěžován po 100 mg, napětí zdroje bylo 22 V, doba sepnutí cívky 20 ms, nastavený proud 2,5 A. U zátěže 400 mg docházelo ke značné chybovosti pohybu, pro zatížení 500 mg se jezdec pouze třásl na místě.

Pro aktuátor typu H bylo postupováno obdobně. Celková hmotnost jezdce byla 1600 mg (2 DPS, 44 permanentních magnetů, 1 šroub M3×19 mm, 2 matice M3). Výsledek byl totožný s předchozím, tedy při zatížení 400 mg byl již pohyb velmi závislý na vycentrování jezdce na aktuátoru.

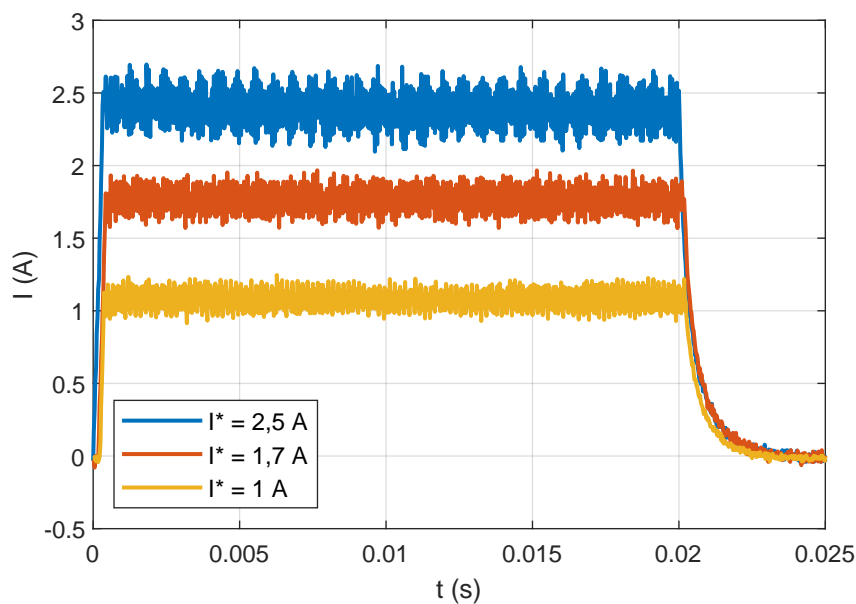
4.5 Nastavování velikosti proudu a rychlosti

Další z experimentů se zaměřil na možnosti nastavování proudů pomocí příkazů z počítače pomocí M-kódů. Nastavovány byly touto cestou velikosti proudů na hodnoty 1 A, 1,7 A a 2,5 A. Dále byl zadáván požadavek na posun o 20 kroků. Průběhy proudu jednou cívkou byly zaznamenány pomocí proudové sondy na osciloskopu. Citlivost proudové sondy byla nastavena na 100 mV/A. Napětí zdroje bylo 22 V, doba sepnutí cívky 20 ms. Příslušné průběhy pro jednu cívku jsou zobrazeny níže (Obr. 55 a 56). Proud tekoucí druhou cívkou je časově posunutý o 20 ms.



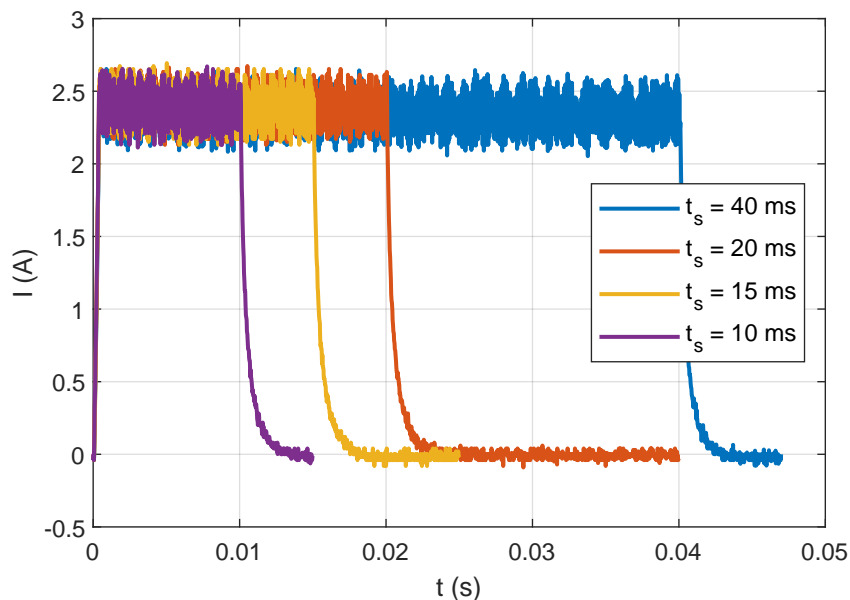
Obrázek 55: Průběh proudů jednou cívkou pro různé hodnoty požadavků.

V dalším experimentu byly zkoušeny různé doby sepnutí cívky, resp. různé rychlosti pohybu



Obrázek 56: Průběh proudů pro různé hodnoty požadavků - pohled na jeden peak.

jezdce. Experiment byl proveden pouze u aktuátoru typu I . Průběhy proudu pro různé doby sepnutí cívek byly zaznamenány opět pomocí proudové sondy. Zkoušeny byly následující doby: 10 ms, 15 ms, 20 ms (výchozí hodnota), 30 ms, 40 ms, 50 ms. Jezdec se bez problému (při přesném vycentrování) pohyboval pro tyto mezní hodnoty: 15 ms a 40 ms. Vybrané průběhy proudu (pro jeden peak) jsou zobrazeny na Obr. 57.



Obrázek 57: Průběh proudů pro různé hodnoty požadavků rychlosti - pohled na jeden peak.

5 Závěr

Ve své práci jsem se věnoval návrhu lineárního elektromagnetického aktuátoru a jeho řídicí elektroniky. Při návrhu jsem vycházel ze své bakalářské práce [2]. Motivací mi mimo jiné byla možnost přiblížit minirobotický systém vyvíjený v *CIMRA* blíže ke komerčnímu využití a možnost práce ve výzkumném týmu *CIMRA*.

Navrhnul jsem dvě základní topologie aktuátorů včetně jezdců a v rámci experimentů ověřil jejich funkčnost. Bohužel mnou navržená topologie nedosahovala teoretických předpokladů. Největším problémem je neschopnost udržení přímého směru jezdce - proto jsem se zaměřil v matematických modelech i na metody stabilizace, ale nepodařilo se mi dosáhnout požadovaných výsledků. Již zmíněný požadavek na udržení přímého směru by bylo možno řešit rozšířením jezdce i samotného aktuátoru. U navržených prototypů jsem zvolil nevhodný poměr šířky cívek aktuátoru vzhledem k šířce, kterou zabírají magnety na jezdcích. I při malém vychýlení jezdce došlo k takovému posunu magnetů, při kterém některé magnety nepomáhaly v pohybu požadovaným směrem. Pro zvýšení síly mezi cívkami aktuátoru a permanentními magnety na jezdcích by bylo možné použít více magnetů na jezdcích. Dosažení lepších výsledků polohování by přineslo i snížení hmotnosti jezdce, resp. zvýšení podílu hmotnosti, kterou tvoří permanentní magnety. Za úvahu by stálo také implementování rozběhové rampy - při zadání požadavku na počet kroků by se rychlost spínání cívek postupně zvyšovala až na požadovanou hodnotu periody spínání.

Dále jsem navrhnul, osadil a experimentálně ověřil funkčnost řídicí elektroniky, která zapadá do rodiny polohovacích zařízení *TIP*. Řídicí elektronika je napájena ze zdroje stejnosměrného napětí. Drivery elektroniky spínají proudy do cívek aktuátoru dle požadavků mikroprocesoru. Požadavky na pohyb jsou posílány sériovou komunikací (USB/UART) z PC pomocí G-kódů.

Jako největší nevýhodu řídicí elektroniky vidím její hmotnost - ta je podstatně větší kvůli použití THT cívek zapojených na výstupu z driverů. Celková hmotnost osazené DPS je 340 g, hmotnost 4 cívek 280 g. Původně jsem chtěl použít součástky SMD, ovšem z důvodu nedostupnosti v době návrhu jsem se spokojil pro testovací elektroniku se součástkami THT. Neblahý vliv na pohyb jezdce by mohlo mít i zvlnění proudu. Pro další verzi elektroniky bych doporučoval hodnotu indukčnosti cívek $L = 470 \mu\text{H}$ zvýšit dvojnásobně.

Elektronika je řízena řídicím objektově orientovaným kódem (*TIPF*) v jazyce C++, který jsem vyvíjel během bakalářské práce. V rámci práce diplomové jsem přidal novou platformu a doprogramoval možnost zadávání požadavku na velikost proudu pomocí M-kódu, který je do elektroniky přenášen sériovou komunikací. Dále by v rámci *TIPF* mohlo být doprogramováno využití teplotního čidla, pomocí kterého by šlo jednoduše sledovat zahřívání DPS.

Dále bych chtěl porovnat mnou navržené aktuátory s komerčními systémy. Navržené aktuátory mají malé rozměry, které lze jednoduše škálovat do větších i menších prototypů. Dále jsou lehké (aktuátor *I* váží cca 6 g, aktuátor *I* váží cca 11 g), jejich výroba je jednoduchá díky použití

standardní výroby DPS i levná (cena za aktuátor a 5 jezdců je přibližně 1100,- Kč). Při vhodně navržené topologii jezdců lze dosáhnout značné přetížitelnosti. Přesnost základního pohybu je dána roztečí cívek - jeden krok jezdce je 0,5 mm.

Další směry pokračování vidím ve změně designu jezdce, výrobu jezdců ztěžuje relativně složité lepení válcových permanentních magnetů o výšce i průměru 1 mm. Další topologie by mohly využít například kvádrových permanentních magnetů o rozměrech $1,5 \times 1,5 \times 10$ mm. Zásadním úkolem bude vyřešení problému neudržení přímého směru jezdce.

Seznam použité literatury

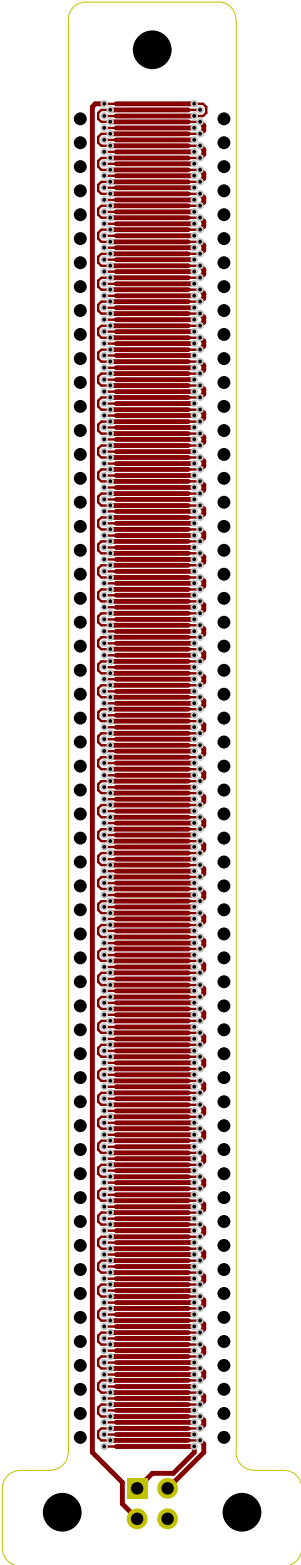
- [1] M. Husák, *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, 2008.
- [2] J. Tureček, „Elektromagnetický systém pro paralelní polohování magnetických těles,“ bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [3] *ELUC: Lineární motory*, [online]. Dostupné z: <https://www.eluc.kr-olomoucky.cz>, 21. čvn. 2021.
- [4] K. Kocman, *Elektrické stroje a přístroje I*. SNTL, 1990, ISBN: 80-03-00406-3.
- [5] J. Běťák, „Návrh řízení lineární pohybové osy pomocí předefinovaných kinematických trajektorií,“ bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum, 2017.
- [6] A. Hsu, W. Chu, C. Cowan et al., „Diamagnetically levitated milli-robots for heterogeneous 3D assembly,“ *Journal of Micro-Bio Robotics*, roč. 14, č. 1-2, s. 1–16, 2018.
- [7] *SPŠ, SOŠ a SOU Hradec Králové: Lineární motory*, [online]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/224/ESP_-_Motory/M-8_Linearni_asynchronni_motor.pdf, 21. čvn. 2021.
- [8] O. Kramář, *Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnitřním buzením*, [online]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30306844.pdf>, 21. čvn. 2021.
- [9] J. Novotný, „Řízení pohonu s lineárním motorem,“ diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [10] *Řemen GT2*. URL: <https://www.materialpro3d.cz/mechanicke-dily/remen-gt2/> (cit. 30. 05. 2022).
- [11] *Řemenice GT2 20 zubů*. URL: <https://www.materialpro3d.cz/mechanicke-dily/remen-gt2/> (cit. 30. 05. 2022).
- [12] *TiMOTION: Components of an Electric Linear Actuator*, [online]. Dostupné z: <https://www.timotion.com>, 18. čvn. 2021.
- [13] *Thomson Linear: 500 Series Ball Linear Guides*, [online]. Dostupné z: <https://www.thomsonlinear.com/en/products/profile-rail/500-series-ball-guide>, 23. čvn. 2021.
- [14] *CPC: Ball Type Linear Guide Series*, [online]. Dostupné z: [https://www.raveo.cz/sites/default/files/cpc/ARHR/ARHR\(en\).pdf](https://www.raveo.cz/sites/default/files/cpc/ARHR/ARHR(en).pdf), 27. květ. 2022.
- [15] *Lineární vedení*, [online]. Dostupné z: <https://www.vedeni-linearni.cz>, 27. květ. 2022.
- [16] *Thomson Linear: MicroGuide® Linear Guides*, [online]. Dostupné z: <https://www.thomsonlinear.com/en/products/profile-rail/microguide>, 24. čvn. 2021.
- [17] *NTN SNR: We get you moving!* [online]. Dostupné z: <https://mnsystems.cz/images/katalog/ntn-snr/ntn-linearni-vedeni.pdf>, 27. květ. 2022.

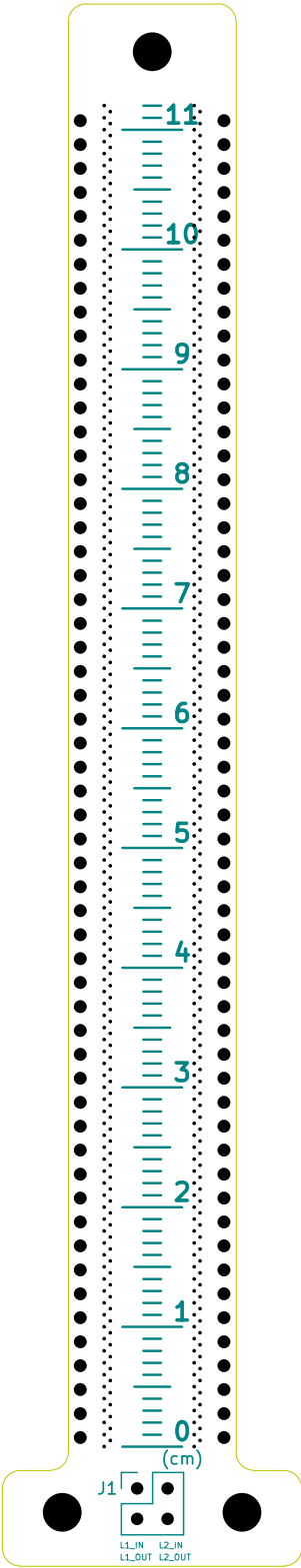
-
- [18] J. Roman a P. Houška, *Řízení lineárních pohonů HIWIN*. VUT v Brně, 2014.
- [19] *SICK: Enkodéry*, [online]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/encodery>, 7. čvc. 2021.
- [20] *HIWIN: Polohovací systémy*, [online]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz>, 7. čvc. 2021.
- [21] *WikiSkripta: Hallův jev*, [online]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Hallův_jev, 22. čvn. 2021.
- [22] *RENISHAW: Odměřování polohy*, [online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>, 8. čvc. 2021.
- [23] J. Kuthan a M. Juřík, „Klíčové parametry pro polohování magnetických těles v planární rovině,“ 2018.
- [24] J. Kuthan et al., „Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles,“ 2017.
- [25] Z. Yang a L. Zhang, „Magnetic actuation systems for miniature robots: A review,“ *Advanced Intelligent Systems*, roč. 2, č. 9, s. 2000082, 2020.
- [26] R. Pelrine, A. Wong-Foy, B. McCoy et al., „Diamagnetically levitated robots: An approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties,“ in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2012, s. 739–744.
- [27] R. Pelrine, A. Hsu a A. Wong-Foy, „Methods and Results for Rotation of Diamagnetic Robots Using Translational Designs,“ in *2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, IEEE, 2019, s. 1–6.
- [28] J. Kuthan, M. Juřík, M. Vitek a F. Mach, „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, s. 1–6.
- [29] T. Šašek et al., „Paralelní polohování miniaturních robotů pomocí magnetického pole,“ 2017.
- [30] J. Vlček et al., „Paralelní polohování feromagnetických těles pomocí magnetického pole,“ 2018.
- [31] J. Kuthan, M. Juřík a F. Mach, „Magnetic Actuation of Multiple Robots by the Coplanar Coils System,“ in *2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, IEEE, 2019, s. 1–5.
- [32] D. Mayer, *Aplikovaný elektromagnetismus. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, 2012*.
- [33] *Přenosová soustava elektrické energie*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev> (cit. 12. 02. 2021).
- [34] M. Juřík, J. Kuthan, J. Vlček a F. Mach, „Positioning uncertainty reduction of magnetically guided actuation on planar surfaces,“ in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2019, s. 1772–1778.
- [35] *MCU datasheet*, [online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/60001507E-1660031.pdf>, 15. břez. 2022.

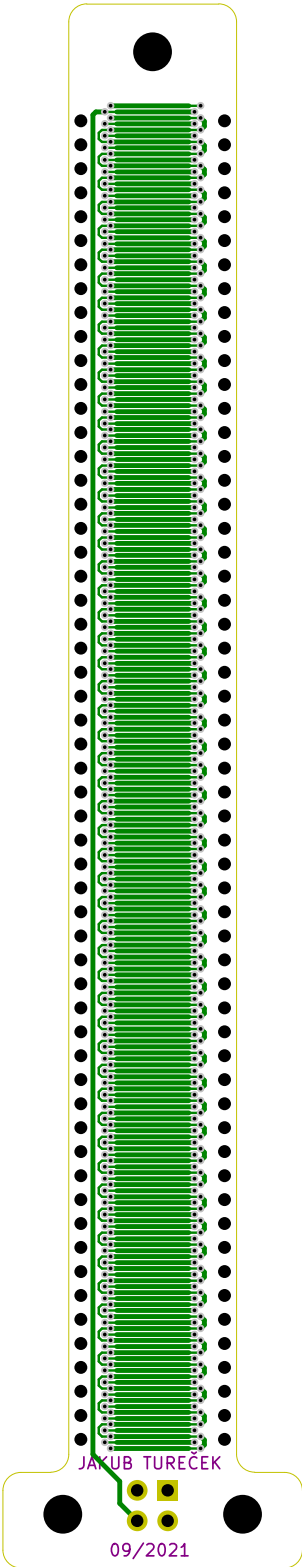
- [36] *Driver datasheet*, [online]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8876.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&DCM=yes&ref_url=https%3A%2F%2Fcz.mouser.com%2F&distId=26, 15. břez. 2022.

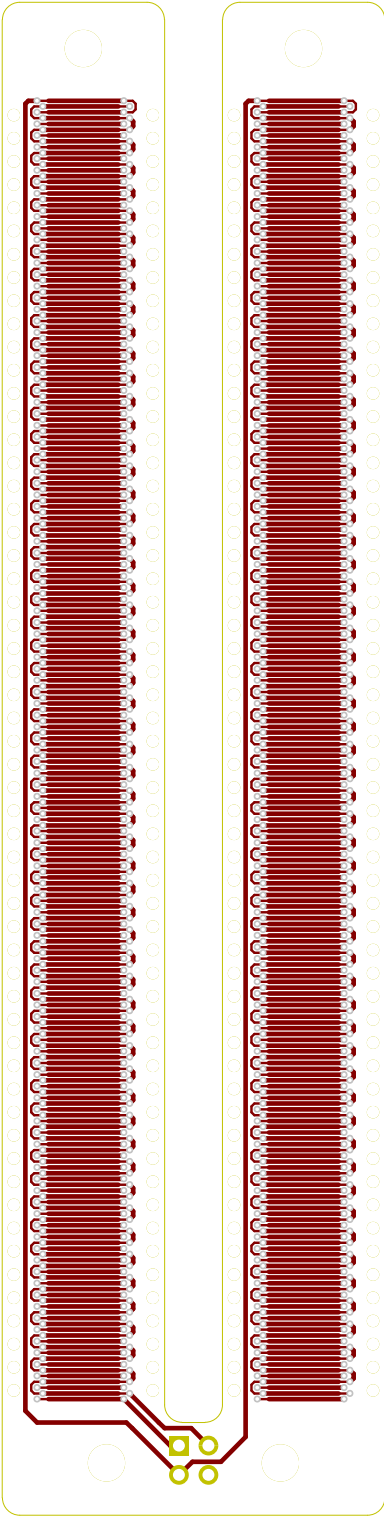
Přílohy

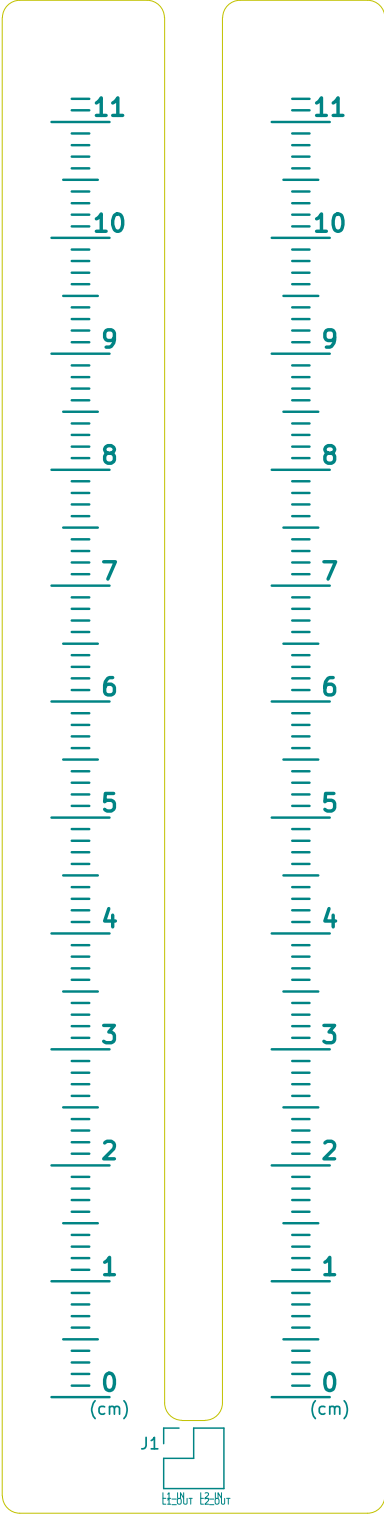
popis	strana
DPS LA typ I: horní vrstva mědi	B
DPS LA typ I: horní potisk	C
DPS LA typ I: spodní vrstva mědi a potisk	D
DPS LA typ H: horní vrstva mědi	E
DPS LA typ H: horní potisk	F
DPS LA typ H: spodní vrstva mědi a potisk	G
schéma LAE: celkový pohled	H
schéma LAE: silový vstup	I
schéma LAE: komunikace	J
schéma LAE: měření a periferie	K
schéma LAE: pulzní měnič pro snižování napětí	L
Schéma LAE: mikrokontrolér	M
schéma LAE: driver 01	N
schéma LAE: driver 02	O
schéma LAE: driver 03	P
schéma LAE: driver 04	Q
DPS LAE: horní vrstva mědi	R (nahore)
DPS LAE: horní potisk a pájecí pasta	R (dole)
DPS LAE: spodní vrstva mědi	S

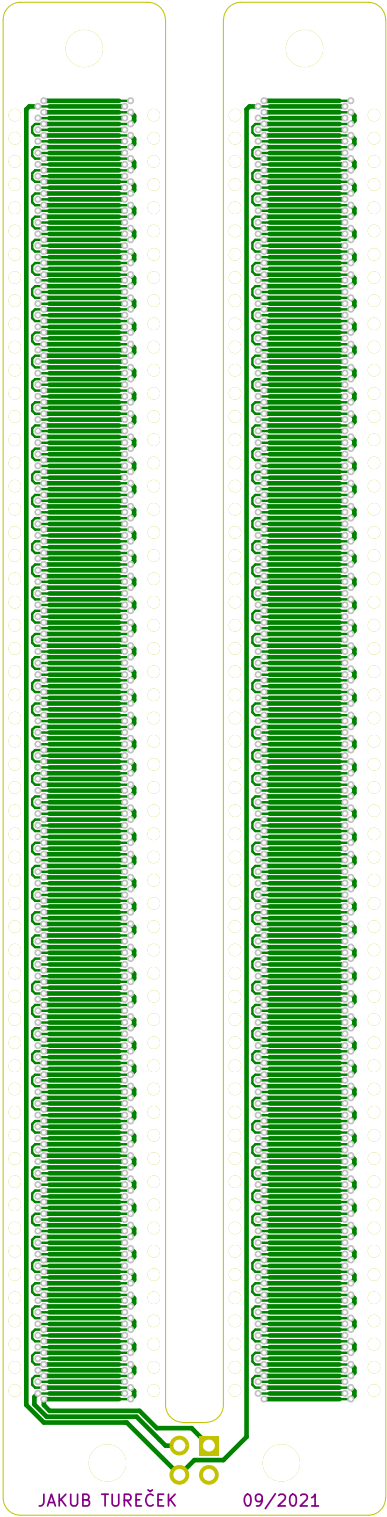


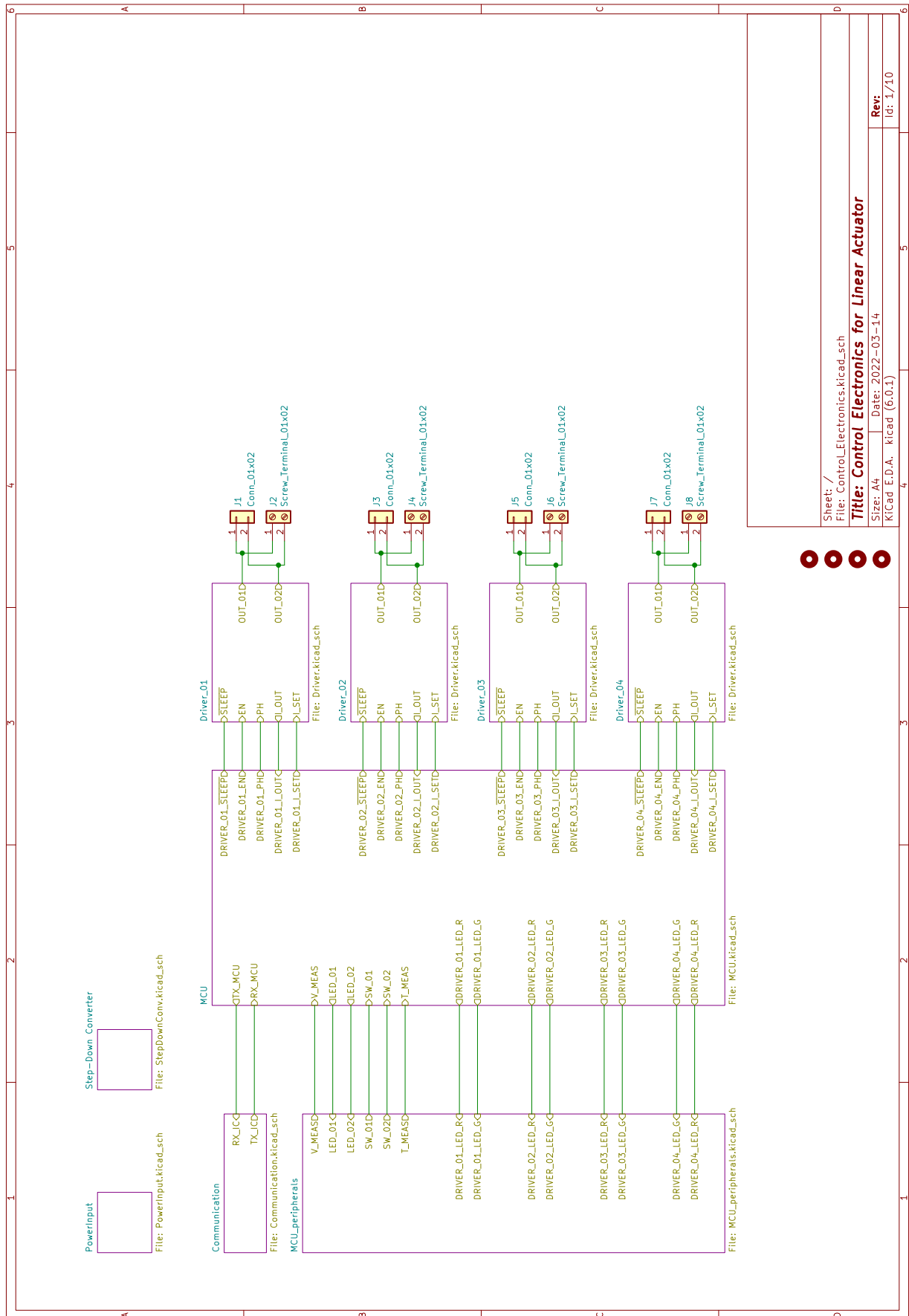


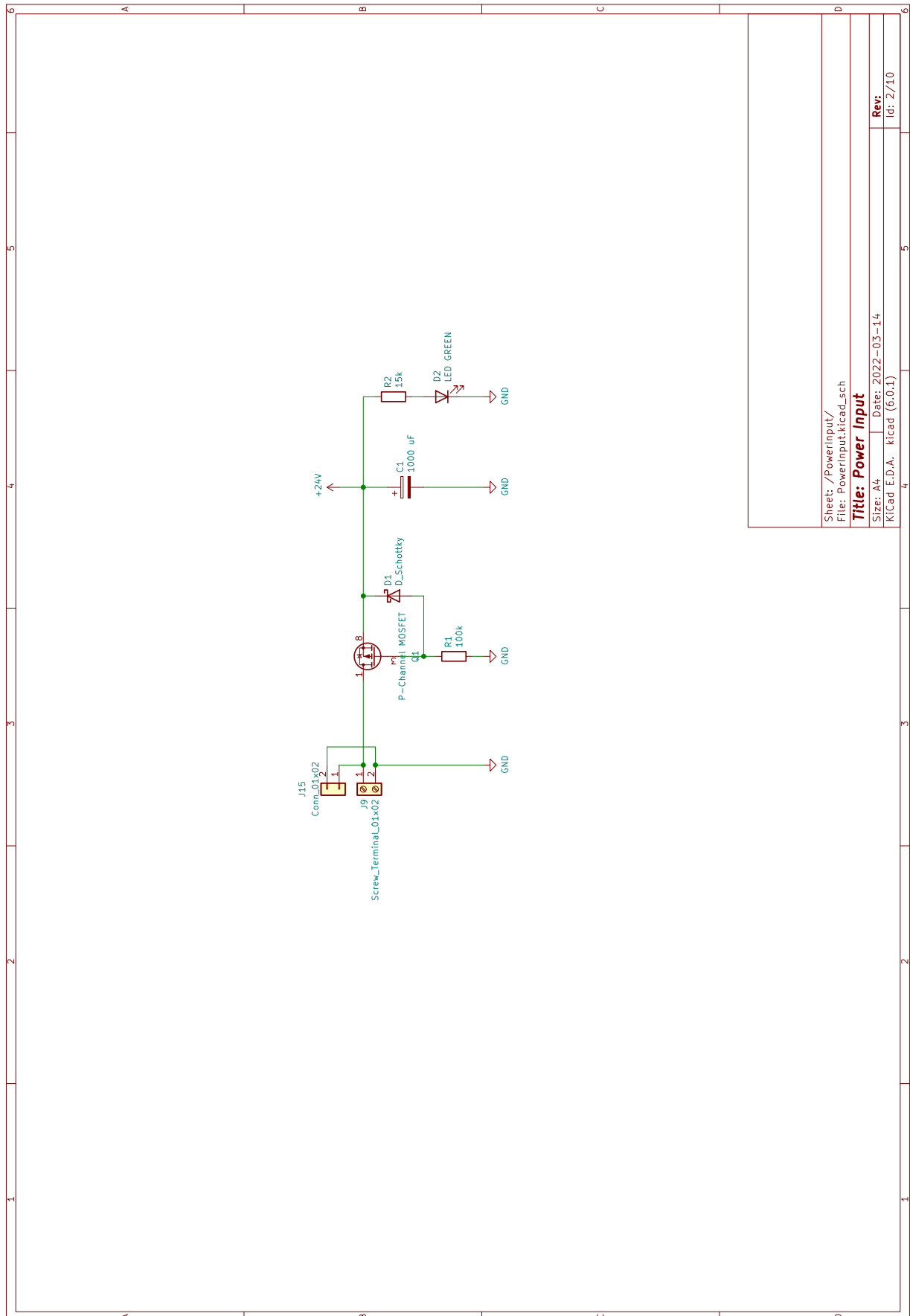










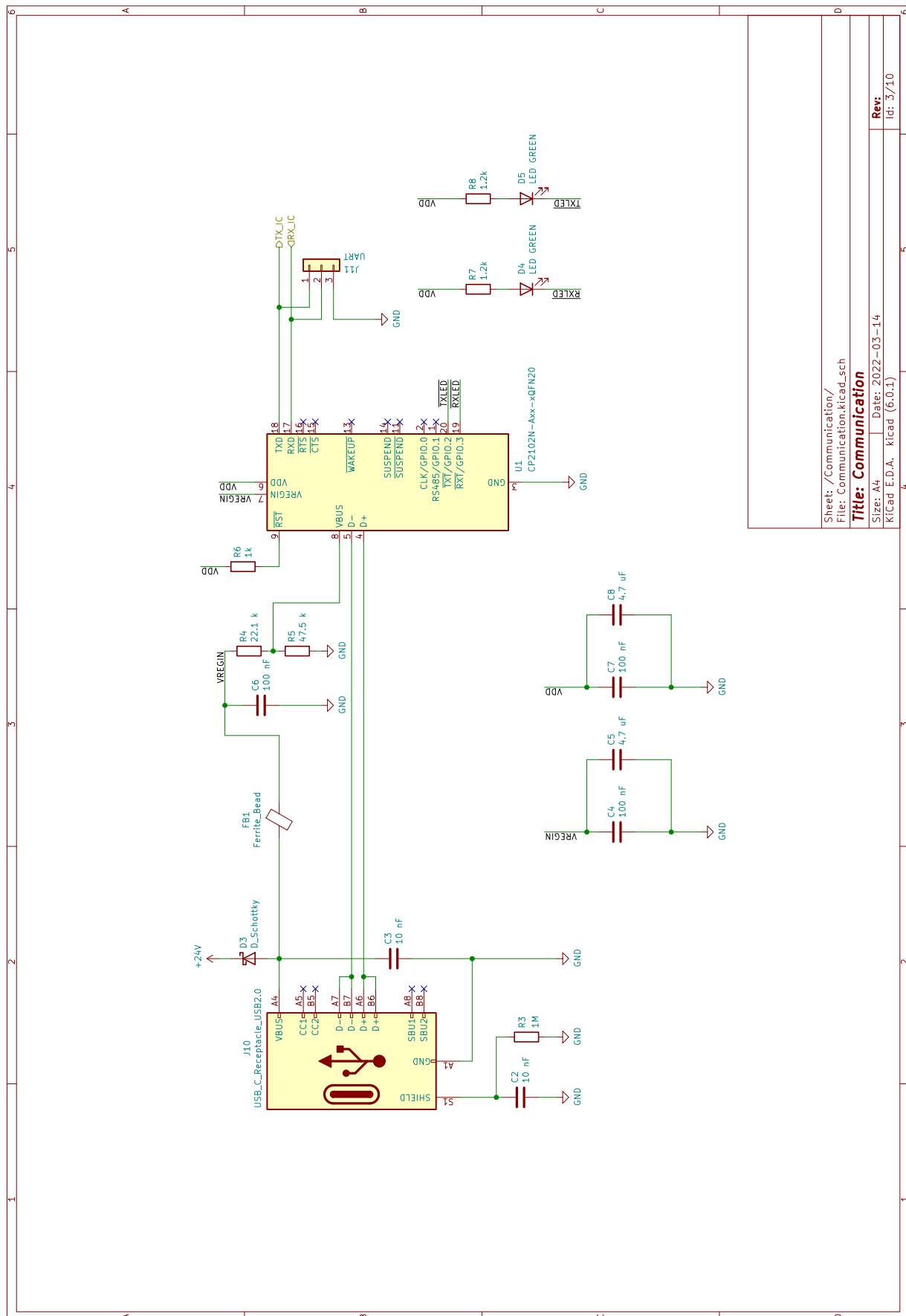


Sheet: /PowerInput/
File: PowerInput.kicad_sch

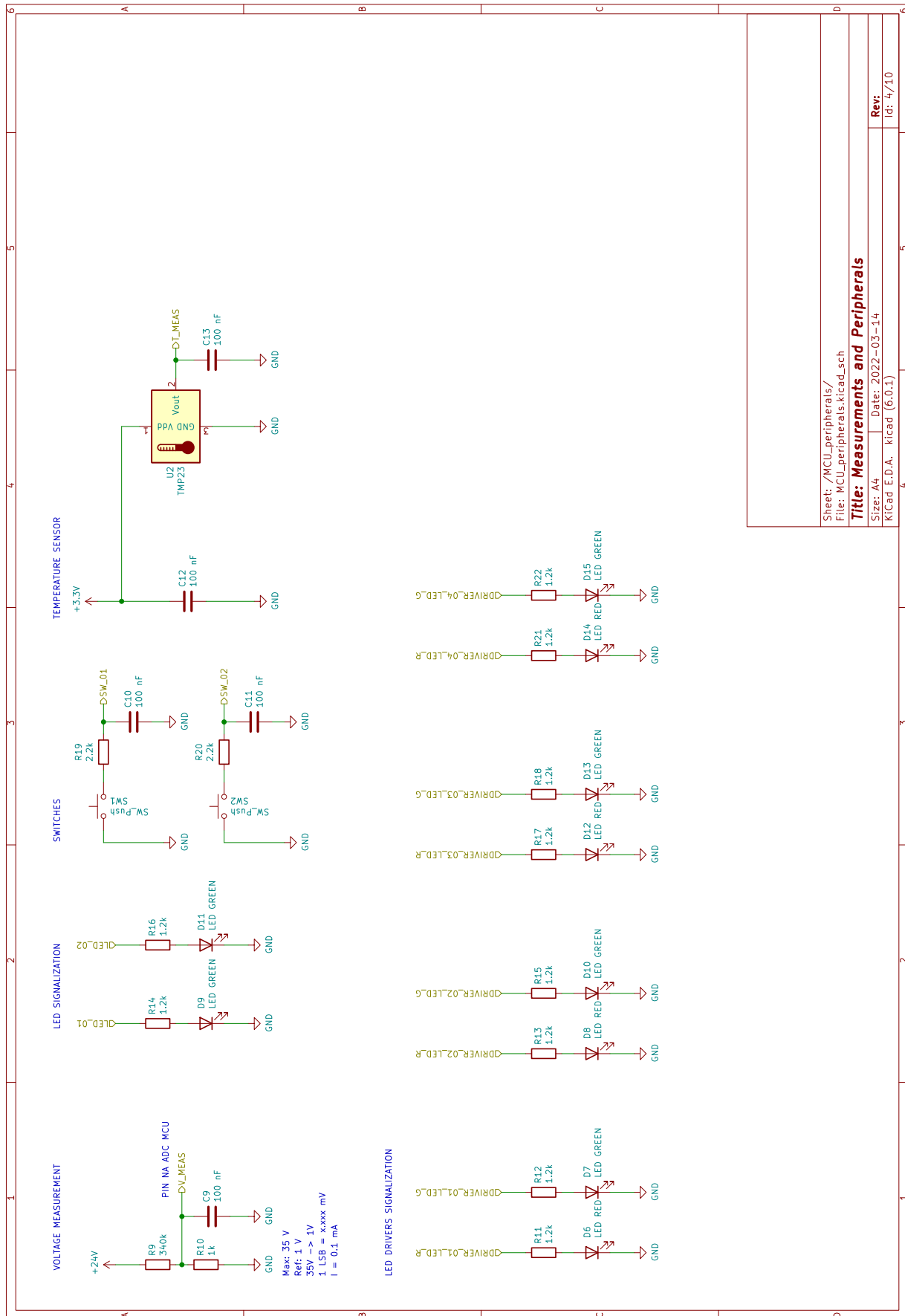
Title: **Power Input**

Size: A4 Date: 2022-03-14

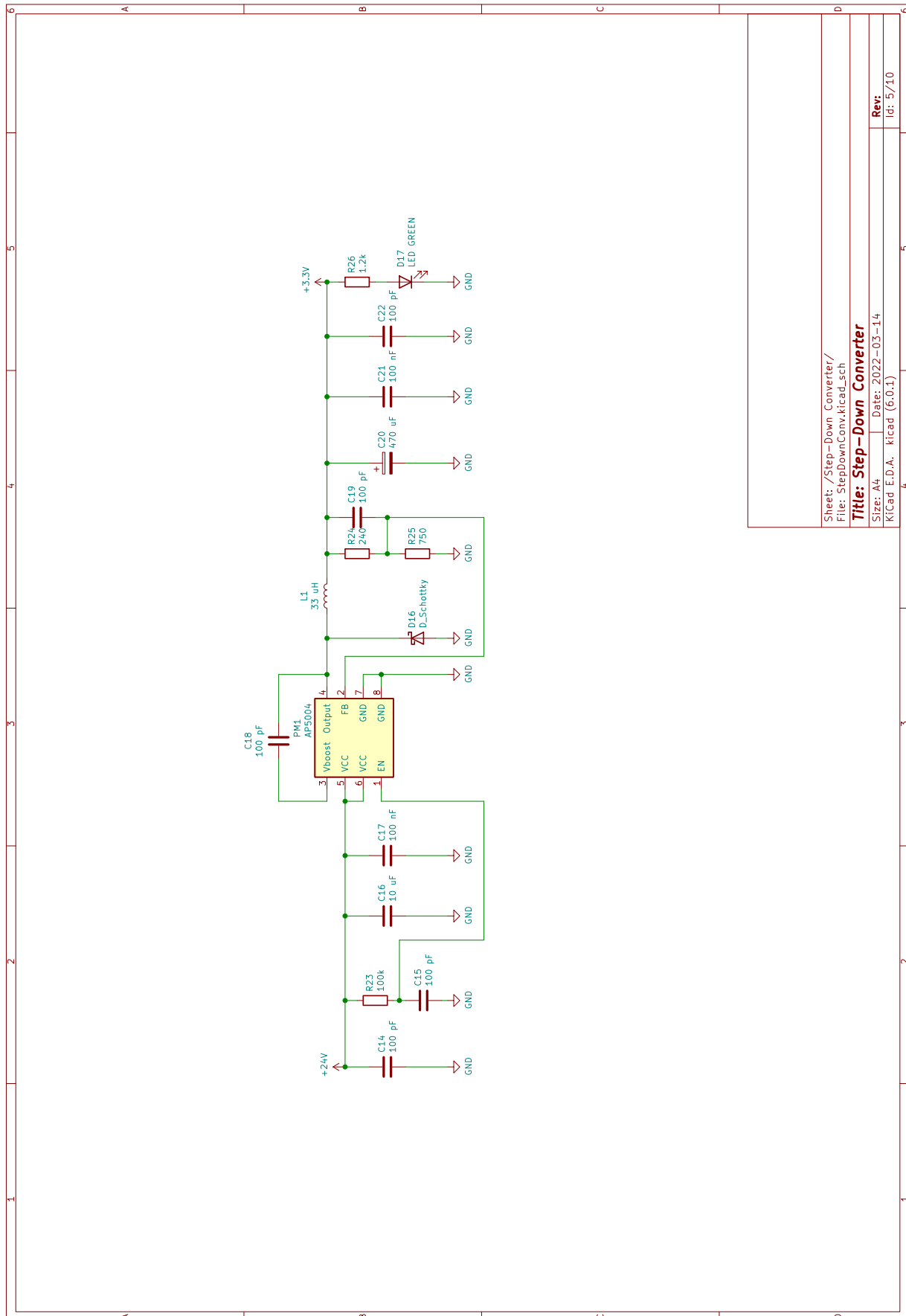
KiCad E.D.A. - KiCad (6:0:1) **Rev:** 10:2/10



Sheet: /Communication/
 File: Communication.kicad_sch
Title: Communication
 Size: A4 Date: 2022-03-14
 KiCad E.D.A. kicad (6:0:1)



Sheet: /MCU_peripherals/	
File: MCU_peripherals.kicad_sch	
Title: Measurements and Peripherals	
Size: A4	Date: 2022-03-14
KiCad E.D.A. - kicad (6:0:1)	
Rev:	IG: 4/10



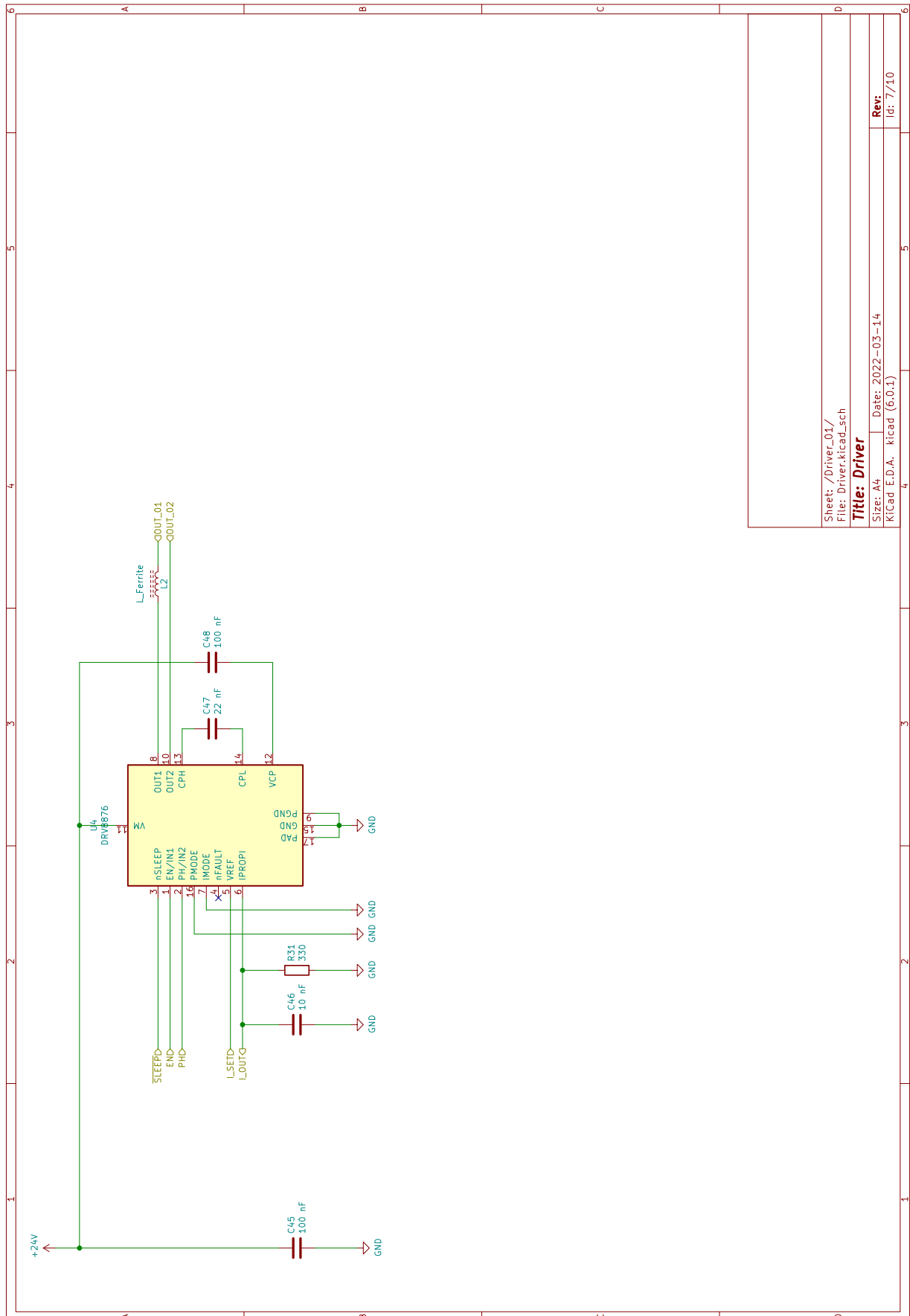
Sheet: /Step-Down Converter/
 File: StepDownConv.kicad_sch

Title: Step-Down Converter

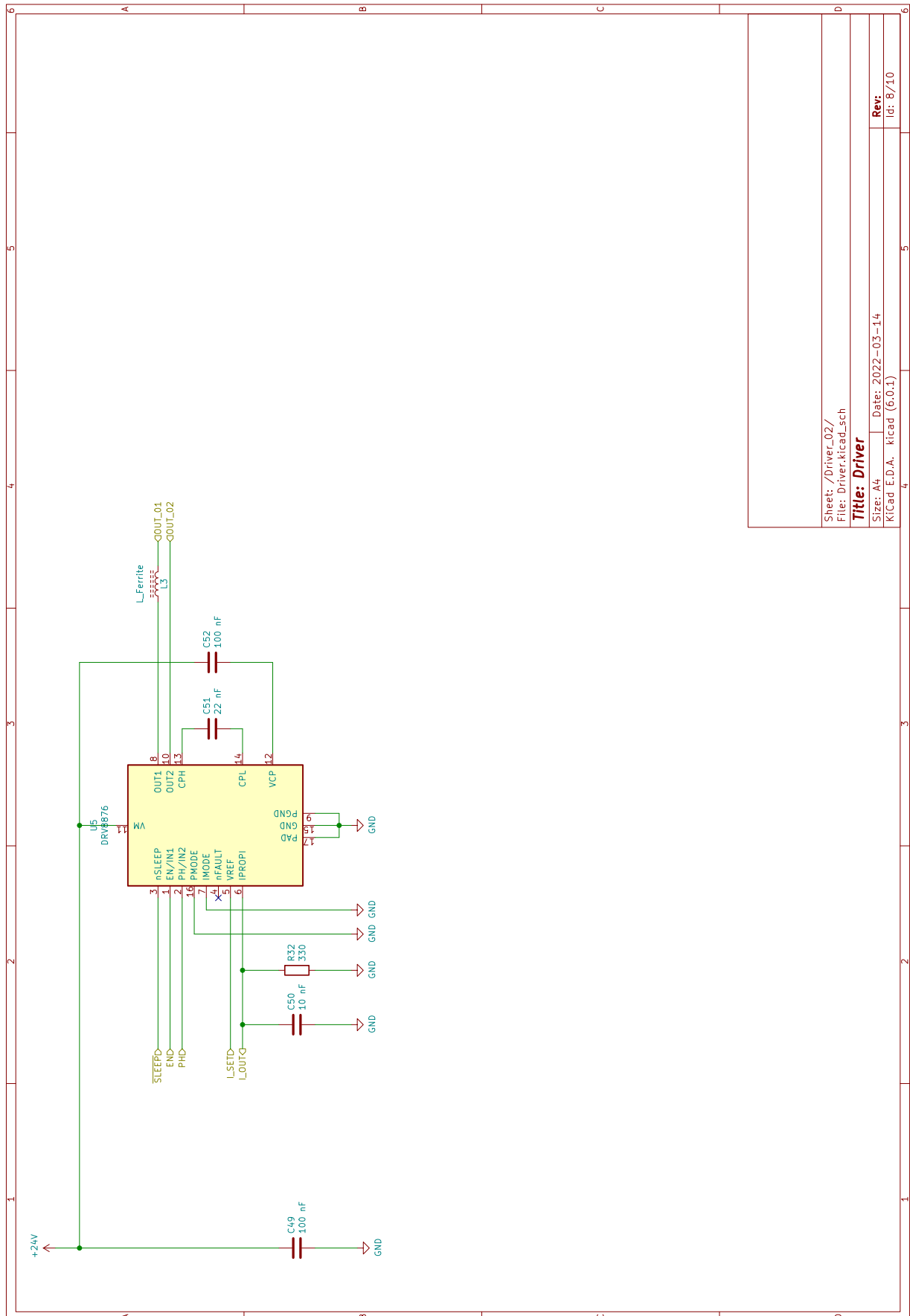
Size: A4 Date: 2022-03-14

Rev: 10: 5/10

KiCad E.D.A. kicad (6:0:1)



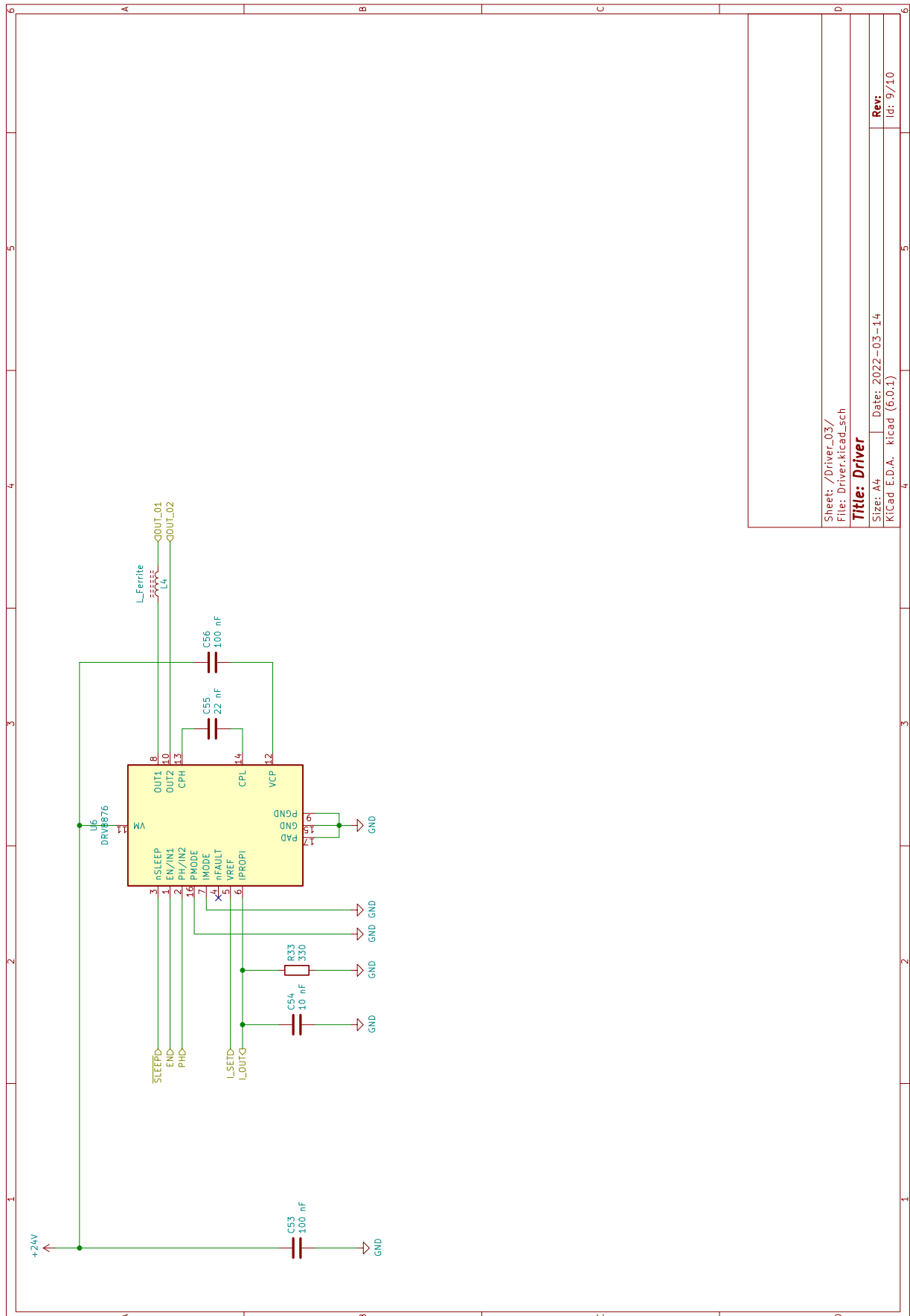
Sheet: /Driver_01/
 File: Driver.kicad_sch
Title: Driver
 Size: A4 | Date: 2022-03-14
 KiCad E.D.A. - kicad (6:0:1)



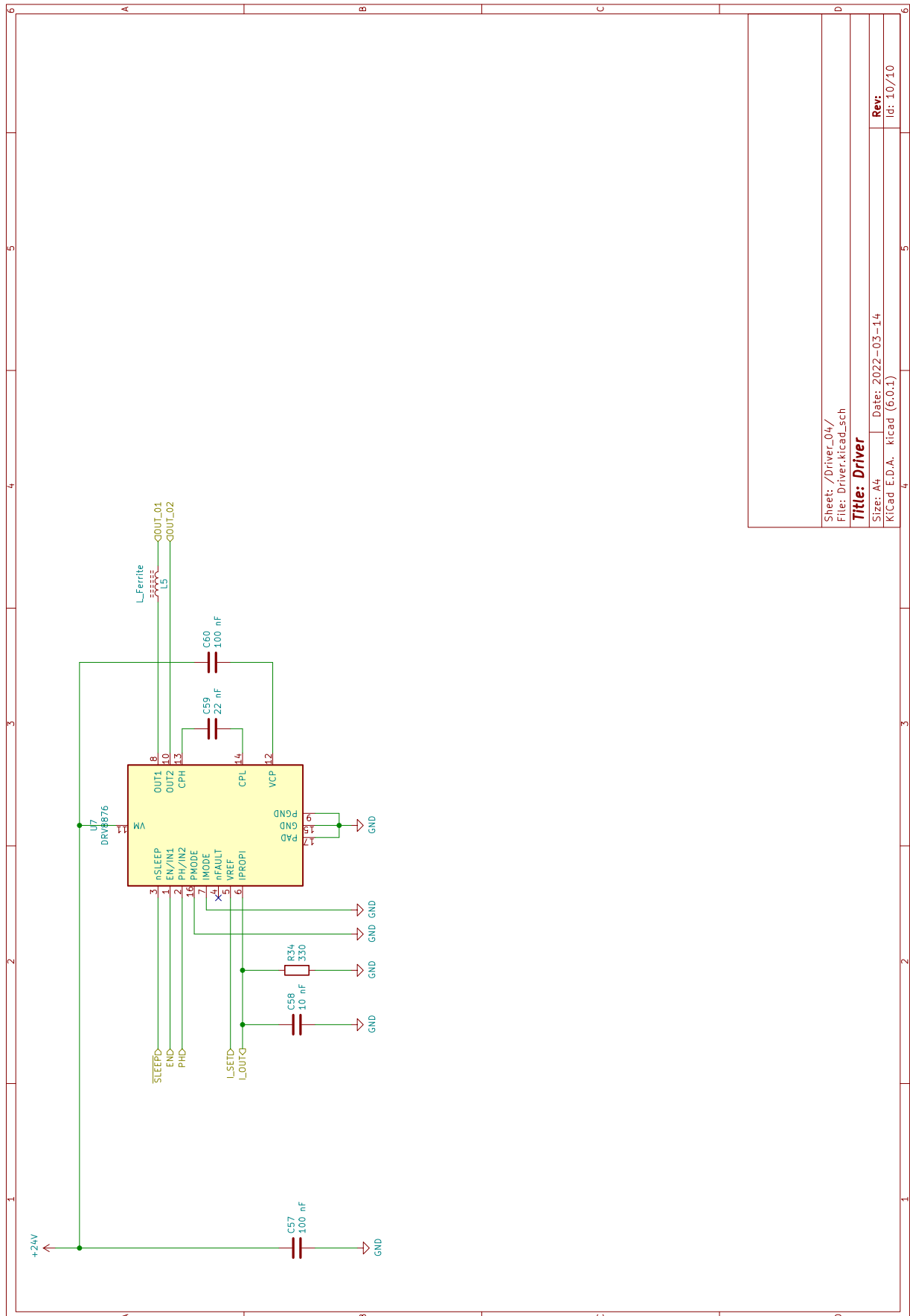
Sheet: /Driver_02/
 File: Driver.kicad_sch
Title: Driver
 Size: A4
 KiCad E.D.A. kicad (6:0.1)

Date: 2022-03-14

Rev:
 Id: 8/10



Sheet: /Driver_03/
 File: Driver.kicad_sch
Title: Driver
 Size: A4 Date: 2022-03-14
 KiCad E.D.A. kicad (6:0.1) Rev: 10:9/10



Sheet: /Driver_04/
 File: Driver.kicad_sch
Title: Driver
 Size: A4 Date: 2022-03-14
 KiCad E.D.A. kicad (6:0.1)

